

Thèse préparée en vue de l'obtention du grade de
Docteur en Histoire des sciences et des techniques
de l'Université de Strasbourg

« *From an art to a science* » :
chimie colloïdale, pigments et recherche
« fondamentale » chez Du Pont de Nemours
1900-1945

Présentée par

AUGUSTIN CERVEAUX

| | |
|------------------------|--|
| Directeur de thèse | Hugues Dreysé Professeur, Université de Strasbourg |
| Co-encadrante de thèse | Soraya Boudia Maître de Conférences habilitée, Université de Strasbourg |
| Rapporteur interne | Véronique Pitchon Chargée de recherches habilitée, Université de Strasbourg |
| Rapporteurs externes | Bernadette Bensaude-Vincent Professeur, Université Paris I Terry Shinn Directeur de recherches, Université Paris IV |
| Examineur | Carsten Reinhardt Professeur, IWT Biellefeld Universität, Allemagne |
| Membre invité | Etienne Klein Directeur de recherches, CEA/LARSIM |

soutenue publiquement le 29 novembre 2010

« *FROM AN ART TO A SCIENCE* » :

**CHIMIE COLLOÏDALE, PIGMENTS ET RECHERCHE
« FONDAMENTALE » CHEZ DU PONT DE NEMOURS
1900-1945**

REMERCIEMENTS

Réalisée entre Strasbourg et les Etats-Unis (principalement Philadelphie et Wilmington), cette thèse est un aboutissement majeur d'un long voyage, scientifique certes, mais aussi géographique et culturel. De nombreuses personnes m'ont guidé dans ce voyage, averti des dangers et des impasses, suggéré des sentiers plus adéquats, confirmé la direction, et bien souvent contribué à ce qu'il soit plus agréable ou moins difficile. La valeur du présent document est assez largement le fruit de leur soutien intellectuel, moral ou matériel, et je tiens ici à exprimer ma gratitude.

L'ouverture vers les Etats-Unis s'est accompagnée d'une évolution significative du sujet de recherche, progressive mais profonde. Je remercie Soraya Boudia pour ses conseils avisés et son aide méthodologique précieuse tout au long de ce travail, et d'avoir continué à m'encadrer malgré cette bifurcation. Je dois beaucoup à Mary Jo Nye ; ses commentaires approfondis des deux premiers chapitres, et leur amélioration conséquente, ont contribué à améliorer la qualité de l'ensemble de la thèse. Je remercie aussi Vincent Bontems. Les critiques et suggestions de Terry Shinn m'ont également beaucoup aidés, de même que son appui auprès de la *Chemical Heritage Foundation* de Philadelphie pour y effectuer un *fellowship*, qui a véritablement initié le voyage lointain.

Je remercie cette institution, qui, outre son apport matériel et logistique, m'a permis de côtoyer et de me former au milieu d'histoire des sciences de Philadelphie. Je remercie en particulier Ronald Brashear et Ashley Augustinyak, et Cyrus Mody de m'avoir orienté vers ces *fellowships* ; merci également à Emily Pawley, pour toutes les discussions sur l'histoire et les sciences. C'est également à travers la CHF que j'ai découvert le *Hagley Museum and Library* de Wilmington et donc les archives de Du Pont ; une découverte qui a accéléré la bifurcation de la thèse vers sa forme finale. Merci encore à toute son équipe, et en particulier à Carol Lockman et Marj McNinch. J'ai grandement bénéficié de l'environnement académique lié au Hagley. Aux Etats-Unis, je remercie également Michael Marko, Richard Siegel, et surtout Bruce Hevly et David Hounshell pour leurs commentaires sur un article présenté à la *Society for the History of Technology*. Merci également à Clifford Mead de m'avoir orienté dans les archives de Paul Emmett, ainsi que dans les villes de Corvallis et Portland. Alex Magoun et Forrest Bradbury ont joué un rôle similaire à Princeton.

Je remercie mes collègues de l'IRIST, ma réflexion a souvent avancé grâce à de nombreuses conversations informelles. Merci en particulier à Christian Bonah, Véronique Pitchon et Jean-Luc Gangloff pour leur travail de commentaire, relecture ou correction. Enfin, sans le soutien constant de mes parents, de ma famille et de mes amis, cette thèse n'aurait jamais abouti. Lindsey, Matthew, Anaïs et Sébastien, Marion, Mireille, mes grands-parents, m'ont empêché de m'arrêter en chemin. En plus de son soutien, je suis reconnaissant à ma mère pour sa chasse aux fautes. Merci aussi à Vincent, j'ai été heureux de partager le bureau, où cette thèse a été écrite en grande partie, avec toi. Et enfin merci Amandine !

Note de lecture : Pour la fluidité de la lecture, de nombreuses citations en anglais ont été traduites par l'auteur. Certains passages ou expressions considérés comme particulièrement importants ou problématiques sont cependant reproduits dans la version originale, à côté de leur traduction. Les abréviations, qui renvoient aux sources d'archives, sont explicitées en fin de thèse.

En Union soviétique on enseigne maintenant que la deuxième guerre mondiale a été suivie d'une « révolution scientifique et technique » qui a du être très courte puisqu'on la considère déjà comme dépassée. [...] La notion a séduit certains esprits qui ne sont pas soumis à l'influence de l'école soviétique. [...] Il ne semble pas que les auteurs français qui ont le plus récemment développé cette thèse, Daniel Furia et Pierre Serre, aient estimé à sa juste valeur l'évolution des techniques au cours du premier vingtième siècle, et principalement pendant la période d'entre-deux guerres qui a été une période clé. S'ils avaient eu l'occasion de réfléchir profondément au déroulement des évènements techniques avant la deuxième guerre, ils auraient pu se rendre compte que toutes les innovations dont ils font état pour étayer leur affirmation ont éclo sur des connaissances qui furent acquises pendant cette période. La guerre a créé les conditions d'une accélération de la recherche technique comme l'avait fait la précédente. [...] En réalité, cette apparente révolution technique (ou industrielle) tient aussi largement au fait que les Etats-Unis, qui avaient déjà profité des effets de la première guerre, se sont trouvés hors de la « ligne de front » et ont pu couvrir le marché qui s'ouvrait à eux, et à eux seuls, parce que leurs richesses industrielles et économiques leur permettaient de consacrer d'énormes moyens à la recherche et au développement des innovations basées sur des connaissances déjà acquises initialement. La guerre a complété ce que le New Deal n'avait pas encore achevé.

Maurice Daumas, *Histoire générale des techniques*, introduction au volume 4 (1978)

TABLE DES MATIERES

| | |
|---|-----------|
| Remerciements | v |
| Table des matières | xi |
| Table des illustrations | xv |
| Introduction | 1 |
| Une nouvelle « ontologie des matériaux » comme cadre interprétatif de l'essor de la chimie colloïdale 1900-1930 | 2 |
| Instrumentation, ontologie des matériaux et mise en œuvre du lien microstructures - macropropriétés | 4 |
| Science pure, recherche fondamentale et « tension créatrice » | 6 |
| Plan de la thèse | 11 |
| | |
| PARTIE I. NOUVELLE ONTOLOGIE DES MATERIAUX ET INSTRUMENTATION | 13 |
| | |
| Chapitre 1. L'essor de la chimie colloïdale, 1900-1930 : une nouvelle « ontologie des matériaux » ? | 15 |
| Les colloïdes : des substances définies par exclusion ? | 17 |
| Chimie organique et chimie colloïdale 1900-1930 – Dynamique des matériaux, dynamiques disciplinaires | 22 |
| Maturité et redéfinition du territoire des colloïdes | 22 |
| Industrie des colloïdes et chimie organique : des traditions en démarcation-coopération | 30 |
| Nouvelle ontologie et nouveaux schèmes explicatifs des propriétés | 39 |
| Chimie colloïdale et particules | 39 |
| Chimie organique et molécules | 47 |
| | |
| Chapitre 2. Instruments et métrique : le mouvement des colloïdes et la mesure des micro-mondes | 51 |
| L'ultramicroscope, le millimicron et la réalité moléculaire | 53 |
| Zsigmondy et l'hétérogénéité des solutions colloïdales | 54 |
| Nouvelle unité métrique et nouvelle ontologie des matériaux | 56 |
| De la discontinuité des colloïdes à la discontinuité de la matière | 59 |
| The Svedberg et l'ultracentrifugeuse | 60 |
| Dans les pas de Zsigmondy | 60 |
| Le séjour aux Etats-Unis – l'élaboration de l'ultracentrifugeuse | 61 |
| Svedberg et la vision « moléculaire » de la vie | 66 |
| Paul Emmett et la « BET » | 67 |
| Paul Emmett et le Fixed Nitrogen Laboratory | 69 |
| De l'étude de l'adsorption à la quantification de la surface des catalyseurs | 71 |
| L'apport du mouvement des colloïdes et la versatilité de la BET | 75 |
| Eli Burton, le microscope électronique et le « monde des particules fines » | 78 |
| Eli Burton et le premier prototype à l'université de Toronto | 79 |
| Kraemer et le microscope électronique | 81 |
| La RCA, le microscope électronique, et l'état d'urgence industriel et militaire | 84 |
| Conclusion | 87 |

| | |
|---|------------|
| PARTIE II. APPROPRIATION PAR L'INDUSTRIE — LA RECHERCHE « FONDAMENTALE » | 91 |
| Chapitre 3. Appropriation par l'industrie (I) : insertion de la chimie colloïdale et recherche « fondamentale » chez Du Pont — 1917-1928 | 93 |
| Diversification, « recherche fondamentale », et insertion des colloïdes chez Du Pont | 94 |
| Colloïdes, catalyse et polymérisation – la mise en place du programme « fondamental » de Stine | 106 |
| Science pure et recherche fondamentale | 106 |
| Un programme endogène au département de Chimie ? | 109 |
| Chapitre 4. Appropriation par l'industrie (II) : immixtion avec la physique et instrumentation | 117 |
| Insertion des rayons X chez Du Pont – de la métallurgie à la chimie | 119 |
| Réification de l'instrumentation – Mise en place d'un « comité en physique » | 122 |
| Réductionnisme, coopération entre les groupes, et instrumentation | 127 |
| Appropriation par la physique discipline | 136 |
| Conclusion | 141 |
| Chapitre 5. Maturité et démembrement du groupe des colloïdes de Du Pont — 1927-1945 | 147 |
| Le groupe des colloïdes comme une composante de l'école de recherche de Svedberg | 149 |
| Recherche biomédicale chez Du Pont et l'extension du réseau de Svedberg | 153 |
| Un leitmotiv : « <i>particle-size</i> » | 162 |
| Elmer Kraemer et le réductionnisme microstructural en chimie | 162 |
| Le réductionnisme comme vecteur de « rationalisation » – des pigments aux fibres textiles | 171 |
| Particle size et molecular weight : un programme de recherche « coopératif » sur les polymères | 182 |
| Le démembrement du groupe des colloïdes – des colloïdes organiques à la physico-chimie des polymères : continuité ou discontinuité ? | 193 |
| PARTIE III. PIGMENTS ET VERNIS : CONSOMMATION DE MASSE ET RECHERCHE INDUSTRIELLE | 199 |
| Chapitre 6. « <i>From an art to a science</i> » (I) : L'industrie des peintures et vernis 1900-1928 | 201 |
| Pénétration des « chimistes » dans l'industrie des peintures 1890-1916 | 202 |
| L'industrie des peintures au tournant du siècle – les lois d'étiquetage | 202 |
| Premiers panneaux d'exposition en extérieur | 206 |
| Composition et microstructures – la diffusion du microscope | 209 |
| Essor de l'industrie chimique américaine, consommation de masse et nouveaux modes de spécification des peintures dans l'entre-deux guerres | 213 |
| Le rôle accru du gouvernement fédéral – le Bureau des Normes et sa section des peintures | 213 |
| La rivalité Du Pont – New Jersey Zinc Co. | 218 |
| Diffusion de la chimie colloïdale et organisation des chimistes | 227 |
| Les pigments minéraux : des matériaux types pour la chimie colloïdale | 227 |
| Organisation des chimistes et complémentarité des divisions de l'American Chemical Society | 230 |
| Chapitre 7. pigments et essor du réductionnisme microstructural chez Du Pont — 1928-1937 | 237 |
| La mobilisation du groupe des colloïdes dans la stratégie sur les brevets | 238 |
| Microstructures et brevets : du lithopone aux pigments colorés | 238 |

| | |
|--|------------|
| L'insertion de Du Pont dans une technologie brevetée : négocier, attaquer, défendre les brevets des pigments au titane | 243 |
| Articulation du réductionnisme – topologie de la recherche | 246 |
| « Rationaliser » la production et l'innovation | 247 |
| La transition vers les pigments au titane | 252 |
| Une étude « fondamentale » du pouvoir couvrant | 257 |
| La « Master Curve » | 264 |
| Désolidarisation du fondamental et des groupes des colloïdes et de physique | 269 |
| Epilogue – la stratégie d'entreprise et la science | 274 |
| Chapitre 8. « From an art to a science » (II) – Vernis et pigments colorés dans la Grande Dépression chez Du Pont : consommation de masse et recherche industrielle | 279 |
| « <i>The great egalitarian force</i> » : science, marketing, et mouvements de consommateurs | 281 |
| Les enfants de la dépression | 281 |
| L'organisation des « consommateurs » | 282 |
| Vernis et culture de la consommation : le basculement vers les peintures domestiques | 284 |
| Colorimétrie et pigments colorés | 298 |
| Conclusion | 307 |
| Ouverture 1 : recherche fondamentale, marketing et consommateurs : une même « culture de l'objectivité » ? | 313 |
| Ouverture 2 : De la justification de la science – l'érosion de la « science » des colloïdes comme un changement de « régime » scientifique et technique | 314 |
| Ouverture 3 : la longue durée des « nanos » | 319 |
| Sources archives – abréviations | 321 |
| Essai Bibliographique | 323 |
| Chimie industrielle – pigments et peintures | 323 |
| Recherche industrielle – relations science-technique | 326 |
| Evolution des disciplines, des pratiques et des concepts en chimie | 329 |
| Essor d'une société de masse | 331 |
| Annexes | 333 |
| A. Instituts de recherche engagés dans la chimie colloïdale 1900-1930 | 333 |
| B. Classifications des colloïdes élaborées par Ostwald et Staudinger | 347 |
| C. Instrumentation et compétences physiques au département de Chimie de Du Pont, vers 1931 | 350 |
| D. Composition des groupes des colloïdes et de physique de Du Pont | 352 |
| E. Projets de recherche « fondamentaux » des groupes des colloïdes et de physique | 354 |
| F. Tests de force de teinture et de pouvoir couvrant au début du XX ^e siècle | 358 |
| G. Présentation du programme microstructural sur les pigments de Kraemer | 360 |
| H. Le test de pouvoir couvrant tel que développé par Kraemer et Schupp entre 1931 et 1933 | 362 |
| I. Publications sur les colloïdes entre 1945 et 2006 | 364 |
| J. Note sur les méthodes de production des nanoparticules et leur éventuelle filiation avec le domaine des colloïdes | 366 |

TABLE DES ILLUSTRATIONS

| | |
|--|-----|
| Figure 1.1 — Publicité paraissant dans un numéro de 1906 du <i>Zeitschrift für Chemie und Industrie der Kolloide</i> | 35 |
| Figure 2.1 — Schéma de l'ultramicroscope utilisé par Zsigmondy | 55 |
| Figure 2.2 — Classification des solutions de Zsigmondy..... | 58 |
| Figure 2.3 — Schéma de l'ultracentrifugeuse de Svedberg de 1924..... | 64 |
| Figure 2.4 — Photographie d'une ultracentrifugeuse utilisée dans le laboratoire de Svedberg d'Uppsala en 1931 | 65 |
| Figure 2.5 — Isotherme d'adsorption de l'azote par des particules de fer telle que mesurée par Benton | 73 |
| Figure 2.6 — Fragments du brouillon utilisé par Emmett pour calculer la surface de particules de noir de carbone, vers 1942 | 74 |
| Table 2.1 — Liste des institutions qui ont acheté un EM-B à la RCA, avant 1944 donc | 85 |
| Figure 2.8 — Article « Le microscope électronique en chimie » de Zworykin, paru dans la revue <i>Electronics</i> en janvier 1943 | 86 |
| Figure 3.2 — Diagramme organisationnel du département de Chimie en 1919..... | 97 |
| Figure 3.3 — Vue aérienne de la Station en 1925 | 97 |
| Figure 3.4 — Diagramme organisationnel de Du Pont en février 1921, avant que la compagnie n'adopte une structure décentralisée | 98 |
| Table 3.1 — Parcours des docteurs en chimie organique embauchés par Du Pont avant 1919 | 100 |
| Table 3.2 — Parcours des docteurs en physico-chimie ou chimie inorganique embauchés par Du Pont avant 1919..... | 101 |
| Figure 3.5 — Diagramme organisationnel du département de Chimie, 1929..... | 115 |
| Figure 3.6 Dépenses du programme de recherche fondamentale par axe, 1927-1933 | 116 |
| Figure 4.1 — Photographie des principaux acteurs de l'instrumentation chez Du Pont, vers 1945..... | 127 |

| | |
|--|-----|
| Figure 4.2 — Photographie d'une des expositions à la Station - août 1948..... | 134 |
| Figure 4.3 — Portrait de Gordon D. Patterson posant à son bureau, non daté | 135 |
| Table 4.1 — Nombre de tâches par instrument et par département de Du Pont, juin à novembre 1947..... | 142 |
| Figure 4.4 — Encart du <i>Smithsonian Institute</i> (Washington D.C.) dédié à Carothers et à son laboratoire chez Du Pont dans les années 1930 | 144 |
| Figure 4.5 — Inauguration par Bolton du laboratoire dédié à Carothers au sein de la Station, en septembre 1946..... | 145 |
| Figure 5.1 — Photographie de Nichols en 1947 | 161 |
| Figure 5.2 — Photographie de l'équipe féminine de baseball de Du Pont, non datée | 161 |
| Figure 5.3 — Portrait de Elmer O. Kraemer | 171 |
| Figure 5.4 — Photographie de l'ultracentrifugeuse de la Station utilisée pour caractériser les dérivés de la cellulose, vers 1937..... | 192 |
| Figure 5.5 — Photographie de William D. Lansing prise en 1931 | 193 |
| Figure 6.1 — « Acheteurs examinant précautionneusement des panneaux de tests avant de donner leur approbation à la livraison du vernis » | 207 |
| Figure 6.2 — Un panneau d'exposition « scientifique » mis en place par la compagnie National Lead Co | 208 |
| Figure 6.3 — Photographie du laboratoire de tests quantitatifs sur les peintures et vernis à la Station, 1926..... | 222 |
| Figure 6.4 — Dispositif pour mesurer les propriétés mécaniques (élongation, élasticité) des vernis du laboratoire d'essais quantitatifs sur les peintures et vernis..... | 223 |
| Figure 6.5 — Photomicrographies de divers échantillons de pigments, issues du rapport de Pfund | 225 |
| Figure 6.6 — Etat du titane en fonction de la durée de l'hydrolyse et de la concentration ... | 230 |
| Figure 7.1 — Extraits du rapport de Nichols et Kenney | 242 |
| Figure 7.2 — Schéma du procédé au sulfate..... | 254 |

| | |
|---|-----|
| Table 7.1 — Paramètres expérimentaux du procédé au sulfate exprimés en fonction de la taille de particule | 261 |
| Figure 7.3 — Représentation de la couche de peinture permettant un traitement mathématique de ses propriétés optiques..... | 266 |
| Figure 7.4 — Extrait du rapport de Bailey de l'été 1934 où il introduit les « master curves » | 267 |
| Figure 7.5 — Portrait d' Edmond D. Bailey photographié en 1929 | 273 |
| Figure 7.6 — Photographie de chimistes impliqués dans les pigments ou les colloïdes organiques, posant devant leur laboratoire à la Station, en 1924..... | 274 |
| Figure 8.2 — « The Kenney- etc. all-wave all-automatic all-recording spectrometer », non-daté | 304 |
| Figure 8.3 — Arthur Webster Kenney posant devant l'appareil de mesure de dispersion des pigments, non-daté | 305 |
| Table A.1 — Chimie générale ou indéterminé (1906-1913) | 335 |
| Table A.2 — Matériaux (caoutchoucs, savon, photographie, cuir, tests généraux...) (1906-1913)..... | 337 |
| Table A.3 — Physiologie, Pharmacie, Bactériologie, Médecine, Biologie (1906-1913) | 339 |
| Table A.4 — Chimie physique, inorganique et électrochimie (1906-1913)..... | 341 |
| Table A.5 — Minéralogie (1906-1913) | 343 |
| Table A.6 — Physique (1906-1913) | 343 |
| Table A.7 — Botanique, agriculture (1906-1913) | 344 |
| Table A.8 — Chimie organique (1906-1913) | 345 |
| Table A.9 — Instituts ou laboratoires définis sur l'étude des colloïdes et leur année d'implantation, 1900-1930 | 346 |
| Figure B.1 — Classification des « dispersoïdes » selon Wolfgang Ostwald, élaborée au cours des années 1900..... | 347 |
| Table B.1 — Classification des colloïdes selon l'état physique (solide, liquide, gaz) de la phase dispersée et de la phase continue | 348 |

| | |
|--|-----|
| Table B.2 — Classification des dispersions, en fonction du nombre d'atomes des particules, selon Staudinger | 348 |
| Table B.3 — Classification des colloïdes organiques de Staudinger reliant la viscosité à la taille et la forme des particules dispersées | 349 |
| Table B.4 — Classification des substances macromoléculaires du naturel au synthétique selon Staudinger..... | 349 |
| Table C.1 — “Apparatus available for physical measurements” | 350 |
| Table C.2 — Compétences spéciales en physique chez Du Pont, vers 1930..... | 351 |
| Table D.1 — Personnel sous la direction de Elmer Kraemer, constituant le groupe des colloïdes entre 1928 et 1938..... | 352 |
| Table D.2 — Personnel sous la direction de Gordon Patterson, constituant le groupe de physique (à partir de 1933)..... | 353 |
| Table E.1 — Projets fondamentaux sur les pigments (dépenses en dollars courants) | 354 |
| Table E.2 — Projets fondamentaux du groupe des colloïdes (dépenses en dollars courants)..... | 355 |
| Table E.3 — Projets fondamentaux du groupe de physique (dépenses en dollars courants). | 356 |
| Table E.4 — Total des dépenses pour les 4 groupes du programme fondamental, entre 1927 et 1944 (en dollars courants) | 357 |
| Figure H.1 — Patterns expérimentaux de contraste utilisés par Kraemer et Schupp pour élaborer leur test de pouvoir couvrant..... | 363 |
| Figure H.2 — Courbes de sensibilité (pourcentage de jugements corrects-contraste) pour les patterns de contraste de Schupp et Kraemer | 363 |
| Figure I.1 — Publications "colloïde(s)" 1945-2005..... | 364 |
| Figure I.2 — Publications "colloïde(s)" 1945-1988..... | 365 |
| Figure I.3 — Publications "colloïde(s)" 1989-2006..... | 365 |

INTRODUCTION

En 1928, la firme chimique Du Pont lance un ambitieux programme de recherche qualifié de « fondamental », un programme structuré sur des disciplines académiques plutôt que sur des lignes de produit. Ce programme est composé de quatre axes – chimie organique, chimie colloïdale, physico-chimie et ingénierie chimique – dont deux en particulier vont s’ancrer durablement dans les pratiques industrielles et vont s’avérer stratégiquement déterminants. D’une part en effet, les groupes de chimie organique et colloïdale collaborent intensément à la compréhension scientifique et à la maîtrise technique des matériaux polymères, ce qui permet la domination industrielle de Du Pont sur les fibres textiles synthétiques. D’autre part le groupe des colloïdes bouleverse l’appréhension des peintures et vernis à travers une focalisation sur les pigments minéraux qui les composent, et concourt ainsi à la domination de Du Pont sur certains pigments comme le lithopone et l’oxyde de titane. D’une manière générale, cet apport scientifique et technique découle d’une connaissance accrue de la structure microscopique de ces matériaux, qui s’inscrit dans une ambition globale de relier systématiquement microstructures et propriétés. Cette nouvelle appréhension des propriétés des substances sur la base de leurs constituants microscopiques devient progressivement un auxiliaire indispensable à la « rationalisation » des procédés et des propriétés des matériaux, ainsi qu’à la stratégie de brevetage de ces produits et procédés.

Cette thèse porte sur la genèse de la chimie colloïdale et étudie en particulier la trajectoire du groupe des colloïdes de Du Pont – son insertion et son écologie au sein de la firme, et son démembrement en 1938. Elle cherche à comprendre l’articulation entre les enjeux scientifiques que ces substances alors considérées comme « colloïdales » soulèvent, et les enjeux techniques, industriels et économiques des matériaux associés. Le concept de « basculement ontologique des matériaux », élaboré récemment par deux historiens de la chimie, est repris comme cadre interprétatif des bouleversements dans lesquels ces programmes de recherches « fondamentaux » se déploient. La période du premier tiers du vingtième siècle est dans cette perspective interprétée comme celle d’un « basculement ontologique des matériaux » dans laquelle chimie organique et chimie colloïdale s’interpénètrent et enfantent une nouvelle vision des substances. Une des manifestations de ce basculement est l’attention nouvelle accordée à la quantification des microstructures – la détermination de la taille des particules et du poids moléculaire des « macromolécules ». Cette nouvelle vision des substances engendre ainsi une instrumentation de pointe visant à quantifier ces microstructures. Du Pont est parmi les premières firmes à s’approprier cette instrumentation et l’expertise scientifique capable de la manipuler, porteuse de cette nouvelle vision des substances. La firme détient d’ailleurs l’exclusivité de l’ultracentrifugeuse – un instrument issu de ce mouvement des colloïdes et concomitant à cette nouvelle vision – pendant une dizaine d’années. Une telle instrumentation, ainsi que l’expertise scientifique

nécessaire à sa manipulation, permettent à Du Pont de jouer un rôle actif dans le nouveau mode de spécification des produits et des propriétés qui se met progressivement en place avec l'essor de la consommation de masse – notamment des fibres textiles et des peintures et vernis. La rationalisation des produits et procédés accompagne l'essor de la grande consommation – et la focalisation accrue sur la figure du « consommateur » – sur les fibres textiles et les peintures et vernis.

Une nouvelle « ontologie des matériaux » comme cadre interprétatif de l'essor de la chimie colloïdale 1900-1930

Ce programme « fondamental » de Du Pont a déjà fait l'objet de plusieurs travaux en histoire des sciences et des techniques, ainsi qu'en histoire des entreprises (*business history*). David Hounshell et John Kenly Smith, dans une volumineuse étude sur le management de la recherche chez Du Pont, consacrent un chapitre à la mise en place de ce programme et en particulier à celle du groupe de chimie organique, porté par le célèbre chimiste américain Wallace Hume Carothers (1896-1937), souvent décrit comme l'inventeur du nylon¹. Un autre historien, Yasu Furukawa, retrace l'histoire scientifique des matériaux polymères en analysant et contrastant les apports respectifs du chimiste allemand Hermann Staudinger (1881-1965) et de Carothers à l'émergence d'une science des polymères. Furukawa détaille également l'implantation de Carothers au sein du programme fondamental de Du Pont². Enfin, Michael Chayut se concentre sur l'apport théorique d'un des principaux chimistes du groupe de chimie organique, Paul J. Flory (1910-1985), à la science des polymères alors qu'il travaille chez Du Pont entre 1934 et 1938³. Ainsi, peut-être parce que Flory a reçu le prix Nobel en 1974 (Carothers, s'il n'était pas décédé prématurément, aurait certainement reçu le prix Nobel), le groupe de chimie organique de Du Pont a capté l'essentiel de l'attention des historiens jusqu'à présent lorsqu'ils ont étudié son programme fondamental, tandis que le groupe des colloïdes n'a été traité que marginalement. Ce déséquilibre entre les différents groupes qui ont constitué ce programme est cependant problématique, dans la mesure où le groupe des colloïdes a joué un rôle considérable dans la compréhension et la mise en œuvre industrielle des matériaux polymères, en particulier pour les fibres textiles synthétiques comme le nylon. Nous essayons en effet de montrer dans cette thèse que la « coopération » intense qui rapproche les groupes de chimie organique et colloïdale est une condition déterminante du succès scientifique et technique de Du Pont sur ces matériaux. Nous essayons également de montrer l'apport considérable de ce groupe dans le succès industriel de Du Pont sur les peintures et vernis, un domaine qui n'a pas encore été visité par ces historiens.

¹ David A. HOUNSHELL & John K. SMITH, Jr., *Science and Corporate Strategy. Du Pont R&D, 1902-1980*, Cambridge, Cambridge University Press, 1988, pp. 223-248 (monographie abrégée H&S par la suite)

² Yasu FURUKAWA, *Inventing Polymer Science. Staudinger, Carothers, and the Emergence of Macromolecular Chemistry*, Philadelphia, University of Pennsylvania Press, 1998, pp. 103-111

³ Michael CHAYUT, « New sites for scientific change : Paul Flory's initiation into polymer chemistry », *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, vol. 23 (1993), pp. 193-218

Comparativement à la chimie organique, la chimie colloïdale a fait l'objet d'une attention réduite dans l'historiographie. Parce que la chimie colloïdale n'a pas réussi à s'inscrire durablement à la hauteur des ambitions de ses ardents promoteurs lors de sa phase de maturité dans le premier tiers du XX^e siècle, l'historien de la chimie John Servos, et d'autres avec lui, considèrent son histoire comme un échec (« *failure* »)⁴. Un échec néanmoins historiographiquement intéressant, car Servos est persuadé qu'une meilleure compréhension de cet épisode de maturité et de déclin contribuerait substantiellement à illuminer celle de l'histoire de la chimie en général. Les historiens qui se sont penchés sur la chimie colloïdale ont effectivement eu tendance à en retracer le développement interne, sans aborder systématiquement son inscription et ses interactions au sein du territoire global de la chimie et des sciences physiques. Le « genre disciplinaire » domine l'historiographie de la chimie colloïdale jusqu'à présent⁵. Les historiens de la biologie ont étudié l'essor de la chimie colloïdale au début du XX^e siècle indirectement, en prenant pour objet l'histoire de la biochimie et de la biologie moléculaire ; d'une manière générale ils ont considéré cet essor comme un égarement, un « âge sombre » de la biologie⁶.

Les travaux récents des historiens de la chimie Ursula Klein et Wolfgang Lefèvre, à travers la notion d'« ontologie historique des matériaux » qu'ils mettent en avant, permettent cependant de deviner des connections plus profondes et insoupçonnées entre l'histoire de la chimie organique et celle de la chimie colloïdale⁷. En effet, ces auteurs interprètent l'émergence de la chimie organique « moderne », dans le premier tiers du 19^e siècle, comme la stabilisation d'une nouvelle « ontologie des matériaux » : alors que de nouveaux modes de classification des substances se diffusent et se substituent aux classifications antérieures, la nouvelle chimie organique se construit en se focalisant sur certaines substances, et en excluant d'autres substances de son territoire. Nous avançons l'idée que la chimie colloïdale s'est dans un premier temps définie sur la base de cette exclusion, c'est-à-dire qu'elle résulte de la nouvelle partition des substances concomitante à l'hégémonie progressive gagnée par la chimie organique. Poursuivant chronologiquement l'étude de Klein et Lefèvre, la notion d'ontologie historique des matériaux permet une nouvelle lecture de la phase de maturité de la

⁴ John W. SERVOS, « History of chemistry », *Osiris*, 2nd Series, Vol. 1, Historical Writing on American Science (1985), pp. 132-146, particulièrement pp. 139-40

⁵ James R. PARTINGTON, *A history of chemistry*, London, Macmillan & Co, 1964, vol. 4, pp. 729-748; Keith J. LAIDLER, *The world of physical-chemistry*, Oxford, Oxford University Press, 1995, pp. 290-312 ; Andrew EDE, *The rise and decline of colloid science in north-America 1900-1935: the neglected dimension*, Burlington (VT), Ashgate, 2007 ; FURUKAWA, *Inventing polymer science*, *op. cit.*, Furukawa est le seul qui analyse systématiquement les rapports entre chimie organique et chimie colloïdale ; Geert SOMSEN, *Wetenschappelijk onderzoek en algemeen belang: De chemie van H.R. Kruyt (1882-1959)* (résumé en anglais), Delft, Delft University Press, 1998 ; John W. SERVOS, *Physical chemistry from Ostwald to Pauling. The making of a science in America*, Princeton (NJ), Princeton University Press, 1990, pp. 299-324

⁶ Marcel FLORKIN, *A history of biochemistry*, New York, Elsevier, 1972 ; Robert E. KOHLER Jr., « The history of biochemistry : a survey », *Journal of the History of Biology*, vol. 8 (1975), pp. 275-318 ; Robert C. OLBY, *The path to the double helix*, London, Macmillan, 1974, pp. 1-59 ; Neil MORGAN, « The strategy of biological research programs: reassessing the 'Dark Age' of biochemistry 1910-1930 », *Annals of Science*, vol. 47 (1990), pp. 139-150, Morgan revient sur cette interprétation d'un « âge sombre » des interactions entre biochimie et chimie colloïdale dans le premier tiers du XX^e siècle.

⁷ Ursula KLEIN et Wolfgang LEFÈVRE, *Materials in Eighteenth Century Science. A Historical Ontology*, Cambridge (MA), MIT Press, 2007

chimie colloïdale au cours du premier tiers du XX^e siècle : au cours de cette période chimie organique et chimie colloïdale s'interpénètrent et font converger leur vision des substances, ce que nous interprétons ici comme la décomposition de l'ontologie des matériaux qui caractérise le 19^e siècle. Cette convergence participe à la stabilisation d'une nouvelle ontologie des matériaux. Dans cette perspective, la coopération entre les groupes de chimie organique et chimie colloïdale de Du Pont est interprétée dans la continuité d'une histoire plus longue où ces deux spécialités de la chimie tour-à-tour se différencient, s'opposent et se complètent lorsqu'elles étudient les mêmes substances.

Instrumentation, ontologie des matériaux et mise en œuvre du lien microstructures - macropropriétés

Les groupes de chimie organique et colloïdale de Du Pont partagent un même postulat, qui va progressivement reconfigurer l'ensemble des pratiques industrielles sur les polymères et les peintures et vernis : les propriétés de ces matériaux dérivent « fondamentalement » de leur état microscopique. Dans cette conception les propriétés mécaniques des matériaux polymères doivent être expliquées par la longueur et l'enchevêtrement des « macromolécules » qui les constituent ; ces propriétés peuvent être maîtrisées et améliorées en agissant sur cet état microscopique. Pour les peintures et vernis, les propriétés optiques dérivent de la taille et de la nature cristalline des pigments minéraux qui les composent ; maîtriser leur état microscopique, c'est maîtriser les propriétés optiques de ces matériaux. Ce postulat a structuré les orientations scientifiques et les pratiques expérimentales du groupe des colloïdes, et dans une moindre mesure du groupe de chimie organique. Mais l'état microscopique des substances reste largement invisible aux instruments de la chimie et de la physique du 19^e siècle. La recherche « fondamentale » de Du Pont a ainsi mobilisé une instrumentation sophistiquée, relativement récente, pour mesurer ces grandeurs microscopiques ; les rayons X et l'ultracentrifugeuse sont les premiers instruments ou techniques appropriés permettant de sonder l'état microscopique des matériaux. Les rayons X sont un ensemble de phénomènes physiques découverts et apprivoisés par les physiciens au tournant du XX^e siècle ; ils sont rapidement instrumentalisés pour sonder la structure microscopique de nombreux matériaux par les chimistes, en particulier chez Du Pont à partir de 1927. L'ultracentrifugeuse est introduite chez Du Pont par le biais du groupe des colloïdes, et constitue un des instruments phares mis au point lors de l'essor de la chimie colloïdale au cours des années 1920. D'une manière générale, la recomposition de l'ontologie des matériaux qui se déploie au début du XX^e siècle s'est accompagnée de l'essor d'une instrumentation sophistiquée ayant vocation à sonder les tréfonds des matériaux et de la matière.

Cette descente dans les tréfonds de la matière dépasse bien évidemment le cadre de la chimie et caractérise l'ensemble des sciences physiques⁸ au tournant du siècle. Les historiens

⁸ « Sciences physiques » est utilisé dans son usage contemporain, c'est-à-dire regroupant les sciences étudiant les systèmes inertes, non-vivants (*Physical science* en anglais). Cette catégorie regroupe donc la physique et la chimie, et s'oppose aux sciences du vivant.

ont longuement documenté ce mouvement de « découverte du micromonde »⁹, de la « naissance de la microphysique »¹⁰, ou de la « physique microcosmique »¹¹. Les micro-phénomènes de laboratoire relatifs à la nouvelle physique des atomes et des électrons génèrent des connaissances théoriques et expérimentales qui deviennent rapidement indispensables aux industries électriques et plus tard électroniques et des télécommunications¹². Mais le tournant vers les micro-phénomènes qui bouleverse la physique au tournant du siècle caractérise également la chimie et les industries chimiques, même si cet aspect a été moins étudié dans l'historiographie¹³. Les historiens ont notamment étudié l'impact de cette ouverture vers les micro-mondes sur la chimie, académique ou industrielle, en se concentrant sur les instruments, qui deviennent les nouveaux médiums indispensables à cette ouverture. Depuis plusieurs décennies en effet, les historiens des sciences ont porté une attention particulière sur les instruments scientifiques¹⁴. Des instruments aussi essentiels à la science du 20^e siècle que le microscope électronique ou l'ultracentrifugeuse ont fait l'objet de travaux historiques approfondis¹⁵. La résonance magnétique nucléaire (RMN) est un cas d'école de l'impact d'un instrument sur une discipline qui lui est initialement exogène ; plus généralement les historiens de la chimie ont largement documenté le bouleversement de cette discipline par les techniques instrumentales physico-chimiques dans le second tiers du XX^e siècle¹⁶.

⁹ John HEILBRON, « La découverte du micromonde », *Les Cahiers de Science et Vie*, n° 52 (août 1999), p. 22 ; cette « découverte des micromondes » a longuement été étudiée par les historiens des sciences. Pour un aperçu synthétique et une présentation de la littérature, voir Mary Jo NYE, *Before Big Science. The pursuit of modern chemistry and physics, 1800-1940*, Cambridge (MA), Harvard University Press, 1996, chapitre 6

¹⁰ Jed Z. BUCHWALD et Andrew WARWICK (eds.), *Histories of the electron : the birth of microphysics*, Cambridge, MIT Press, 2001 ; voir aussi, sur la découverte de l'électron : Benoit LELONG, *Vapeur, foudres et particules. Les pratiques expérimentales de l'ionisation des gaz à Paris et à Cambridge*, Thèse de 3^e cycle, Université Paris VII, 1995 ; même auteur, « Paul Villard, J.-J. Thomson et la composition des rayons cathodiques », *Revue d'Histoire des Sciences*, vol. 50 (1997), pp. 89-130

¹¹ Michael ECKERT et Helmut SCHUBERT, « Microcosmic physics – a scientific revolution », in *Crystals, electrons, transistors. From scholar's study to industrial research*, New-York, American Institute of Physics, 1990, pp. 41-80

¹² ECKERT et SCHUBERT, *Crystals, electrons, transistors, op. cit.* ; voir aussi Lillian HODDESON, « The emergence of basic research in the Bell telephone system, 1875-1915 », *Technology and Culture*, vol. 22, n°3 (1981), pp. 512-544

¹³ Mary Jo Nye donne un aperçu synthétique de ces bouleversements tels qu'ils affectent la chimie, « Atomic and molecular science », in Dominique PESTRE and John KRIGE (eds.), *Science in the twentieth century*, Amsterdam, Harwood, 1997, pp. 565-583

¹⁴ Voir par exemple les numéros spéciaux « Instruments in the history of science », *Osiris*, 2nd Series, vol. 9 (1994) ; et « On scientific instruments », *Studies in History and Philosophy of Science*, vol. 40 (2009) ; voir aussi Terry SHINN et Bernward JOERGES (eds.), *Instrumentation between science, state and industry*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2001

¹⁵ Nicolas RASMUSSEN, *Picture control. The electron microscope and the transformation of biology in America 1940-1960*, Stanford, University of California Press, 1997 ; Boeli ELZEN, « Two ultracentrifuges : a comparative study of the social construction of artefacts », *Social Studies of Science*, vol. 16 (1986), pp. 621-662

¹⁶ Carsten REINHARDT, *Shifting and Rearranging. Physical Methods and the Transformation of Modern Chemistry*, Sagamore Beach: Watson Publishing International, 2006 ; Davis BAIRD, « Analytical chemistry and the 'big' scientific instrumentation revolution », *Annals of Science*, vol. 50 (1993), pp. 267-290 ; Dean S. TARBELL & Ann T. TARBELL, « The instrumental revolution, 1930-1955 », in *Essays on the History of Organic Chemistry in the United States, 1875-1955*. Nashville (TN), Folio Press, 1986, pp. 335-52 ; Yakov M. Rabkin, « Technological innovation in science: the adoption of infrared spectroscopy by chemists », *Isis*, vol. 78 (1987), pp. 31-54 ; Peter J.T. MORIS (ed.), *From classical to modern chemistry : the instrumental revolution*, Cambridge (U.K.), Royal Society of Chemistry & the Science Museum, 2002

Ces historiens se sont attachés à décrire les transformations de la chimie alors qu'elle s'approprie ces nouveaux instruments. C'est-à-dire que d'une manière générale, ces travaux ont eu tendance à considérer ces instruments de pointe comme des sources exogènes à la chimie, qui perturbent radicalement sa trajectoire au point que l'instrumentation en vient à constituer une dimension essentielle de la chimie du XX^e siècle. En se focalisant sur la RMN et les techniques spectroscopiques modernes (ultraviolet, infrarouge, de masse...), Carsten Reinhardt résume ainsi ce processus d'appropriation : « En introduisant des méthodes physiques dans la recherche en chimie et l'analyse routinière, les sciences et techniques chimiques ont subi une transformation majeure »¹⁷. Selon Davis Baird qui s'est restreint à la sous-discipline de la chimie analytique, les contemporains de cette période où les outils de la chimie analytique changent radicalement de nature, entre 1930 et 1950 environ, l'ont vécu comme une « seconde révolution chimique », en référence à la révolution chimique du tournant des XVIII^e-XIX^e siècles, celle des Lavoisier et Dalton. Mais cette révolution serait seulement instrumentale et non théorique comme celle de Lavoisier : « Cette transformation n'a pas comporté de changements dans la théorie », écrit Baird, « elle est plutôt caractérisée par des changements dans la pratique de la chimie analytique »¹⁸.

En étudiant d'autres instruments que la RMN et les techniques spectroscopiques et néanmoins essentiels à cette « seconde révolution chimique », nous voudrions éclairer une autre facette de cette transformation, où les chimistes ont joué un rôle beaucoup plus actif, y compris au niveau théorique. Lorsque l'on considère l'émergence de l'ultramicroscope, de l'ultracentrifugeuse, de la technique dite « BET », ou du microscope électronique, les chimistes ont historiquement joué un rôle primordial non seulement dans l'assimilation, mais dans la manifestation même de ces instruments ou techniques. Ainsi, dans la lecture de cette période à travers le cadre du basculement ontologique des matériaux, les nouveaux instruments ne sont plus considérés comme des éléments exogènes qui perturbent une discipline, mais comme une manifestation des nouvelles questions que les chimistes se posent. Dans cette thèse, l'attention est portée sur les motivations et les espérances qui poussent les chimistes à élaborer ou à améliorer leurs instruments. Ceux-ci en sont venus à placer la question de la nature et de l'organisation microscopique des substances qu'ils manipulent au cœur de leurs problématiques de recherche, un questionnement qui s'est avéré dans certains cas décisif dans le développement des instruments de pointe.

Science pure, recherche fondamentale et « tension créatrice »

Comme nous le verrons, Charles Stine, le principal architecte de l'ambitieux programme « fondamental » de Du Pont, concevait ce programme comme un « changement radical » (« *radical departure* »), ayant vocation à héberger la « science pure » au sein de la compagnie. Dans cette conception, les laboratoires de Du Pont allaient accueillir des chercheurs dont la vocation principale serait la production de nouvelles connaissances, et dont les pratiques et les

¹⁷ REINHARDT, *Shifting and rearranging*, op. cit. p. 1

¹⁸ BAIRD, *Analytical chemistry*, op. cit., p. 267

normes de travail seraient calquées sur celles encadrant la recherche académique. L'opposition de la chimie « pure » à la chimie « appliquée » que Stine met en avant pour définir son programme a une longue histoire. La chimie « pure » s'est construite en opposition à la chimie « appliquée ». À partir de la fin du 18^e siècle en effet, les universités allemandes, puis britanniques, introduisent cette dichotomie afin de légitimer la chimie dans les facultés de philosophie en tant que discipline reconnue¹⁹. A la fin du 19^e siècle, alors que les sociétés de chimie se multiplient, souvent avec une vocation technique et industrielle, la dichotomie pur/appliqué gagne en pouvoir mobilisateur²⁰. Significativement, l'Association Internationale des Sociétés de Chimie a été rebaptisée en 1919 l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée²¹. Initialement Stine n'a pas tracé de démarcation claire entre la « recherche fondamentale » et la « science pure ». Dans cette perspective, l'historien Ronald Kline a interprété l'adoption de nouveaux mots-clés pour statuer sur la recherche – comme « fondamental » dans l'entre-deux guerres et plus tard « *basic* » – comme un moyen d'introduire et de légitimer la « science pure » dans les laboratoires industriels, en évitant la connotation morale (l'absence de recherche de profits) que l'adjectif « pur » draine dans ce cas²². Cette conflation entre le « pur » et le « fondamental », qui n'est pas problématique au-delà de l'artifice rhétorique qu'elle cache, est également reprise par d'autres historiens, notamment Hounshell et Smith lorsqu'ils étudient Du Pont²³, et Lillian Hoddeson avec les Bell Labs²⁴.

Dans l'après-guerre en effet les adjectifs « pur », « fondamental », « *basic* » deviennent en pratique équivalents, en particulier à travers l'élaboration et l'utilisation massive des statistiques nationales et internationales sur la recherche et le développement²⁵. Dans l'entre-deux guerres cependant cette conflation entre ces adjectifs n'est pas encore aboutie. L'étude récente de Sabine Clarke sur les usages de ces catégories de recherche au sein du *Department of Scientific and Industrial Research* britannique montre qu'en pratique le « pur » n'y est pas équivalent au « fondamental », et enjoint les historiens à étudier spécifiquement l'émergence de la catégorie « recherche fondamentale »²⁶. Le programme fondamental de Du Pont, et en particulier le choix des matériaux polymères et des peintures et vernis, est alors particulièrement approprié pour retracer cette catégorie, et analyser l'émergence d'un spectre

¹⁹ Christoph MEINEL, « Reine und angewandte chemie: die entstehung einer neuen wissenschaftskonzeption in der chemie der aufklärung », *Berichte zur Wissenschaftsgeschichte*, vol. 8 (1958), pp. 25-45 ; Gerrylynn K. ROBERTS, « “A plea for pure science”: the ascendancy of academia in the making of the English chemist, 1841-1914 », in David KNIGHT & Helge KRAGH (eds.), *The Making of the Chemist. The Social History of Chemistry in Europe, 1789-1914*, Cambridge (MA), Cambridge University Press, 1998, pp. 107-119

²⁰ Ulrike FELL, *Chimie et industrie en Europe: l'apport des sociétés savantes industrielles du XIXe siècle à nos jours*, Paris, Archives contemporaines, 2001

²¹ Roger FENNELL, *History of IUPAC, 1919-1987*, Oxford, Blackwell Science, 1994

²² Ronald KLINE, « Construing ‘Technology’ as ‘Applied Science’: Public Rhetoric of Scientists and Engineers in the United States, 1880-1945 », *Isis*, vol. 86, n° 2 (1995), pp. 194-221

²³ H&S

²⁴ HODDESON, *The emergence of basic research*, op. cit.

²⁵ Benoît GODIN, « Measuring science: is there “basic research” without statistics? », *Social Science Information*, vol. 42 (2003), pp. 57-90

²⁶ Sabine CLARKE, « Pure science with a practical aim. The meaning of fundamental research in Britain, circa 1916-1950 », *Isis*, vol. 101 (2010), pp. 285-311

« fondamental/appliqué » qui structure les activités de recherche de la compagnie. Comment, alors, se différencie ce nouveau spectre de la dichotomie « pure/appliquée » alors dominante pour catégoriser les activités de recherche ? Nous cherchons à montrer que, pour Du Pont au moins, la dichotomie fondamental/appliqué ne peut pas être assimilée à la dichotomie « pure/appliqué » qui lui pré-existe. La diffusion dans la durée de la recherche « fondamentale » ne peut pas être réduite au jeu des acteurs négociant leur statut et le prestige de leurs recherches, elle traduit des bouleversements plus profonds de la recherche industrielle.

Les historiens ont largement documenté l'émergence de la recherche industrielle. L'institution de laboratoires industriels apparaît significativement au tournant du XX^e siècle et suit de près la réorganisation des grandes entreprises industrielles et l'émergence du « *big business* » au cours de cette période²⁷. Particulièrement en Allemagne, les grandes compagnies comme BASF et Bayer hébergent au cours des années 1870-1880 d'importants laboratoires peuplés de chimistes très qualifiés, et la circulation entre les univers académiques et industriels se fait plus intense²⁸. Les laboratoires industriels se développent également en France²⁹, et plus massivement aux Etats-Unis à partir du début du XX^e siècle³⁰. Ces travaux ont remis en cause une certaine image du laboratoire industriel, celle d'une « usine à invention », dédiée à l'invention et la conception de nouveaux produits. Cette image est très présente dans la culture américaine à partir des années 1930³¹.

En effet, bien que l'une des principales tâches qui ont accompagné la mise en place du premier laboratoire de BASF ait été l'invention de nouveaux colorants, la vocation des laboratoires industriels, dans la durée, ne semble pas avoir été alignée sur le développement d'innovations radicales. Significativement les inventions ou innovations majeures qui permettront la diversification et la croissance de BASF au début du siècle – comme le procédé

²⁷ Pour un aperçu synthétique, voir Jonathan LIEBENAU, « Corporate structure and research and development », in J. LIEBENAU (ed.), *The Challenge of New Technology. Innovation in British Business since 1850*, Aldershot, Gover, 1988, pp. 30-42; voir aussi François CARON, *Les deux révolutions industrielles du 20^{ème} siècle*, Paris, Pocket, 1998

²⁸ Carsten REINHARDT, « An instrument of corporate strategy : the central research laboratory at BASF 1868-1890 », in E. HOMBURG *et al.* (eds.), *The Chemical Industry in Europe, 1850-1914: Industrial Growth, Pollution, and Professionalization*, Kluwer Academic Publishers, 1998, pp. 239-259 ; Ernst HOMBURG, « The emergence of research laboratory in the dyestuffs industry, 1870-1900 », *British Journal for the History of Science*, vol. 25 (1992), pp. 91-111

²⁹ Terry SHINN, « The genesis of French industrial research 1880-1940 », *Social Science Information*, vol. 19 (1980), pp. 607-640 ; Michel LETTE, *Henry Le Chatelier (1850-1936) ou la science appliquée à l'industrie*, Rennes, Presses Universitaires de Rennes, 2004

³⁰ David F. NOBLE, *America by Design. Science, Technology, and the Rise of Corporate Capitalism*, Oxford, Oxford University Press, 1977 ; Leonard S. REICH, *The making of American industrial research. Science and business at GE and Bell, 1876-1926*, Cambridge (MA), Cambridge University Press, 1985°; John K. SMITH, « The scientific tradition in American industrial research », *Technology and Culture*, vol. 31, n°1 (1990), pp. 121-131 ; George WISE, *Willis R. Whitney, General Electric, and the Origins of US Industrial Research*, New York (NY), Columbia University Press, 1985 ; George WISE, « A new role for professional scientists in industry: industrial research at General Electric, 1900-1916 », *Technology and Culture*, vol. 21 (1980), pp. 408-429

³¹ SMITH, *The scientific tradition*, *op. cit.*, p. 122 ; Marcel C. LAFOLETTE, *Making science our own: public images of science in America, 1910-1955*, Chicago (IL), University of Chicago Press, 1990

de synthèse de l'ammoniac à haute pression – ne sont pas issues de son laboratoire central³². Dans l'industrie pharmaceutique au tournant du siècle, le principal rôle de ces laboratoires n'est pas le développement de nouveaux médicaments, mais leur standardisation et le développement de tests assurant le contrôle de leur qualité³³. De même, dans le secteur de la métallurgie, à peu près à la même période : les laboratoires récemment institués de métallographie – imagerie de la microstructure des matériaux utilisés en métallurgie, une des techniques clés de la recherche industrielle sur les alliages et les métaux – n'ont pas été d'une aide importante pour la découverte de nouveaux alliages, mais ont en revanche été essentiels à leur amélioration³⁴. Ainsi, la vocation des laboratoires industriels semble davantage à rechercher dans l'amélioration des produits et des procédés existants plutôt que dans l'invention et la mise au point de nouveaux produits. Il s'agit de diminuer les coûts de production ou d'améliorer la qualité des produits pour conserver les parts de marché et tenir à distance les concurrents. Le dépôt de brevets le plus large possible pour protéger ces produits et procédés semble également plus pertinent pour comprendre la finalité des laboratoires industriels³⁵.

Comment s'inscrit alors le programme « fondamental » de Du Pont au sein de cette tradition pragmatique de l'industrie vis-à-vis de la recherche ? La question est d'autant plus intéressante que ce programme a été repris dans l'historiographie pour argumenter la thèse d'une rupture dans l'histoire des relations entre science et industrie. L'émergence de ce programme chez Du Pont et d'autres similaires parmi les grandes compagnies a été interprétée comme l'importation des pratiques et des normes académiques dans les laboratoires industriels, et comme une nouvelle étape de l'industrie chimique où la science « pure » acquiert une position indispensable, centrale dans le processus d'innovation³⁶. Dans cette interprétation, le nylon, issu de ce programme fondamental, et la figure de Carothers en particulier, acquièrent un statut paradigmatique pour cette nouvelle ère des relations entre science et industrie. Une « tension créatrice » émerge de l'interaction entre un programme disciplinaire académique en gestation – la science des polymères – et des impératifs techniques et industriels sur les fibres textiles³⁷. Commentant ces travaux sur l'émergence de

³² REINHARDT, *An instrument of corporate strategy*, *op. cit.*

³³ Jonathan LIEBENAU, *Medical science and medical industry: the formation of the American pharmaceutical industry*, Londres, MacMillan Press, 1987

³⁴ Cyrus S. SMITH, *A History of Metallography*, Chicago (IL), University of Chicago Press, 1960, p. 244 ; voir aussi, même auteur, « The interaction of science and practice in the history of metallurgy », *Technology & Culture*, 2 (4) (1961), pp. 357-367 ; pour une étude plus récente de l'émergence de la recherche industrielle en métallurgie, voir Nicole CHEZEAU, *De la forge au laboratoire – naissance de la métallurgie physique*, Rennes, Presses Universitaires de Rennes, 2004

³⁵ David F. NOBLE, *America by Design. Science, Technology, and the Rise of Corporate Capitalism*, Oxford, Oxford University Press, 1977, pp. 84-109 ; Jonathan LIEBENAU, « Patents and the chemical industry: tools of business strategy », in LIEBENAU (ed.), *The challenge of new technology*, *op. cit.*, pp. 135-149

³⁶ Cette interprétation est celle en particulier de J. K. SMITH, *The scientific tradition*, *op. cit.*

³⁷ Cette lecture est visible en particulier dans l'article de David HOUNSHELL et John K. SMITH, « Wallace H. Carothers and fundamental research at Du Pont », *Science*, vol. 229 (2 août 1985), pp. 436-442 ; Certains historiens de l'économie ont repris cette lecture pour périodiser l'histoire de la chimie industrielle, et statuer sur une rupture dans les années 1930 : Vivien WALSH, « Invention and innovation in the chemical industry : demand-pull or discovery-push ? », *Research Policy*, vol. 13 (1984), pp. 211-234 ; Basil ACHILLADELIS *et. al.*,

la recherche industrielle aux Etats-Unis, Michael A. Dennis a argumenté que ceux-ci se sont implicitement fondés sur une vision mertonienne des sciences, où le scientifique est mû par la recherche de nouvelles connaissances, et où toute injonction ou tentation à l'« application » de ces connaissances parasite ou dénature ses recherches³⁸. Au début des années 1940 en effet, le sociologue américain Robert K. Merton (1910-2003) a théorisé sur l'existence de normes sociales régulant les communautés scientifiques et assurant la progression des savoirs issus de ces communautés vers le « vrai », ou en tout cas vers le moins faux, dans la tradition poppérienne. Une de ces normes est le « désintéressement », au sens matériel, voire économique ou financier du terme. Une norme, donc, qui s'oppose aux normes de l'entreprise, qui est fondée sur la recherche du profit. Ainsi dans la vision mertonienne des sciences, la figure du scientifique employé par l'industrie est intrinsèquement inconfortable, car soumise à des logiques conflictuelles. Cependant, dans la lignée de Dennis et plus récemment, l'historien Steven Shapin a montré que ce « conflit de valeur entre la science et l'industrie » est bien moins prégnant parmi les managers des laboratoires industriels, voire même pour la plupart des chercheurs individuels dans l'industrie, que pour la sociologie académique dans la lignée de Merton³⁹.

Ces travaux de Shapin et Dennis inclinent à réinterpréter ce programme fondamental de Du Pont, en le réinscrivant dans la continuité des objectifs qui ont concouru à l'émergence de la recherche industrielle. La focalisation sur le groupe des colloïdes de Du Pont nous emmène en effet à relativiser la lecture des programmes « fondamentaux » qui émergent au sein des grandes compagnies à partir des années 1920 comme l'importation des pratiques et des normes académiques dans les laboratoires industriels. L'examen approfondi de son action sur les polymères et les peintures montre que les objectifs de la « recherche fondamentale » de ce groupe s'inscrivent dans la continuité des objectifs de la recherche industrielle : l'amélioration des produits et des procédés, et le renforcement de la portée des brevets. Le groupe des colloïdes a survécu pendant une dizaine d'années chez Du Pont parce qu'il a su se rendre indispensable aux activités industrielles de la compagnie, et non grâce à son excellence scientifique et à la qualité de ses publications. Ce qui ne veut pas dire que le groupe des colloïdes n'ait été mû par aucune forme de « tension créatrice » ou de « conflit de valeur ». Cependant, la dichotomie science pure/industrie n'est peut-être pas la plus adéquate pour comprendre comment ce groupe a évolué au sein de Du Pont. Nous montrerons que le groupe des colloïdes – et d'autres pans de la recherche « fondamentale » de Du Pont avec lui – ont été travaillés par une autre tension : la mise en œuvre du lien entre microstructures – la caractérisation des « macromolécules » pour les polymères et des « particules » pour les peintures – et les propriétés « macroscopiques » – mécaniques, optiques... – de ces matériaux. Ce postulat que les propriétés des matériaux dérivent « fondamentalement » de

« The dynamics of technological innovation : the case of the chemical industry », *Research Policy*, vol. 19 (1990), pp. 1-34

³⁸ Michael A. DENNIS, « Accounting for research. New histories of corporate laboratories and the social history of American science », *Social Studies of Science*, vol. 17 (1987), pp. 479-518

³⁹ Steven SHAPIN, *The scientific life. A moral history of a late modern vocation*, Chicago, The University of Chicago Press, 2008, pp. 110-164, citation p. 114

leur microstructure est, comme nous le verrons, long et laborieux à mettre en œuvre industriellement, c'est-à-dire que l'amélioration des produits et des procédés en mobilisant les savoirs issus de l'instrumentation sophistiquée permettant de sonder les tréfonds des matériaux ne va pas de soi.

Dans une perspective temporelle plus large, l'infléchissement vers les micro-phénomènes qui caractérise les sciences physiques démarre au moment même où s'institutionnalisent les laboratoires industriels, en particulier aux Etats-Unis. L'essor de l'industrie chimique dans l'entre-deux guerres⁴⁰ s'est en partie fondé sur le recouvrement entre ces deux tendances, la recherche industrielle s'appropriant et promouvant ces nouveaux savoirs ainsi que la maîtrise expérimentale des atomes et des molécules. Selon l'historien des techniques Maurice Daumas en effet, l'entre-deux guerres a constitué « une rupture avec tout ce que conservait encore de traditionnel les techniques chimiques ». Un des facteurs essentiels de cette rupture a été « la connaissance de la structure des grandes molécules naturelles et artificielles »⁴¹. Il n'est pas évident que cette plongée dans les micro-mondes qui caractérise les sciences physiques – et en particulier la chimie colloïdale – à partir du début du siècle génère des connaissances qui se recoupent facilement avec les objectifs de la recherche industrielle. Comment concilier des savoirs sur les atomes et les molécules devenant de plus en plus ésotériques avec la tradition pragmatique de l'industrie ? Un des arguments défendus dans cette thèse est que l'expression « recherche fondamentale » émerge et cristallise avec cette tension entre objectifs de la recherche industrielle et évolution des sciences physiques qui produisent des savoirs sur les micro-mondes de plus en plus ésotériques. De ce point de vue, le programme fondamental de Stine ne constitue pas un « changement radical » ; il permet d'approprier de nouveaux moyens pour assurer la continuité des objectifs qui ont historiquement motivé la mise en place des laboratoires industriels.

Plan de la thèse

Cette thèse se structure en trois parties. La première partie est dédiée à la nouvelle ontologie des matériaux qui se déploie dans le premier tiers du 20^e siècle et à l'instrumentation de pointe qui l'accompagne. Le **chapitre 1** introduit cette notion d'ontologie des matériaux, et analyse l'essor de la chimie colloïdale dans le premier tiers du 20^e siècle en se concentrant sur les relations de cette spécialité avec la chimie organique, qui historiquement la précède et qui s'avère déterminante pour son évolution. Le **chapitre 2** présente cet essor comme un nouveau mode d'appréhension des micro-mondes, qui pousse les acteurs de cette décomposition à développer des instruments sophistiqués pour sonder la microstructure des matériaux. Ce chapitre retrace ainsi l'émergence de certains instruments pour déterminer la microstructure des substances colloïdales. L'essor de la chimie colloïdale est ainsi systématiquement analysé

⁴⁰ Voir en particulier Ludwig F. HABER, *The Chemical Industry 1900-1930*, London, Oxford University Press, 1971

⁴¹ Maurice DAUMAS, *Histoire générale des techniques*, Paris, Quadrige/PUF, 1996, tome 4, chapitre 3 « Sciences et techniques chimiques », p. 659

à travers l'élaboration de l'ultramicroscope, de l'ultracentrifugeuse, de la méthode dite « BET » et du microscope électronique.

L'appropriation industrielle de cette nouvelle ontologie des matériaux, ainsi que les instruments associés à cette nouvelle ontologie, constituent les problématiques de la seconde partie. Du Pont est parmi les premières firmes à opérer cette appropriation, qui se déploie dans l'entre-deux guerres parallèlement à son programme de recherche « fondamental ». Le **chapitre 3** retrace l'insertion de la chimie colloïdale dans l'environnement de Du Pont, et la mise en place du programme « fondamental » de Du Pont. Le **chapitre 4** se penche sur l'immixtion de Du Pont avec la physique, et la réification de l'instrumentation par les managers de la compagnie qui accompagne cette immixtion au cours des années 1930. On montre que les acteurs de la chimie colloïdale au sein de Du Pont sont les mêmes qui sont mobilisés par la suite pour assurer cette ouverture sur la physique et l'instrumentation. Puis, le **chapitre 5** se concentre sur le groupe des colloïdes. L'apport du groupe des colloïdes sur les polymères et la mise en œuvre des fibres textiles, ainsi que ses relations avec le groupe de chimie organique, sont abordées dans ce chapitre. La mainmise du groupe sur l'ultracentrifugeuse génère des conflits avec le groupe de physique qui centralise l'instrumentation de pointe. Le démembrement du groupe et son transfert au groupe de physique est également étudié au cours de ce chapitre.

Enfin, la troisième partie se consacre au secteur industriel des peintures et vernis. Le **chapitre 6** retrace le développement de l'industrie des peintures et vernis aux Etats-Unis jusqu'en 1928, alors que le programme « fondamental » de Du Pont est en passe d'être lancé. Ce développement est analysé dans le contexte de l'ère de l'« Ère Progressiste » qui caractérise les États-Unis au tournant du siècle, au sein de laquelle la régulation des produits de l'industrie des peintures et vernis connaît un tournant, et où la figure du « consommateur » acquiert une nouvelle légitimité. La tendance à « rationaliser » les procédés et les spécifications des produits est déjà à l'œuvre alors que le groupe des colloïdes tente de corréler systématiquement microstructures et propriétés pour poursuivre cette rationalisation, ce qui est décrit dans le **chapitre 7**.

Partie I. Nouvelle ontologie des matériaux et instrumentation

Chapitre 1. L'ESSOR DE LA CHIMIE COLLOÏDALE, 1900-1930 : UNE NOUVELLE « ONTOLOGIE DES MATERIAUX » ?

Dans une étude récente de la chimie au XVIII^e siècle¹, les historiens Ursula Klein et Wolfgang Lefèvre prennent pour objet les pratiques d'identification et de classification des nombreuses substances alors étudiées par les chimistes – « chimiste » regroupant également les apothicaires, les métallurgistes, et les artisans travaillant dans les fonderies, les arsenaux, les manufactures de colorants, les distilleries... Un des outils conceptuels dégagés par ces auteurs pour synthétiser ces pratiques est celui d'« ontologie historique des matériaux » (*historical ontology of materials*). A travers cette expression, les auteurs défendent l'idée que les matériaux ont une histoire, que les méthodes expérimentales ou théoriques visant à organiser, classer et identifier les substances – toujours contingentes et soumises à des remaniements – statuent sur l'essence des matériaux associés, sur leur ontologie. Examinant les pratiques et les productions de ces chimistes entre la fin du XVII^e siècle et le premier tiers du XIX^e, et en particulier les nomenclatures et les tableaux de classification, Klein et Lefèvre retracent la mise en place progressive d'un mode d'identification et de classification des substances spécifique au XVIII^e siècle, et sa décomposition dans les premières décennies du XIX^e avec l'émergence de la chimie « organique » et ses nouveaux schèmes classificatoires. Reprenant l'outil conceptuel élaboré pour cette étude, ces auteurs interprètent la stabilisation de ces nouveaux modes de classification, puis leur décomposition, comme des « basculement ontologiques » (*ontological shifts*). La chimie organique du XIX^e siècle, contrainte par une nouvelle « ontologie des matériaux » qui préside à son émergence, s'est en effet approprié l'étude de certaines substances et en a rejeté d'autres. Il est frappant de constater, ce qui dépasse le cadre temporel de l'étude de Klein et Lefèvre, que peu de temps après l'intronisation de ces nouveaux schèmes classificatoires, les substances exclues de ce remaniement de la chimie organique ont été baptisées « colloïdes ». Quelques décennies plus tard, entre 1900 et 1930, l'étude des colloïdes connaît un important rayonnement scientifique et industriel.

Ces concepts d'ontologie historique des matériaux et de basculement ontologique sont repris dans ce chapitre pour proposer une nouvelle lecture de cet essor de la chimie colloïdale. Comme indiqué en introduction à cette thèse, l'historiographie de la chimie colloïdale a eu tendance à isoler ce domaine de son environnement scientifique plus large, c'est-à-dire des autres disciplines des sciences physiques et du vivant. La lecture proposée ici replace les interactions entre la chimie organique et la chimie colloïdale au centre des analyses visant à appréhender son essor dans le premier tiers du XX^e siècle. Ainsi, ce chapitre cherche à défendre deux propositions majeures : 1) l'apparition d'une nouvelle catégorie de substances pour identifier les « colloïdes » est une conséquence de l'hégémonie gagnée par la nouvelle culture de la chimie organique au sein de la chimie ; 2) chimie organique et chimie colloïdale

¹ Ursula KLEIN et Wolfgang LEFÈVRE, *Materials in eighteenth century science. A historical ontology*, Cambridge (MA), MIT Press, 2007

s'interpénètrent au cours du premiers tiers du XX^e siècle, une interpénétration qui s'accompagne de la décomposition de l'ontologie des matériaux qui a concouru à l'émergence de la chimie organique « moderne » au XIX^e siècle. Au cours de cette période, le concept même de « colloïde » fait l'objet d'une redéfinition importante, et de nouveaux modes de classification apparaissent.

Ces deux composantes historiques de la chimie ont chacune développé un mode spécifique d'explication des propriétés des substances. La chimie organique s'est focalisée sur la « molécule » en tant qu'entité fondamentale pour représenter la substance – et interpréter ses propriétés. Comme l'exprime l'historien Yasu Furukawa à propos de la naissance de « l'âge de la chimie organique classique » : « la chimie est devenue avant tout la science de la molécule, la plus petite portion d'une substance capable d'exister indépendamment tout en retenant les propriétés de la substance. [...] Les molécules deviennent considérées comme les entités à partir desquelles toutes les propriétés physiques et chimiques peuvent être déduites »². Par contraste, la chimie colloïdale s'est focalisée sur la « particule » ou la « micelle » comme facteur explicatif essentiel. « Les propriétés des colloïdes », enseigne le chimiste Suédois Theodor Svedberg en 1923, « dépendent dans une large mesure de la taille, de la forme et de la structure des particules »³. 1923 est une année saillante dans l'histoire de la chimie colloïdale. Svedberg (1884-1971), qui a déjà une réputation internationale dans ce domaine, est invité à passer l'année académique à l'université du Wisconsin aux Etats-Unis, pour ses recherches et pour enseigner. Celui-ci est en outre l'invité d'honneur d'un important symposium sur les colloïdes hébergé par l'université, qui se répète depuis annuellement. C'est au cours de cette année que Svedberg développe l'ultracentrifugeuse, un instrument permettant de déterminer la taille des particules colloïdales, et qui lui vaudra le prix Nobel de chimie quelques années plus tard.

Chimie colloïdale et chimie organique ont ainsi enfanté deux modes explicatifs des propriétés des substances en mobilisant les micro-mondes – molécule et particule. L'interpénétration de la chimie organique et de la chimie colloïdale se réalise notamment à travers le chimiste allemand Hermann Staudinger. Nous cherchons en effet à montrer que le concept de « macromolécule » qu'il élabore au cours des années 1920 est un hybride de molécule et de particule, empruntant aux traditions organiques et colloïdales pour rendre compte des propriétés des matériaux « polymères ». Staudinger, cependant, s'est toujours inscrit dans la grande tradition de la chimie organique, et ne s'est jamais considéré comme un chimiste des colloïdes. En détaillant la trajectoire des disciplines et des traditions de recherche dans lesquelles Svedberg et Staudinger s'inscrivent, ce chapitre cherche à comparer les apports respectifs de la chimie organique et de la chimie colloïdale à la compréhension des propriétés des substances sur la base des micro-mondes. De cette manière l'échec censé incarner l'histoire de la chimie colloïdale est relativisé.

² Yasu FURUKAWA, *Inventing Polymer Science. Staudinger, Carothers, and the Emergence of Macromolecular Chemistry*, Philadelphia (PA), University of Pennsylvania Press, 1998, p. 14

³ The SVEDBERG, *Colloid Chemistry*, ACS Series, 2nd édition 1928 [première édition 1924, reprend les cours que Svedberg donne à ses étudiants à l'université de Wisconsin], p. 128

Les colloïdes : des substances définies par exclusion ?

Quels bouleversements accompagnent ou provoquent ce « basculement ontologique » au début du XIX^e siècle, dont nous avançons que la classification qui intronise les colloïdes au milieu du siècle semble être une des conséquences ? Selon Klein et Lefèvre, l'étude des transformations réversibles, particulièrement en métallurgie et dans la synthèse des sels pharmaceutiques, est spécifique au XVIII^e siècle. Ce nouvel apport expérimental sur les transformations réversibles conçoit les réactions comme des cycles de décomposition vers des substances « pures », puis de recombinaison vers la substance originale. Les significations de ce qu'est une « substance chimique pure », ou du concept de « composition », de « composé » et d'« affinité », sont bouleversées. Aussi au cours du XVIII^e siècle, une nouvelle méthode de classification fondée sur la composition des substances vient s'ajouter et cohabiter avec l'ensemble des méthodes de classification plus immédiates et traditionnelles fondées sur la provenance, les propriétés perceptibles et leurs usages. Cette nouvelle attention accordée aux transformations ou réactions réversibles par les chimistes du XVIII^e siècle amène ces derniers à considérer les substances sous un nouvel aspect, celui des « dimensions imperceptibles » selon les termes de Klein et Lefèvre. Cette dimension imperceptible se concentre sur la composition en termes de substances pures et les affinités entre celles-ci qui président aux réactions des composés, et vient s'ajouter à la dimension perceptible des substances, celles des propriétés immédiates – couleur, odeur, consistance, usage pratique... Un va-et-vient permanent entre les dimensions perceptibles et imperceptibles des substances débouche progressivement sur une nouvelle « ontologie des matériaux » qui structure de manière cohérente la chimie des plantes et des végétaux, des excréments et extraits d'origine animale, des alliages, des colorants, des sels pharmaceutiques...

Cette dimension imperceptible des substances vise à rendre compte et à exploiter les connaissances sur l'invisible : l'analyse chimique permet de déceler la présence d'espèces chimiques qui constituent la substance mais qui ne sont pas directement perceptibles. Cette dimension imperceptible n'a rien à voir avec les théories atomiques et corpusculaires qui connaissent un renouveau avec les philosophies mécaniques et corpusculaires à partir du XVII^e siècle. Même si ces théories ont fait quelques incursions parmi les chimistes, le vocabulaire alors largement répandu parmi les savants et la philosophie naturelle de l'époque pour décrire les micro-mondes – atome, molécule, corpuscule – a joué un rôle marginal dans la compréhension de cette dimension imperceptible des substances et d'une manière générale dans l'élaboration de cette nouvelle ontologie des matériaux. « Considérant la façon dont les chimistes du XVIII^e siècle ont identifié et classé les substances et ont écrit leur histoire, les théories atomiques et corpusculaires n'ont été d'aucune aide »⁴. Cette situation change radicalement au cours de la première moitié du XIX^e siècle et l'hégémonie progressive des nouvelles cultures théoriques et expérimentales de la chimie organique au sein de la chimie. La théorie atomique de la matière devient centrale dans la représentation que les chimistes se font des substances et de leurs modes de classification. Le rôle essentiel de la stœchiométrie et

⁴ KLEIN & LEFÈVRE, *Materials, op. cit.* p. 62

des formules chimiques pour représenter les réactions et orienter les pratiques des chimistes provoque « la désintégration d'une culture de la chimie des plantes et des animaux pluricentrique [...] et la formation d'une culture expérimentale de la chimie du carbone synthétique. [...] La signification de 'organique' et la classification des substances organiques avant et après cette transformation sont incommensurables »⁵.

« Organique » est alors employé significativement depuis les dernières décennies du XVIII^e siècle pour désigner les substances issues des êtres « organisés », c'est-à-dire les végétaux et les animaux. Cependant, les chimistes Français Jean-Baptiste Dumas (1800-1884) et Polydore Boullay (1806-1835) proposent en 1828 une refonte de la classification des espèces chimiques organiques se fondant sur la détermination qualitative et quantitative de leur composition en termes d'éléments chimiques. Cette proposition s'inscrit dans une évolution plus large que connaît alors la chimie, accordant à la stœchiométrie une place prépondérante dans l'étude des réactions chimiques et l'identification des substances. La stœchiométrie – étymologiquement la « mesure des éléments » – est la détermination des proportions relatives des éléments chimiques qui entrent en jeu dans les réactions ou dans la composition des substances. Aussi ce qui provoque la « désintégration de cette culture des plantes pluricentrique », et de l'ontologie des matériaux associée, est la diffusion rapide des impératifs stœchiométriques. Ces impératifs s'accompagnent de l'assimilation des formules chimiques et de la loi des proportions définies – à chaque substance est associée une « molécule » composée d'une proportion fixe d'un certain nombre des « éléments » chimiques – qui lui sont concomitants. L'utilisation des formules est à la fois une manifestation et un élément causal de ce « basculement ontologique » : la représentation de la réaction par le biais de formules chimiques permet de s'assurer de la pureté stœchiométrique de la réaction ; cette précision stœchiométrique est alors mobilisée pour identifier et classer les substances. Les individus chimiques de la chimie du carbone subissent le crible de la stœchiométrie et deviennent représentés par des formules et des « poids moléculaires ».

Que faire, alors, des substances qui ne se prêtent pas au jeu de la stœchiométrie et qui ne se laissent pas facilement représenter par des molécules aux proportions définies ? C'est le cas des alliages, et l'historien de la métallurgie Cyril Smith retrace ce divorce entre métallurgie et chimie qui s'accomplit au début du XIX^e siècle. Selon cet auteur, les lois de proportion définie et de combinaison simple des composés chimiques, qui accompagnent l'introduction de l'atomisme en chimie et qui fondent les pratiques de la nouvelle chimie organique, « se sont révélées, du point de vue du métallurgiste, d'application temporairement malheureuse »⁶. Ce constat sur l'histoire de la métallurgie au XIX^e siècle est consistant, du reste, avec le cadre

⁵ Ursula KLEIN, *Experiments, models, paper tools. Cultures of organic chemistry in the nineteenth century*, Stanford (CA), Stanford University Press, 2003, pp. 4-5 ; voir aussi KLEIN & LEFÈVRE, *op. cit.*, chapitre 16 : « A novel mode of classifying organic substances and an ontological shift around 1830 » ; et Mary Jo NYE, *From chemical philosophy to theoretical chemistry. Dynamics of matter and dynamics of disciplines*, Berkeley (CA), University of California Press, 1993, pp. 65-102 ; Sacha TOMIC, *Aux origines de la chimie organique. Méthodes et pratiques des pharmaciens et des chimistes (1785-1835)*, Rennes, Presses Universitaires de Rennes, 2010

⁶ Cyril S. SMITH, « The interaction of science and practice in the history of metallurgy », *Technology & Culture*, vol. 2 (1961), pp. 357-367, citation p. 362 ; voir aussi, du même auteur, *A history of metallography*, Chicago (IL), University of Chicago Press, 1960

interprétatif global que proposent Klein et Lefèvre. En effet, l'ontologie des matériaux qui se stabilise au XVIII^e siècle se construit aussi sur l'étude des métaux et des alliages, alors que le basculement ontologique du premier tiers du XIX^e siècle s'accompagne du désintérêt des chimistes à l'égard de ces substances. D'autres substances que les alliages ne se prêtent pas aisément au jeu de la loi des proportions définies, mais ont pourtant été au cœur de l'élaboration des modes de classification antérieurs. C'est le cas de nombreux extraits animaux et végétaux comme l'amidon, le caoutchouc, les résines, les graisses... Bien que leur analyse chimique établisse la présence de l'élément carbone en leur sein, la nouvelle chimie organique, qui s'est définie sur l'étude des composés stœchiométriques au carbone, a exclu ces substances de son territoire :

En conséquence de nouveau mode d'individuation et d'identification, de nombreux matériaux issus des plantes, emblématiques de la chimie des plantes du XVIII^e siècle, ne constituent plus des objets scientifiques de la nouvelle chimie du carbone. Non seulement les fibres de bois (le ligneux), les fibres (la fibrine), et l'amidon de maïs, explicitement mentionnés par Jean-Baptiste Dumas, disparaissent de la scène de la chimie du carbone, mais également les résines et les gommes sont à présent, en tant que composés non-stœchiométriques, exclus.⁷

En 1861, un chimiste de Londres propose justement d'attribuer à ces substances exclues l'adjectif « colloïdal ». Le chimiste d'origine écossaise Thomas Graham (1805-1869), fondateur et premier président de la *Chemical Society* de Londres, propose cette nouvelle classification des substances en se fondant sur ses travaux de diffusion des gaz et des substances en solution à travers des membranes de parchemin semi-perméables. Graham n'a pas consciemment considéré cette classification comme une prise en compte des substances exclues par la nouvelle culture de la chimie organique. Cette interprétation que nous proposons ici est une reconstruction a posteriori, une extrapolation issue du cadre interprétatif de Klein et Lefèvre. Titulaire d'un diplôme de chimie de l'université de Glasgow en 1826, la carrière de Graham s'inscrit par la suite résolument dans la capitale londonienne et prend forme alors que la chimie est en train de se reconfigurer autour des nouveaux présupposés de la chimie organique. En 1849 il présente devant la Société de Chimie de Londres ses travaux sur la diffusion des liquides et remarque que certaines substances comme la gomme ou l'amidon diffusent très lentement en solution, à l'inverse par exemple des acides phosphoriques qui diffusent très rapidement. Il propose de considérer les propriétés de diffusion des substances comme une caractéristique permettant de les discriminer⁸.

A la fin des années 1850, il reprend ses expériences de diffusion avec une ambition plus systématique. Il observe la diffusion de nombreuses substances en solution dans un solvant et à travers des membranes de parchemin (« *French parchment membranes* »), et établit une partition parmi ces substances en deux catégories, les « fixes » et les « volatiles ». Ce faisant,

⁷ KLEIN & LEFEVRE, *op cit.*, pp. 289-90

⁸ Ces travaux sont publiés en 1850 et 1851, « On the diffusion of liquids », *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 1850, pp. 1-46, pp. 805-36 et 1851, pp. 483-94

il introduit la dichotomie « colloïde/cristalloïde » comme nouveau cadre de classification des substances :

Ainsi l'hydrate de potasse possède le double de la rapidité de diffusion du sulfate de potasse, et le sulfate de potasse à son tour possède le double de celle du sucre, de l'alcool et du sulfate de magnésium. Mais les substances [précédemment] nommées appartiennent toutes, du point de vue de la diffusion, à la classe "volatile". La classe comparativement "fixe", du point de vue de la diffusion, est représentée par un ordre différent des substances chimiques, marquée par l'absence du pouvoir de cristalliser, qui est long à l'extrême. Parmi ces dernières [il y a] l'acide de silice hydraté, l'alumine hydratée et d'autres peroxydes métalliques, quand ils existent sous forme soluble ; [il y a aussi] l'amidon, la dextrine, et les gommés, le caramel, les tanins, l'albumine, la gélatine et diverses matières extraites d'animaux. [...] Puisque la gélatine semble appartenir à ce type, nous proposons de désigner les substances de cette classe comme les *colloïdes*, et de considérer leur forme spécifique d'agrégation comme la *condition colloïdale de la matière*. En opposition à cette condition colloïdale est la condition cristalline. Les substances manifestant cette dernière forme seront classées comme les *cristalloïdes*. La distinction se trouve certainement dans la constitution moléculaire intime.⁹

Plus loin, Graham affirme que les colloïdes et les cristalloïdes constituent « des mondes différents de la matière ». Cette dichotomie colloïde/cristalloïde comme nouveau critère de classification va s'avérer influencer durablement sur le vocabulaire et les pratiques des chimistes. Les dénominations colloïdes et cristalloïdes font sens dans le cadre de l'évolution globale dans lequel la chimie s'inscrit et reflètent cette nouvelle « ontologie des matériaux » qui est en train de se substituer à celle élaborée au XVIII^e siècle. Si « colloïde » n'apparaît pas problématique dans sa signification (étymologiquement il provient de « colle » et décrit bien les substances comme les résines, les gommés, la gélatine...), la pertinence de « cristalloïde » pour définir, par négation, cette nouvelle classe de la matière, n'a pas encore été saisie ou soulignée dans l'historiographie. En effet, ce choix de vocabulaire pour établir cette dichotomie dérive de la représentation de la substance au sein de la nouvelle tradition de la chimie organique comme une collection de « molécules » simples, infinitésimales et identiques entre elles pour une même substance. Les cristaux constituent alors la forme purifiée de la substance, assemblage solide de ses « molécules » identiques. Cette nouvelle culture de la chimie organique assimile effectivement les postulats de la cristallographie qui se refonde théoriquement à partir de la fin du XVIII^e siècle sur la théorie moléculaire. Le mode de classification des substances organiques élaboré par Auguste Laurent (1807-1853), qui selon Klein et Lefèvre est un pionnier de la nouvelle approche classificatoire à l'œuvre dans la chimie organique au cours des années 1830, découle de son appropriation et de sa compréhension de cette cristallographie moléculaire¹⁰. De fait, la cristallisation ou la

⁹ Thomas GRAHAM, « Liquid diffusion applied to analysis », *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 151 (1861), pp.183-224, citation p. 183-4, italiques dans l'original

¹⁰ Satish C. KAPOOR, « The origins of Laurent's organic classification », *Isis*, vol. 60 (1969), pp.477-527. La représentation de cristaux comme agrégat de « molécules » émerge à peu près en même temps que l'atomisme s'implante fermement en chimie à partir du début du XIX^e siècle : voir Seymour H. MAUSKOPF, « Crystals and

cristallisation fractionnée deviennent, à l'instar de la distillation, des techniques expérimentales prépondérantes au sein de la chimie organique pour parvenir à isoler les composés traqués, et à purifier les substances.

Aussi, le terme de « cristalloïde » choisit par Graham fait sens. Comme mentionné dans la citation de son travail publié en 1861, ce dernier remarque que les substances qui diffusent rapidement et traversent les parchemins sont facilement cristallisables ; la théorie moléculaire des substances fournit une explication simple de ce phénomène : lorsque le cristal est dissous, ses « molécules » sont libres de migrer au sein du solvant et de traverser la membrane à travers ses pores. A l'inverse, les « colloïdes » ne peuvent pas être cristallisés, ce qui rend le concept de « molécule » impraticable. Dans l'immédiat, Graham lui préfère celui de « masse »¹¹. Le concept de « micelle », ou souvent également, celui de « particule », sont par la suite préférés pour décrire la nature microscopique de ces colloïdes. Significativement, « micelle » n'est pas introduit par un chimiste organicien, mais par un botaniste Suisse, Carl von Nägeli (1817-1891) au cours des années 1870 en étudiant des extraits celluloses¹². La chimie organique s'est en effet construite en s'éloignant des extraits végétaux et animaux, dans un effort d'abstraction visant à réduire les substances à des formules moléculaires et à augmenter le nombre d'espèces synthétisées. Dans la nouvelle division du travail qui en découle entre sciences physiques et sciences naturelles, la botanique et la physiologie ont pris le relais de la chimie pour l'étude des substances moins purifiées, des extraits naturels plus « bruts ». Les schèmes explicatifs des propriétés des substances se reconfigurent sur cette dichotomie colloïdes/cristalloïdes : Nägeli interprète la différence de comportement de ces extraits celluloses en termes d'orientation et d'ordonnement des micelles constituant ces extraits ; par contraste, un chimiste organicien aura tendance à attribuer les propriétés des substances qu'il étudie à la nature et à la structure de ses molécules (cf. ci-dessous). Il y a en gestation, dans les dernières décennies du XIX^e siècle, deux schèmes explicatifs distincts pour appréhender le comportement des colloïdes et des cristalloïdes. Cette différence en gestation va gagner en maturité et en intensité au cours du premier tiers du XX^e siècle, et s'incarner dans deux « traditions » disciplinaires distinctes.

Compounds : Molecular Structure and Composition in Nineteenth-Century French Science », *Transactions of the American Philosophical Society*, vol. 66, n°3 (1976), pp. 1-82

¹¹ Graham explique ainsi « moléculairement » la différence de diffusion entre les colloïdes et les cristalloïdes : « The sized paper has no power to act as a filter. It is mechanically impenetrable, and denies a passage to the mixed fluid as a whole. Molecules only permeate this septum, not masses. The molecules also are moved by the force of diffusion. [...] Sugar, like all other crystalloids, can separate water, molecule after molecule, from any hydrated colloid, such as starch. The sugar thus obtains the liquid medium required for diffusion, and makes its way through the gelatinous septum. Gum, on the other hand, possessing as a colloid an affinity for water of the most feeble description, is unable to separate that liquid from the gelatinous starch, and so fails to open the door for its passage outwards by diffusion » in *Liquid diffusion applied to analysis*, *op. cit.*, p. 185

¹² James R. PARTINGTON, *A history of chemistry*, London, Macmillan & Co, 1964, vol. 4, pp. 738-9

Chimie organique et chimie colloïdale 1900-1930 – Dynamique des matériaux, dynamiques disciplinaires

Maturité et redéfinition du territoire des colloïdes

Au cours des trois premières décennies du XX^e siècle, « colloïdes » gagne en pouvoir mobilisateur et en attractivité. Alors que la visibilité du terme est jusqu'au début du siècle réduite à quelques articles dispersés dans des revues savantes de chimie générale, de botanique et de biologie, dans les trois décennies suivantes des revues spécialisées sont éditées, des sociétés savantes ou des sections de sociétés de chimie dédiées à l'étude des colloïdes sont instituées, trois prix Nobels sont attribués à ce domaine. Cette mobilisation autour des colloïdes démarre en Allemagne, nation par ailleurs dominante en Europe (c'est-à-dire également au niveau mondial) pour l'ensemble des secteurs de la chimie académique et industrielle au tournant du siècle. Le *Zeitschrift für Chemie und Industrie der Kolloide* (Journal pour la chimie et l'industrie des colloïdes, qui sera rebaptisé plus tard *Kolloid Zeitschrift*, Journal des colloïdes) est lancé en 1906. La *Kolloid Gesellschaft*, société allemande des colloïdes, est instituée en 1922, et comporte environ 250 membres à ses débuts¹³. Le premier Prix Nobel de chimie colloïdale est attribué à un allemand, Richard Zsigmondy (cf. chapitre 2). Aux Etats-Unis, l'ascension de la chimie colloïdale démarre véritablement au sortir de la Première Guerre mondiale¹⁴. La réputée Société américaine de chimie (*American Chemical Society*) institue une division de chimie colloïdale en 1926. Les journaux spécifiquement dédiés aux colloïdes seront mis en place plus tardivement qu'en Allemagne, mais dès le début du siècle, le *Journal of Physical Chemistry* accueille de nombreux articles sur le sujet. Les sociétés d'encouragement pour la science comme la *British Association for the Advancement of Science* (BAAS) ou le *National Research Council* (NRC), un des organes américains de politique scientifique, militent au sortir de la Grande Guerre pour l'étude des colloïdes. En France le phénomène semble plus tardif et plus limité, même si la *Revue Générale des Colloïdes* est éditée entre 1923 et 1930. Les contributions françaises au *Kolloid Zeitschrift* sont très limitées (cf. annexe A).

Au cours de ce processus de croissance, la dichotomie colloïde/cristalloïde introduite par Graham devient partition disciplinaire au sein de la chimie. Les praticiens se revendiquant de cette étiquette ne conçoivent plus leur action seulement comme l'étude de certaines substances spécifiques, mais comme la mise en œuvre d'un programme disciplinaire. La chimie colloïdale devient une spécialité de la chimie. Bien que l'expression « chimie colloïdale » soit alors très usitée, celle-ci déforme la trajectoire historique empruntée par cette importante mobilisation autour des colloïdes, qui ne s'est pas restreinte au territoire de la chimie. Le domaine d'étude des colloïdes s'est déployé à travers une dynamique transversale aux sciences physiques et aux sciences du vivant. Dans l'immédiat après-guerre, la Société de

¹³ Wolfgang OSTWALD, « Die gründung und erste hauptversammlung der Kolloid-Gesellschaft », *Kolloid-Zeitschrift*, vol. 31 (1922), p. 15

¹⁴ Andrew EDE, *The rise and decline of colloid science in north-America 1900-1935: the neglected dimension*, Burlington (VT), Ashgate, 2007, chapitre 3

Physique de Londres et la Société Faraday se saisissent de ce domaine des colloïdes et, significativement, intitulent leur rapport « La physique et la chimie des colloïdes et leur importance pour les questions industrielles »¹⁵. Jusqu'au début de la Seconde Guerre mondiale, on peut rencontrer des chercheurs qui se décrivent comme des « *colloid physicists* », des physiciens des colloïdes.

Les liens historiques et épistémologiques entre la « chimie colloïdale » et les sciences du vivant sont encore plus ténus que ceux tissés avec la physique. Par exemple, près d'un quart des contributions au *Zeitschrift für Chemie und Industrie der Kolloide* proviennent de laboratoires de physiologie, de pharmacologie et de biologie (cf. annexe A). La chimie colloïdale a joué un rôle essentiel dans l'avènement de la biochimie. Mais cette période pendant laquelle l'étude des colloïdes rassemble et fédère les sciences chimiques et les sciences du vivant a souvent été appréhendée par les historiens de la biologie comme un égarement dans l'histoire des sciences du vivant, une sorte d'« âge sombre » précédant l'apparition de la triomphante biologie moléculaire. L'historien de la biologie Neil Morgan interprète, à rebours de l'historiographie dominante, ce mouvement des colloïdes dans la période de l'entre-deux guerres comme un « pont conceptuel » dont la portée et les acquis sont essentiels à l'avènement de la biologie moléculaire¹⁶. Si l'on garde en tête que la « chimie colloïdale » dépasse en réalité les frontières de la chimie, cette expression peut être utilisée comme raccourci pratique sans trop affecter la lecture des événements.

Mais si cette nouvelle chimie colloïdale s'est construite en tissant des liens avec la biologie et la physique, elle s'est avant tout construite en se démarquant de la culture de la chimie organique. Celle-ci, au moment où la chimie colloïdale prend son essor, est vieille de près de trois quarts de siècle et reste hégémonique au sein de la chimie – académique et industrielle – où les chaires universitaires et les positions industrielles les plus prestigieuses lui sont acquises. Aussi, la chimie colloïdale a trouvé un allié puissant dans la physico-chimie, dont l'émergence résulte également de la prise de conscience des limites de la chimie organique. La physico-chimie aborde sa phase de « disciplinarisation » un peu plus tôt que la chimie colloïdale, à partir des années 1880 en Allemagne, et se diffuse par la suite rapidement vers le reste de l'Europe et les Etats-Unis¹⁷. La chimie colloïdale n'atteindra jamais la stabilité institutionnelle de la physico-chimie et ne jouira pas du même prestige scientifique. Elle gagnera le peu d'assise institutionnelle qu'elle est parvenue à atteindre en pénétrant les chaires de physico-chimie. Au tournant du siècle, alors que les revues spécialisée de chimie colloïdale n'ont pas encore vu le jour, les articles associés sont souvent publiés dans les

¹⁵ Faraday Society, *Physics and chemistry of colloids and their bearing on industrial questions*, London, HMSO, 1921

¹⁶ Neil MORGAN, « The Strategy of Biological Research Programs: Reassessing the 'Dark Age' of Biochemistry 1910-1930 », *Annals of Science*, vol. 47 (1990), pp. 139-150 ; Morgan critique ici FLORKIN, *A history of biochemistry*, op. cit. et KOHLER, *The history of biochemistry : a survey*, op. cit. (cf. historiographie présentée en introduction à la thèse)

¹⁷ Voir Jeffrey A. JOHNSON, *The Kaiser's chemists : science and modernization in imperial Germany*, Chapel Hill, London : University of North Carolina Press, 1990 ; voir aussi NYE, *Chemical philosophy*, op. cit. ; John W. SERVOS, *Physical Chemistry from Ostwald to Pauling. The making of a science in America*, Princeton, Princeton University Press, 1990 ; LAIDLER, *The world of physical-chemistry*, op. cit.

revues de physico-chimie. De ce fait, et bien que les travaux qui préludent aux colloïdes précèdent la phase de disciplinarisation de la physico-chimie, cette dernière est souvent considérée comme la discipline « mère » de la chimie colloïdale. Si, cependant, l'alliance historique avec la physico-chimie a conditionné l'essor de la chimie colloïdale, ce serait une erreur d'en déduire que cette dernière s'est construite dans un état de dépendance épistémologique vis-à-vis de celle-là. La chimie colloïdale a en effet enfanté une vision des substances et des matériaux (oserons-nous dire une *ontologie* ?) originale vis-à-vis de celle issue de la chimie organique, dont la genèse et la trajectoire sont impossibles à comprendre si l'on se restreint à l'histoire de la physico-chimie. Au cours des tentatives de disciplinarisation de la chimie colloïdale, la perception de ce qu'est une substance colloïdale, les critères de distinction entre les colloïdes et les cristoïdes et les modes de classification vont être redéfinis sur une base radicalement différente de celle proposée par Graham à peu près un demi-siècle plus tôt.

Est-ce un hasard si le chimiste allemand Wolfgang Ostwald, sans doute un des acteurs qui ont le plus milité pour l'autonomie de la chimie colloïdale vis-à-vis des autres branches de la chimie, est également parmi ceux qui ont le plus contribué à l'émergence de cette vision des substances ? Effectivement, Ostwald (1883-1943) reprend rapidement l'édition scientifique du *Kolloid Zeitschrift* en 1907 et institue la *Kolloid Gesellschaft* en 1922. Il étudie d'abord la zoologie à Leipzig avant de partir étudier la physiologie aux Etats-Unis en 1904, dans le laboratoire du biologiste Jacques Loeb (1859-1924) à Berkeley, en Californie. De retour en Allemagne en 1906, Ostwald rejoint l'institut universitaire de physico-chimie à Leipzig, fondé en 1897 et dirigé depuis par son père Wilhelm Ostwald. Il faut situer ce séjour américain dans le contexte alors fortement asymétrique des échanges universitaires et scientifiques entre l'Allemagne et les Etats-Unis au début du siècle. L'Allemagne est nettement dominante, et de nombreux jeunes chimistes américains viennent compléter leurs études en Allemagne, en particulier en chimie organique, et, en nombre plus limité, en physico-chimie ; souvent ces jeunes chimistes ambitieux obtiennent un doctorat en Allemagne ou en Europe avant de poursuivre leur carrière aux Etats-Unis. Si Ostwald avait choisi la chimie organique comme domaine de prédilection, comme la plupart des jeunes scientifiques allemands de sa génération attirés par la chimie, ce dernier serait bien évidemment resté en Allemagne. Avec un père comme Wilhelm Ostwald (1853-1932) cependant, un des fondateurs de la discipline physico-chimie, et qui de ce fait est resté prompt à critiquer la chimie organique, le milieu familial d'Ostwald (fils) ne l'encourage pas à se diriger vers une carrière en chimie organique.

Lors de son séjour américain auprès d'un des plus grands biologistes de l'époque (Loeb), Ostwald s'est forgé la conviction que les propriétés remarquables du vivant sont à explorer et à expliquer à travers l'étude des colloïdes. Loeb lui-même, et une grande majorité des biologistes avec lui, considéraient que les entités essentielles en biologie, comme la cellule et les protéines, sont des substances colloïdales. Celui-ci toutefois partage jusqu'à une certaine limite l'enthousiasme d'Ostwald envers les colloïdes, dont ce dernier conçoit l'étude comme la clé des progrès en biologie. De retour à Leipzig, et dans un environnement qui n'est

plus celui de la biologie mais celui de la physico-chimie, Ostwald s'attache à faire de la chimie colloïdale une spécialité à part entière, transversale à la chimie, la physique et la biologie. Il reprend en juillet 1907 la direction du *Zeitschrift für Chemie und Industrie der Kolloide*, édité depuis 1906 par l'industriel du caoutchouc Rudolf Ditmar. Ostwald donne ainsi une plate-forme éditoriale à la chimie colloïdale indépendante de celle de la physico-chimie, de la biologie ou de l'industrie des caoutchoucs. En 1909 ; il publie un manuel de chimie colloïdale, *Grundriß der Kolloidchemie* (Introduction à la chimie colloïdale), sans doute le premier ou parmi les premiers de son genre. Il repart en 1913 aux Etats-Unis pour donner une série de conférences dans les grandes universités, où il exhorte ses interlocuteurs à considérer la chimie colloïdale comme « une division indépendante des sciences physico-chimiques »¹⁸.

Cette dynamique d'autonomisation à laquelle œuvre Ostwald croise et se nourrit, bien évidemment, d'une « ontologie des matériaux » qui justifie cette autonomie de la chimie colloïdale vis-à-vis de son environnement scientifique, et qu'il expose dans ses publications. Aussi quand il affirme, dans sa monographie publiée en 1909, que « l'état colloïdal est indépendant de la composition chimique »¹⁹, Ostwald exprime une démarcation radicale vis-à-vis des présupposés qui ont fondé les cultures de la chimie du XIXe siècle, et singulièrement celle de la chimie organique. Pour ces cultures, considérer que l'« état » des substances est indépendant de leur composition chimique est une hérésie. La rouille est d'une teinte orangée-rouge parce qu'elle contient des oxydes de fer, tandis que le sulfate de cuivre hydraté est bleu du fait de la présence du cuivre sous forme ionique. En chimie organique, la notion de « composition chimique » s'accompagne également des informations structurales sur les molécules des composés, c'est-à-dire l'organisation dans l'espace des atomes qui les constituent. Pour les colorants organiques par exemple, la chimie académique va s'attacher à déterminer leur structure moléculaire, et à attribuer à un colorant une molécule « chromophore » déterminée. Le colorant est isomorphe à la molécule constitutive de sa composition chimique.

L'indépendance affirmée par Ostwald entre état colloïdal et composition chimique se défend néanmoins dans le cadre de sa théorie générale sur les colloïdes ; l'« état » colloïdal y a en effet une autre signification que celle de propriété, de « dimension perceptible » au sens de Klein et Lefèvre. Alors que Graham concevait les colloïdes comme une classe de substances, Ostwald y voit un état particulier de la matière, auquel n'importe quelle substance peut potentiellement être amenée. Il n'y a pas, dans cette acception, de différence de nature entre les colloïdes et les cristalloïdes, mais une différence d'état ; tout colloïde peut, théoriquement, être amené dans l'état cristalloïde, et inversement. L'idée que les colloïdes constituent un état plutôt qu'une classe de substances permet l'affirmation de l'autonomie et de la cohérence du domaine associé. En effet, ce domaine rassemble des substances

¹⁸ Cité dans FURUKAWA, *Inventing polymer science, op. cit.* p. 27 ; les éléments bibliographiques d'Ostwald sont aussi tirés de EDE, *Rise and decline, op. cit.* pp. 20-22 ; et SERVOS, *Physical-Chemistry, op. cit.*, pp. 300-303

¹⁹ La traduction anglaise du *Grundriß der Kolloidchemie* par Martin H. Fischer a été consultée : Wolfgang OSTWALD, *A handbook of colloid-chemistry. The recognition of colloids, the theory of colloids, and their general physico-chemical properties*, Philadelphia (PA), P. Blakiston's Son & Co., 1919 (2^{nde} édition), p. 2

organiques comme l'albumine et inorganiques comme certains oxydes métalliques. Ce qui apparaît à première vue comme une collection hétéroclite de substances se trouve être relié, dans la théorie d'Ostwald, par un état commun. Cette perception des colloïdes non comme des substances mais comme un état particulier n'a jamais fait l'unanimité parmi les chimistes qui se sont penchés sur les colloïdes. Jacques Duclaux (1877-1978), un des principaux acteurs de la dissémination de la chimie colloïdale en France, s'oppose à cette théorie de l'état colloïdal sur des bases empiriques. Si, pour les colloïdes inorganiques, le va-et-vient entre l'état colloïdal et l'état cristalloïde semble avéré dans la plupart des cas, Duclaux met en avant l'impossibilité pour les praticiens d'obtenir la forme cristalloïde de la plupart des colloïdes organiques, ce qui mine empiriquement la thèse d'un état colloïdal distinct :

Il est impossible de nier que la cellulose et ses éthers, l'amidon, le caoutchouc, aient au plus haut degré les caractères de cet état [colloïdal]. Savons-nous les ramener à cet état cristalloïde ? En aucune manière. La nitrocellulose, dissoute dans un quelconque de ses solvants, évaporée ou précipitée un nombre quelconque de fois, garde indéfiniment sa forme colloïdale, tandis que par exemple le soufre colloïdal reprend la forme cristalloïde au contact du sulfure de carbone. Le caoutchouc, trituré à froid avec un solvant, reste du caoutchouc et ne redevient pas fluide comme les autres hydrocarbures de formule voisine. L'amidon a pour formule $C^6H^{10}O^5$; nul traitement ne le ramène à l'état de molécules simples de cette composition.²⁰

Ainsi certaines substances s'entêtent à rester sous forme colloïdale, comme le caoutchouc et l'amidon, tandis que d'autres, se laissant plus facilement transfigurer, manifestent tour-à-tour un visage colloïdal et un visage cristalloïde, comme le soufre. Il y a donc des substances intrinsèquement colloïdales, et d'autres qui peuvent manifester le comportement des cristalloïdes ; mais il n'y a pas, selon Duclaux, un *état* colloïdal. La préférence d'Ostwald à parler d'état plutôt que de substance fait sens cependant dans le cadre de sa théorie générale et de sa vision des matériaux colloïdaux. Qu'est-ce que cet état a de particulier ? Qu'est-ce qui le rend indépendant de la composition chimique ? La justification, comme l'indique la fin de la citation de Duclaux, se joue dans les micro-mondes.

Lorsqu'Ostwald affirme que l'état colloïdal est indépendant de la composition chimique, c'est pour éclairer les praticiens qui se demandent, alors qu'ils sont en prise avec une substance complexe, s'ils ont affaire à un colloïde ou non. C'est pour éclairer la question de l'identification. Et elle se pose effectivement, puisque, avec la multiplication des études sur les colloïdes au tournant du siècle, le test de diffusion de Graham est insuffisant pour identifier des substances qui pourtant exhibent un comportement colloïdal. D'autres tests comme la turbidité, la viscosité, la sédimentation, l'hylotropie²¹... sont avancés pour statuer sur la nature colloïdale d'une substance. La multiplication des tests pour identifier les

²⁰ Jacques DUCLAUX, « Substances colloïdales et état colloïdal », *Revue Générale des Colloïdes*, n°11, septembre 1924, pp. 257-260

²¹ L'hylotropie concerne les propriétés de changement de phase des substances, comme l'évaporation et la solidification. Une substance hylotropique change de phase sur une gamme étroite de température, ses points de fusion et d'ébullition sont bien définis. Souvent les substances colloïdales ne sont pas des substances hylotropiques, c'est-à-dire, par exemple, que seule une fraction de la substance sera évaporée à une température donnée.

colloïdes conduit les chimistes à proposer d'autres hypothèses de définition que des critères phénoménologiques comme la turbidité, la diffusion et l'hylotropie. Ostwald, en particulier, va proposer une définition des colloïdes qui sera par la suite acceptée et reprise par l'ensemble de la communauté. Ce dernier met au cœur de ce processus de définition le concept de « dispersion », afin, selon ses propres termes, d'« obtenir une systématisation rationnelle de ces corps »²². Cette « systématisation rationnelle » des colloïdes se fonde, en partie, sur l'appropriation des notions de *phase* et de *systèmes hétérogènes* développés par les physico-chimistes et surtout par J. Willard Gibbs (1839-1903), quelques années auparavant. Ostwald va reprendre ces notions de phase et d'hétérogénéité et s'en servir pour établir de nouveaux critères pour classer les états de matière :

Les colloïdes typiques, plus particulièrement les solutions colloïdales, appartiennent au groupe des systèmes nommés polyphasiques ou hétérogènes par les physico-chimistes. [...] La relation entre l'hétérogénéité *chimique* (analytique) et *physique* est d'une grande importance pour la caractérisation exacte des colloïdes en tant que systèmes hétérogènes.²³

Un constat intrigant, qui émerge progressivement à la fin du XIX^e siècle, inspire Ostwald dans ce changement de perspective sur les colloïdes : les études micro-métallurgiques ont montré la présence de « grains » finement dispersés dans la structure de certains alliages, et également que ces grains possèdent la même composition chimique que le milieu dans lequel ils sont dispersés. Ce qu'Ostwald, dans un langage des phases, traduit par : « deux parties spatialement différentes d'un système ayant la même composition chimique (chimiquement homogènes donc), peuvent exhiber physiquement des frontières entre elles, en d'autres termes apparaître comme des phases différentes »²⁴. C'est précisément cette distinction entre homogénéité de composition chimique et homogénéité spatiale, qui est exprimée en une dichotomie physique/chimique, qui est à la source d'une réinterprétation majeure des colloïdes. Ostwald a substitué à la dichotomie colloïde/cristalloïde de Graham une nouvelle dichotomie : physique/chimique, ce qui provoque un déplacement considérable de ce qui fonde la spécificité des colloïdes. Graham affirmait cette spécificité sur une base essentiellement phénoménologique. Si la question de la nature microscopique des colloïdes est annexe pour ce dernier, elle est en revanche primordiale pour Ostwald. Cette spécificité des colloïdes, celui-ci la repositionne dans l'immixtion *microscopique* des différentes « phases » qui constituent la substance colloïdale. Les colloïdes sont des substances qui sont macroscopiquement homogènes, mais microscopiquement hétérogènes : une phase est « dispersée » au sein d'une autre phase, « continue ». Le lait, par exemple, est un colloïde : la phase dispersée est constituée de globules gras et autres protéines, appréhendés comme des micelles ou des particules, et la phase continue est aqueuse.

Ostwald intronise le concept de « systèmes dispersés » pour généraliser sur les substances hétérogènes. Les colloïdes sont alors définis comme un cas particulier des

²² OSTWALD, *Handbook*, *op. cit.* p. 37

²³ *Ibid.*, pp. 21-22

²⁴ *Ibid.*, p. 21

systèmes dispersés, ceux dont la taille de la phase dispersée – taille de la particule ou de la micelle – est comprise dans une certaine échelle, l'échelle colloïdale. L'état colloïdal est celui pour lequel un « degré de dispersion » important des substances est atteint. Si les dispersions sont trop grossières, les micelles ou les particules s'agglomèrent et sédimentent ; l'immixtion des phases est altérée, et la substance perd ses propriétés colloïdales de viscosité, d'apparence homogène, de diffusion lente etc. Au sein du cas particulier des systèmes dispersés colloïdaux, cette reconceptualisation des colloïdes sur la base de l'immixtion d'une phase sur l'autre engendre un autre schème classificatoire. Les substances colloïdales peuvent être classées selon l'état physique (solide, liquide ou gazeux) de la phase dispersée et continue. Si la phase dispersée est liquide, et la phase continue est aussi liquide, c'est une émulsion (le lait, la mayonnaise...). Si la phase dispersée est liquide, et la phase continue solide, c'est un gel (la gélatine, la gelée...), etc²⁵. Ce schème classificatoire – qui structure encore la classification des substances de nos jours – est véritablement contemporain à cette phase de maturité de la chimie colloïdale ; il est absent des considérations de Graham. La détermination précise de la taille des particules dispersées est également une ambition constitutive de cette phase de maturité.

La borne inférieure de l'échelle colloïdale est plus problématique que la borne supérieure. C'est ici que se joue la distinction entre « particule » et « molécule ». Les expériences et leurs interprétations qui ont mené à cette refonte conceptuelle des colloïdes se sont déroulées dans un contexte où les questions relevant de la nature et de l'existence des « atomes » et des « molécules » se sont révélées avec acuité (cf. chapitre 2). Les chimistes des colloïdes, qu'ils aient ou non développé un avis tranché sur ces questions, n'ont pas placé ces débats au cœur de leur questionnement de recherche. Ils ont suivi la voie du célèbre savant anglais Michael Faraday (1791-1867), qui était très sceptique quant à la validité et l'utilité des concepts d' « atome » et de « molécule », et a suspecté dès le milieu du XIX^e siècle la présence de fines particules solides dans des solutions qui semblent pourtant macroscopiquement homogènes : « Bien que nous ne sachions rien de ce qu'est un atome, nous ne pouvons pas en revanche résister à l'idée d'une petite particule, que l'esprit se représente facilement »²⁶. Dans cette ligne, Svedberg affirme que « le point essentiel pour les colloïdes est la particule, comme la molécule en chimie et la cellule en biologie »²⁷. La carrière de Svedberg est toute entière vouée à cerner la particule colloïdale, à la saisir dans les rets expérimentaux d'instruments élaborés spécialement. Au cours des exposés qu'il donne aux étudiants de chimie de l'université de Wisconsin aux Etats-Unis en 1923, Svedberg définit la « science » des colloïdes comme l'étude des structures « ultramicroscopiques », c'est-à-dire celles que l'on ne peut pas discerner au microscope optique :

La très rapide croissance de cette science [colloïdale] peut être attribuée au fait que la chimie et la physique se sont pendant très longtemps développées sans examiner

²⁵ *Ibid.*, p. 42 ; Cf. annexe B pour des schémas de classification des colloïdes élaborés par Ostwald

²⁶ Cité dans P.M. HEIMANN, « Faraday's theories of matter and electricity », *The British Journal for the History of Science*, vol.5, n°3, 1971, 235-257, citation p. 238

²⁷ SVEDBERG, *Colloid Chemistry, op. cit.*, p. 17

l'influence de la structure ultramicroscopique sur de nombreux phénomènes. [...] L'important en chimie colloïdale n'est pas de mesurer toutes les propriétés possibles du système colloïdal ; c'est de trouver sa structure dans le sens le plus large du mot.²⁸

En concevant la chimie colloïdale comme une science, Svedberg se place dans la continuité d'Ostwald et sa volonté d'autonomiser l'étude des colloïdes des champs disciplinaires sur lesquels ces études se sont greffées, comme la physico-chimie. La chimie colloïdale n'est pas l'étude de la composition chimique, ni de la détermination des structures moléculaires des substances comme en chimie organique, ni des équilibres réactionnels et thermochimiques comme en physico-chimie. C'est l'étude des microstructures. Cet aspect, selon Svedberg, n'a été traité que marginalement jusqu'alors par les sciences physiques et biologiques. L'importance des microstructures pour la compréhension des phénomènes et des substances, et l'état des connaissances si primitif sur ces questions, est telle que cela justifie une spécialité à part entière : « C'est parce qu'on ne connaît pas la structure des systèmes colloïdaux que nous sommes obligés d'en faire une science spéciale »²⁹. La rupture avec Graham est parachevée, il n'y a pas de différence de nature entre les colloïdes et les cristalloïdes, il n'y a qu'une différence de structure : « Nous considérons », écrit Svedberg juste après avoir introduit les travaux de Graham, « les cristalloïdes et les colloïdes non comme des genres différents de substance, mais simplement comme des genres de systèmes structuraux »³⁰. La dichotomie colloïde/cristalloïde n'est plus une partition des substances, elle permet de définir un critère structural.

Cette systématisation de la classification des colloïdes permet de cerner le chemin considérable emprunté depuis Graham. De substances exclues, définies par négation selon des critères qui se prêtent mieux aux substances des nouvelles cultures de la chimie organique (la cristallisation), les colloïdes ont été reconceptualisés sur des critères autonomes, indépendants des cultures théoriques et expérimentales de la chimie organique. Ce qui les caractérise et les lie est leur état commun de microstructure. C'est avec cette autonomie des critères que se diffuse la version « moderne » de la définition des colloïdes, c'est-à-dire la matière « dans un état finement divisé ». C'est avec cette définition lapidaire du territoire des colloïdes que J. Howard Mathews, directeur du département de chimie de l'université du Wisconsin aux Etats-Unis, va tenter en 1923 de mobiliser et coordonner les ressources politiques, scientifiques et industrielles américaines pour mettre sur pied un « Institut national des colloïdes » hébergé par l'université : « La chimie colloïdale embrasse l'étude de la physique et de la chimie des matériaux dans un état de suspension finement divisé. Ces systèmes présentent des problèmes entièrement différents de ceux posés par les solutions ordinaires ; étant donné que ces systèmes sont précisément ceux que la nature offre, le besoin d'une compréhension profonde de tels systèmes est évident. [...] Nous avons besoin d'un Institut de Recherche en Chimie

²⁸ *Ibid.*, pp. 16-17

²⁹ *Ibid.* p. 17

³⁰ *Ibid.* p. 19

Colloïdale, un institut d'envergure nationale, parrainé par la plus importante organisation de recherche en Amérique, le Conseil National de la Recherche »³¹.

La venue de Svedberg à l'université du Wisconsin, qui est déjà reconnu internationalement comme une figure majeure du domaine des colloïdes, donne un certain poids à cette demande. Initialement, Mathews s'est tourné vers la Fondation Rockefeller, l'une des plus importantes fondations privées soutenant la recherche aux Etats-Unis, pour financer cet Institut National des Colloïdes. Pour des raisons politiques cependant, le conseil d'administration de l'université a refusé les fonds de la Fondation Rockefeller, et le Conseil National de la Recherche [*National Research Council*] ne s'est pas impliqué dans cet institut, qui n'a donc pas vu le jour³². Les managers de la recherche de Du Pont, qui commencent à s'intéresser d'assez près à ce domaine des colloïdes (cf. chapitre 3) et à recruter des chimistes issus de Wisconsin, diront de Mathews qu'« il est du genre politicien »³³. Même si Mathews a échoué à mettre sur pied cet institut, le colloque qui a lieu à Madison en juin est un franc succès, qui sera répété annuellement et organisé par les principales universités engagées dans la chimie colloïdale.

Industrie des colloïdes et chimie organique : des traditions en démarcation-coopération

Cette ascension de la chimie colloïdale est bien évidemment à resituer dans le contexte d'une mobilisation massive de l'industrie chimique vers les matériaux qui sont progressivement considérés comme colloïdaux. Le caoutchouc naturel est typiquement un matériau qui connaît un essor industriel considérable au cours du XIX^e siècle et, à partir du début du XX^e siècle, est étudié plus systématiquement par les chimistes et en particulier par la chimie colloïdale. Issu des colonies des puissances européennes, le caoutchouc est importé en Angleterre et en France en très petites quantités à la fin du XVIII^e siècle. Le procédé de vulcanisation découvert au cours des années 1830, qui désigne l'addition du soufre et permet de stabiliser ses propriétés de plasticité et d'élasticité, est décisif pour son essor industriel. La production industrielle du caoutchouc s'amorce véritablement au milieu du siècle et les usages se déplacent, à la fin du siècle, des imperméables aux pneumatiques. Le développement de la bicyclette à partir de 1890 et de l'automobile plus massivement à partir de 1910 assure un nouveau poids économique au caoutchouc. La consommation mondiale triple entre 1900 et 1915, en passant de 49 000 à 155 000 tonnes³⁴. L'importance militaire et logistique du caoutchouc en fait un matériau stratégique pour les puissances ; l'Allemagne, dénuée de colonies pouvant fournir des importations de caoutchouc assurées même en temps de guerre, mobilise ses chimistes sur la recherche d'un substitut synthétique à partir du milieu des

³¹ John H. MATHEWS, *Proposed national institute for research in colloid chemistry*, Madison (WI), University of Wisconsin, 1924

³² Aaron IHDE, *Chemistry, as viewed from Bascom's Hill : A history of the Chemistry Department at the University of Wisconsin in Madison*, Madison (WI), University of Wisconsin Department of Chemistry, 1990, pp. 510-512

³³ « *Mathews is somewhat of a politician* », Mémoire, Tanberg à Stine, 9 juin 1925, CRD 19/Experimental Station History 1904-1929

³⁴ Maurice DAUMAS, *Histoire générale des techniques*, tome 4, Paris, Presses Universitaires de France, 1978, pp. 559-566 ; voir aussi FURUKAWA, *Inventing polymer science*, op. cit., pp. 36-47

années 1900. L'industrie des caoutchoucs se lie alors avec les savoirs des chimistes de manière plus massive.

Tout au long du XIX^e siècle en effet le rôle de la chimie universitaire est marginal dans les progrès techniques et industriels du caoutchouc. A partir des années 1890, cependant, la vulcanisation fait l'objet de plusieurs études de chimistes diplômés des universités et écoles prestigieuses. Le chimiste allemand Carl Otto Weber (1860-1905), titulaire d'un doctorat de la faculté polytechnique de Stuttgart (*Stuttgarter technischen Hochschule*), a occupé diverses positions industrielles dans la cellulose et le caoutchouc en Allemagne puis en Angleterre. Il est parmi les premiers à entreprendre, à partir des années 1890, une étude approfondie sur la structure du caoutchouc et du mécanisme de vulcanisation sous un angle explicitement colloïdal. Dans sa monographie parue en 1902, Weber conçoit les colloïdes comme un « état » de la matière plutôt que comme des substances, ce qui suggère que les théories d'Ostwald élaborées quelques années plus tard sont déjà en gestation parmi les chimistes industriels et sont ainsi susceptibles d'être plus facilement acceptées³⁵. La pénétration des chimistes hautement qualifiés dans l'industrie du caoutchouc s'amplifie après la Première Guerre mondiale, et des sociétés savantes spécialisées sont instituées : la Société américaine de chimie institue une division sur le caoutchouc en 1919 ; en Angleterre, un Institut de l'industrie du caoutchouc (*Britain's Institute of Rubber Industry*) est mis en place en 1921 ; en Allemagne la Société du caoutchouc (*Deutsche Kautschuk-Gesellschaft*) en 1926.

Un autre ensemble de matériaux sur lesquels la chimie colloïdale a revendiqué son expertise scientifique concerne la cellulose et ses dérivés, fibres textiles artificielles et premiers matériaux plastiques. Au milieu du XIX^e siècle les chimistes ont réussi à isoler un composé commun à l'ensemble des extraits végétaux, la cellulose. Les produits de dégradation de la cellulose sont identiques à ceux issus de la fécule ou de l'amidon, et la nouvelle culture de la chimie organique est parvenue à attribuer une formule élémentaire à ce composé dégradé, connu comme le glucose (C₆H₁₀O₆). Néanmoins la détermination de la structure moléculaire de la cellulose échappe alors à la chimie organique ; impossible à cristalliser, la cellulose et ses dérivés (nitrocellulose, acétate de cellulose, xanthate de cellulose...) ont été appréhendées comme des substances colloïdales. A la fin du XIX^e siècle, les procédés d'extraction de la cellulose se perfectionnent, en même temps que la diversification des débouchés s'amorce : d'ingrédient essentiel à la fabrication des explosifs et des pâtes à papier, s'ajoute la consommation des dérivés nitrés de la cellulose pour les fibres

³⁵ Sur Weber, voir Ed. MARCKWALD et Fritz FRANK, « Dem andenken Carl Otto Weber », *Zeitschrift für Chemie und Industrie der Kolloide*, vol. 1 (1906), pp. 4-11 ; ainsi, en préambule de son étude sur la vulcanisation, Weber cerne les difficultés qui attendent les chimistes en prise avec le caoutchouc. Sa façon de poser les problèmes prélude les développements théoriques d'Ostwald : « Aucune classe de corps n'engendre des difficultés de manipulation aussi formidables au chimiste que le groupe remarquable des colloïdes connu sous le nom de caoutchouc d'Inde (« *india rubber* »). Ces difficultés sont d'ordre physique plutôt que chimique – c'est-à-dire qu'elles consistent moins en la complexité fonctionnelle des molécules du caoutchouc, que dans la circonstance dans laquelle ces molécules se trouvent, que l'on connaît à présent dans l'état colloïdal sur-imposé à ces molécules. La matière dans cet état ne manifeste pas de changement abrupt de la condition physique ; pour les cristalloïdes, ces changements abrupts prennent la forme de points de fusion, de point d'ébullition, et de solution », in Carl WEBER, *The chemistry of india rubber, including the outlines of a theory on vulcanization*, London, Charles Griffin, 1902, p. 1

textiles, les matières plastiques et les films pelliculaires³⁶. La production de fibres textiles cellulósiques augmente fortement pendant l'entre-deux guerres. En 1911 la production mondiale des fibres nitrocellulosiques s'élève à 6000 tonnes ; ce chiffre atteint 11 000 tonnes en 1919, et 197 000 tonnes en 1929³⁷. La production des plastiques à base de cellulose – collodion, cellulóid (1870), galathite (1897), bakélite (1907) – suit également cette tendance : 20 000 tonnes sont produites en 1900, 50 000 en 1913 et 85 000 en 1929. Parmi ces matériaux plastiques, le cellulóid est le plus important : la production mondiale est estimée à 50 000 tonnes en 1925, plus du double de sa production en 1913³⁸. Une grande compagnie chimique comme Du Pont de Nemours, alors qu'elle se diversifie au sortir de la Première Guerre mondiale vers les matières plastiques et les fibres textiles artificielles, commence à appréhender ces matériaux comme « colloïdaux » et à embaucher des spécialistes de chimie colloïdale à partir du début des années 1920.

Ainsi, à partir de la fin du XIX^e siècle, les substances que les chimistes ont appelées « colloïdales » comme le caoutchouc et la cellulose se retrouvent lestées d'un poids industriel conséquent. L'expression « matériau colloïdal » prend alors tout son sens, dans la lignée de la distinction que Klein et Lefèvre établissent entre matériau et substance : une substance est l'objet de l'étude du chimiste, c'est un objet *scientifique* ; tandis qu'un matériau est aussi l'objet des industriels, artisans, apothicaire... un matériau est aussi un objet *technique* et/ou *industriel*³⁹. Au cours de cette période, les chimistes organiciens se re-saisissent de l'étude des colloïdes, ces substances redeviennent des objets légitimes de la chimie organique. Car les chimistes issus de cette branche émergente qu'est la chimie colloïdale n'ont pas l'exclusivité de l'étude des colloïdes. Au demeurant, la différenciation des chimistes des colloïdes vis-à-vis de leurs collègues est faible au début du siècle ; il faudra attendre la mise en place de filières universitaires spécifiques pour véritablement établir une communauté dont les membres se perçoivent avant tout comme des « chimistes des colloïdes ». Aux Etats-Unis, ces filières se mettent en place au milieu des années 1920⁴⁰. L'université du Wisconsin fait figure de précurseur : probablement suite à la série de conférences données par Ostwald aux Etats-Unis en 1913, le département de Chimie de Wisconsin offre un cours de chimie colloïdale dès 1913, qui est repris par Mathews en 1921⁴¹.

En Allemagne, ce processus s'effectue à peu près simultanément avec le cas américain, ou est peut-être un peu antérieur. Typique de cette phase de disciplinarisation de la chimie colloïdale est la trajectoire d'Alfred Lottermoser (1870-1945). Etudiant au laboratoire de chimie organique de la *Technischen Hochschule* de Dresde, sous la direction du chimiste organicien Ernst von Meyer (1847-1916), il complète en 1898 son doctorat sur l'argent colloïdal. Il quitte le laboratoire de chimie organique en 1903 pour rejoindre celui

³⁶ DAUMAS, *Histoire générale des techniques*, op. cit. pp. 566-581

³⁷ Ludwig F. HABER, *The Chemical Industry 1900-1930*, London, Oxford University Press, 1971, p. 5

³⁸ *Ibid.*, p. 5 et 374

³⁹ Voir aussi Bernadette BENSUADE-VINCENT, *Eloge du mixte : matériaux nouveaux et philosophie ancienne*, Paris, Hachette, 1998

⁴⁰ EDE, *Rise and decline*, op. cit., chap. 3

⁴¹ IHDE, *Chemistry*, op. cit., pp. 478-483

d'électrochimie et de physico-chimie de l'école de Dresde. En 1905, il est nommé professeur extraordinaire de chimie colloïdale. Il fonde en 1925 l'Institut de chimie colloïdale au sein de la *Technischen Hochschule* de Dresde. Entre 1923 et 1926 30 jeunes chimistes sont sortis diplômés de cet institut⁴². La mise en place d'instituts ou de laboratoires explicitement orientés sur la chimie colloïdale émerge au sortir de la Première Guerre mondiale : L'*Institut für Kolloidforschung* à Francfort (1918) ; le *Forschungsinstitut für Technical Kolloidechemie* à Vienne (1922) ; l'*Institut für Medizinesche Kolloidchemie* à Vienne également (1923)... (cf. annexe A). L'institution en 1922 de la *Kolloid Gesellschaft*, la société allemande des colloïdes présidée par Ostwald, et surtout l'attribution du prix Nobel de chimie de 1925 à Richard Zsigmondy et celui de l'année suivante à The Svedberg, a accéléré la reconfiguration des laboratoires et instituts de recherche autour de la chimie colloïdale.

Mais les chimistes industriels, cependant, ont dans un premier temps largement contribué à institutionnaliser ce domaine alors marginal au sein de la chimie. Le chimiste du caoutchouc Carl Weber en particulier est à l'origine de la première revue scientifique sur les colloïdes. A Stuttgart, ce dernier a étudié sous la direction de Hermann von Fehling (1812-1885), qui s'inscrit dans la grande tradition de la chimie organique allemande. Aussi peut-on supposer que Weber est d'abord formé à la chimie organique. Débutant sa carrière industrielle à la fin des années 1880, il se penche sur le caoutchouc naturel et la cellulose. En s'orientant définitivement vers le caoutchouc au cours des années 1890, il constate vite les limites de la stratégie que la culture de la chimie organique a développé pour appréhender les substances, soit leur purification pour isoler des composés moléculaires stoechiométriquement purs, censés constituer l'essence de la substance :

La caractérisation et l'identification des colloïdes et leurs dérivés, et leur isolement et purification à partir de mélanges de ces colloïdes, offre fréquemment des difficultés presque insurmontables.⁴³

Aussi Weber élabore d'autres stratégies de recherche pour aborder le phénomène de la vulcanisation, en particulier pour déterminer si l'addition du soufre entraîne une réaction chimique avec les molécules du caoutchouc. Comment le soufre se lie-t-il au caoutchouc, et comment expliquer les effets bénéfiques de la vulcanisation ? Weber mobilise la théorie colloïdale pour répondre à ces questions. Il est en effet remarquable que celui-ci discute longuement l'état des connaissances sur la distinction entre colloïdes et cristalloïdes, et en particulier les travaux de Graham, avant d'introduire ses résultats expérimentaux sur la vulcanisation. Le cœur de son travail expérimental consiste à mesurer quantitativement la fixation du soufre sur le caoutchouc en fonction de la température et du temps de vulcanisation. Mais les courbes obtenues visent à établir une théorie générale de la vulcanisation ; aussi Weber présente également des photomicrographies de « globules » de

⁴² Klaus BENEKE, « Alfred Lottermoser und kolloidale sole », in *Beiträge zur Geschichte der Kolloidwissenschaften*, VII, *Mitteilungen der Kolloid-Gesellschaft*, 1998, Seite 100-106, Verlag Reinhard Knof, Nehnten ; Hans-Dieter DORFLER & Stig E. FRIBERG, « Alfred Lottermoser – A pioneer in the application of colloid chemistry », *Journal of Dispersion Science and Technology*, vol. 20 (1999), pp. 839-845

⁴³ WEBER, *The chemistry of india rubber*, *op. cit.*, p. 1

souffre, cristallisés ou amorphes, dispersés dans le caoutchouc. En fonction des paramètres expérimentaux, Weber parvient à faire disparaître ces globules du pouvoir de résolution du microscope, et le soufre entre ainsi dans l'état colloïdal. Ces considérations inclinent à penser que la vulcanisation est également un processus colloïdal. Dans la lignée des chimistes qui se sont penchés avant lui sur les colloïdes, Weber étudie les propriétés de diffusion des gaz et liquides à travers le caoutchouc, ou bien les propriétés de solubilité du caoutchouc en fonction du solvant, ou encore la variation de la viscosité ou de l'élasticité en fonction de la température. Toutes ces propriétés, que Weber dénomme propriétés « physiques », vont par la suite être comprises comme les propriétés « colloïdales » du caoutchouc.

Weber cependant inscrit également ses recherches dans la lignée de la tradition de la chimie organique. Au cours du XIX^e siècle, les chimistes sont parvenus à isoler un composé ultime résultant de la décomposition du caoutchouc, qu'ils ont baptisé « isoprène » et dont la formule élémentaire a été fixée à C_5H_8 , contenant en outre deux doubles-liaisons carbone-carbone. Le caoutchouc présentant les propriétés des colloïdes, et d'autre part les recherches précédentes ayant montré que les « poids moléculaire » – si cette grandeur a quelques sens appliquée aux colloïdes – devaient nécessairement être plus élevés que pour les substances habituellement manipulées par les chimistes, les molécules de caoutchouc en sont venues à être considérées comme des agrégats de molécules élémentaires d'isoprène, appelés « polyprène ». Weber exprime alors la formule moléculaire du caoutchouc sous la forme $(C_{10}H_8)_n$. Il émet également des essais de formules structurales pour représenter la liaison du soufre avec le polyprène. Ces études, réalisées au cours de la décennie 1890, seront suivies de nombreuses autres dans la décennie suivante. Avec la mobilisation plus massive des chimistes sur le caoutchouc cependant, une division du travail va se mettre en place ; Weber est sans doute un des rares chimistes à avoir étudié rigoureusement le caoutchouc – au sein d'une même étude – à la fois avec l'approche de la chimie organique et avec l'approche colloïdale, alors en gestation.

En 1899 Weber approche la maison d'édition *Steinkopff & Springer* implantée à Dresde, dans la Saxe, dans le but de lancer un périodique couvrant les aspects scientifiques et industriels des colloïdes. Ce projet ne sera mis en œuvre qu'à partir de 1905, lorsque le chimiste Rudolf Ditmar, employé dans une compagnie de caoutchouc et de colle située à Graz, rencontre Weber et s'approprie le projet de lancer la revue, la santé de Weber ne lui permettant pas de mener à bien cette revue. Ditmar devient l'éditeur du journal qu'il nomme *Zeitschrift für Chemie und Industrie der Kolloide*, et le premier numéro paraît en juillet 1906⁴⁴. Weber ne s'est pas tourné vers l'éditeur commercial *Steinkopff & Springer* par hasard. En effet, celle-ci est la maison d'édition qui imprime notamment les *Jahrbuch der Kautschuk-Industrie* (Annuaire de l'industrie des caoutchoucs). Comme l'indique Ditmar dans le lancement du journal dont il est l'éditeur scientifique, le domaine des colloïdes est bien en prise avec l'industrie (cf. aussi figure I.1) :

⁴⁴ Rudolf DITMAR, « Zur Einführung », *Zeitschrift für Chemie und Industrie der Kolloide*, vol. 1 (1906), pp. 1-3

Dans la mesure où d'importantes industries modernes telles que la préparation des colorants, de la colle, du caoutchouc, du papier, du cuir, la fabrication de l'albumine, de la gomme, de la cellulose, du savon, de l'amidon, des verres, ainsi que dans la branche de la photographie, de la soie artificielle, et les stations d'épuration... travaillent avec des substances colloïdales, une bonne connaissance de ces dernières devient de plus en plus souhaitable ; l'intérêt des colloïdes pour la science s'accroît de jour en jour.⁴⁵

192

Steinkopf & Springer, Verlagsbuchhandlung, Dresden-A.
 Vielfachen Anregungen entsprechend, veranstalteten wir von dem unserm Kalender für die
 Gummi-Industrie 1906 beigegebenen

Jahrbuch der Kautschuk-Industrie
 und verwandter Betriebe, herausgegeben von **Edgar Herbst**, Fabrikdirektor
 eine **Separat-Ausgabe** mit folgendem Inhalt:

Historisches Kalendarium. Ueberblick über die Entwicklung der Gummi-
 Industrie im XIX. Jahrhundert. Analyse, Patente, Zusammenstellung der
 in- und ausländischen Kautschuk-Literatur. Die Lage der Gummi-Industrie.
 Wir geben das kleine, höchst wertvolle Buch an Interessenten zum Preise von 1 Mark ab und
 werden Bestellungen von allen Buchhandlungen entgegengenommen oder auch von uns direkt ausgeführt.

Joh. Dietz, Altona-Ottensen
 Eisengießerei und Maschinenfabrik

liefert als langjährige Spezialität:



Zahnräder
Seilscheiben
Riemenscheiben u.
Schwungräder



Gegenstrom-Vorwärmer
„**Contra**“
Keine Röhren mehr!
Niemals Reparaturen!
Überall leicht zugänglich!
Wasser von über 100° C!

ohne Modell mit der Maschine gefertigt, in jeder beliebigen Ausführung u. jeder gewünschten Zahnform (auch mit geschliffenen Zähnen) bis zu den größten Abmessungen, in Stahl, Bronze u. Eisen.

Feuer- u. säurebeständ. Guß von bewährter Güte.
 Einrichtungen kompletter Harzölfabriken und Teerdestillations-Anlagen unter Garantie der Leistungsfähigkeit.
Kessel, Gefäße und Apparate für die gesamte chemische Industrie.

nach reinem Gegenstromprinzip konstruiert, bester und vollkommenster Vorwärmer der Neuzeit, für Dampfkeesselheizung, insbesondere für die Ueberhitzungsstationen der Diffusen in der Zuckerfabrikation, kontinuierlicher Heißwasser-Apparat, ganz aus Cufiseisen gebaut.
 Prospekte auf Verlangen zur Verfügung.

F. Sartorius, Göttingen
 Mechanische Werkstätten zu Göttingen und Rauschenwasser

Wagen und Gewichte für wissenschaftliche, chemische und technische Zwecke.
Spez.: Analysenwagen nur eigener bewährtester Konstruktion.

Patentiert in Deutschland, England, Belgien, Oesterreich-Ungarn etc.
 Auf allen beschickten Ausstellungen prämiert, zuletzt Weltausstellung BRUSSEL, Diplom d'honneur und Preis 500 Francs für beste Konstruktion in Feinwagen. . . .
 Man verlange ausdrücklich Original-Sartorius-Wagen, da Nachahmungen in dem Handel gebräuchlich werden.

Verantwortlicher Redakteur Dr. Rudolf Dittmar, Graz.
 Druck und Verlag von Steinkopf & Springer, Dresden-A. 21.

Figure 1.1 — Publicité paraissant dans un numéro de 1906 du Zeitschrift für Chemie und Industrie der Kolloide

Entre 1900 et 1920 une dizaine de chimistes organiciens allemands, pour la plupart des étudiants d'Hermann Emil Fischer (1852-1919), éminent représentant de la chimie organique allemande, proposent de nouvelles théories structurales du caoutchouc, de la cellulose, de l'amidon et des protéines⁴⁶. Ces théories viennent s'inscrire de plain-pied dans la connaissance de l'« état colloïdal » de ces substances, et dont Weber peu avant affirmait que la méconnaissance est le frein le plus immédiat à la compréhension de la vulcanisation⁴⁷.

⁴⁵ *Ibid.*, p. 1

⁴⁶ FURUKAWA, *Inventing polymer science*, op. cit., pp. 30-36

⁴⁷ « La difficulté pour atteindre une explication rationnelle du procédé de vulcanisation réside dans le fait que la vulcanisation amène à considérer les aspects physiques davantage que les aspects chimiques, et bien que ces deux aspects sont évidemment corrélés, notre ignorance presque complète de la nature de l'état colloïdal rend l'élucidation de la nature de cette corrélation presque impossible », in WEBER, *The chemistry of india rubber*, op. cit., p. 57

Selon ces théories, le colloïde de caoutchouc est constitué de « molécules physiques », ces molécules physiques étant elles-mêmes des agrégats de « molécules chimiques » liées entre elles par des « valences partielles ». Les colloïdes deviennent alors considérés comme des agrégats de molécules simples, dont ces chimistes, dans la tradition de la chimie organique, essaient de déterminer leur formule structurale. Cependant ces derniers ont du s'extraire de cette tradition et reconnaître que la détermination structurale de ces « molécules chimiques » est loin d'épuiser la complexité des substances colloïdales. Max Bergmann (1886-1944), qui s'est attelé à la détermination de la formule structurale de l'amidon, a préféré ne pas utiliser l'expression « poids moléculaire » pour ces substances, et lui a préféré « poids moléculaire pseudo-élevé. » Le « poids moléculaire » n'a pas la même signification pour les substances colloïdales que pour les substances traditionnellement étudiées par la chimie organique comme les colorants organiques et certains produits pharmaceutiques comme l'aspirine, ce qui est reflété par la méfiance de la part des chimistes organiciens lorsqu'ils transposent tel quel ce terme aux colloïdes. La mobilisation théorique de la chimie organique sur les matériaux colloïdaux au début du siècle s'est détachée des présupposés qui ont encadré l'avènement de la chimie organique « traditionnelle » entre 1820 et 1860, ainsi que le décrit l'historien Yasu Furukawa :

La théorie structurale classique n'était pas adaptée à l'étude des substances moléculaires pseudo-élevées, selon Bergmann, car la théorie structurale est fondée sur la molécule d'Avogadro en phase gazeuse. De ce fait, la formule structurale ne fournirait que peu d'informations sur les variations que la molécule [pseudo-élevée] subit lors des processus de solidification et liquéfaction. La cause des propriétés colloïdales [affirmait Bergmann], réside dans l'intensité des forces d'agrégation, un facteur que la théorie structurale classique ne peut pas prendre en compte.⁴⁸

Ainsi la connaissance moléculaire des composés ultimes des substances colloïdales – c'est-à-dire ceux dont la purification est la plus aboutie – n'est pas d'une grande utilité pour comprendre les propriétés de ces substances, ou comment la variation d'élasticité, de viscosité, de solubilité agit sur l'état de la substance, sur sa structure. Le va-et-vient permanent entre les « dimensions perceptibles » et les « dimensions imperceptibles », qui caractérise la culture de la chimie organique du XIX^e siècle, en dépit d'une apparente propension à l'abstraction à travers la théorie atomique, se brise alors que celle-ci s'empare des substances colloïdales. L'hypothèse est que dans le premier tiers du XX^e siècle, chimie organique et chimie colloïdale se confrontent et s'interpénètrent pour tisser à nouveau ce lien entre le visible et l'invisible, et ce faisant enfantent une nouvelle « ontologie des matériaux ». L'engouement technique et industriel croissant que ces matériaux suscitent à partir de la fin du XIX^e siècle est interprété ici comme le début de la décomposition de l'ontologie des matériaux bâtie trois quarts de siècle plus tôt autour des nouvelles cultures de la chimie organique.

⁴⁸ FURUKAWA, *Inventing polymer science, op. cit.*, p. 35

L'effort de la chimie organique sur les matériaux colloïdaux ne s'est bien évidemment pas restreint à un apport théorique visant à élucider leur structure. La poignée de ces chimistes qui s'est attachée à ces problématiques théoriques à partir du début du siècle ne constitue qu'une minorité de la mobilisation globale des chimistes organiciens sur ces matériaux. La recherche d'un substitut au caoutchouc naturel, par la polymérisation de l'isoprène ou d'autres substances moléculairement bien définies de la famille des alcènes ou des cétènes, occupe également de nombreux chimistes, avec des questions plus pratiques. Hermann Staudinger, alors professeur assistant de chimie organique à la polytechnique de Karlsruhe depuis 1907, est lui-même engagé dans des recherches sur la polymérisation des cétènes. Néanmoins, s'inscrivant dans la grande tradition de la chimie organique allemande, Staudinger considère avec circonspection aussi bien les recherches industrielles sur le caoutchouc artificiel, que les tentatives théoriques de ses collègues pour établir la structure moléculaire de ces substances.

Staudinger n'est pas convaincu par les libertés prises par ces collègues avec un des postulats essentiels qui ont accompagné l'avènement de la chimie organique, l'isomorphisme entre la molécule et la substance⁴⁹. Pour celui-ci, la distinction entre « molécule chimique » et « molécule physique » est une hérésie. A partir du début des années 1920, l'ambition scientifique de Staudinger est toute entière tournée vers la réhabilitation du concept de « molécule » pour appréhender les matériaux colloïdaux⁵⁰. Expérimentalement cependant, il est clair que si l'expression « poids moléculaire » revêt quelque signification pour les colloïdes, celui-ci est beaucoup plus élevé que les poids moléculaires manipulés traditionnellement par la chimie organique, qui sont de l'ordre de quelques centaines au plus. Pour concilier ces résultats expérimentaux sur les colloïdes qui convergent vers des poids moléculaires gigantesques, avec l'approche moléculaire-structurale de la chimie organique qui ne reconnaît que des molécules simples, Staudinger introduit en 1922 le concept de « macromolécule » pour appréhender les substances colloïdales. C'est autour de ce concept de macromolécule que Staudinger va orienter ses programmes de recherche ainsi que ceux de ses doctorants. En poste à la prestigieuse université polytechnique de Zurich (ETH Zurich) entre 1920 et 1926, Staudinger a dirigé 17 doctorants qui ont accumulé les études empiriques sur la

⁴⁹ Le terme « isomorphisme » est improprement utilisé ici ; il provient des chimistes-cristallographes du début du XIX^e siècle pour qualifier un phénomène cristallographique remarquable : certaines substances distinctes, de composition chimique similaire mais non identique, peuvent cristalliser en des formes cristallines identiques. L'absence d'équivalence stricte, bijective, entre composition chimique et forme cristalline, l'isomorphisme donc, a été interprétée au regard de la diffusion de la théorie atomique en chimie, par l'existence de formes différentes, pour une composition chimique donnée, que peuvent affecter les « molécules » des substances. L'expression utilisée ici, isomorphisme entre molécule et substance, constitue ainsi un écart par rapport à son sens original en cristallographie. Néanmoins cette expression permet de saisir le fait que les chimistes en sont venus à considérer la « molécule » comme la plus petite entité à laquelle une substance peut être réduite sans être décomposée, c'est-à-dire en conservant ses attributs et son identité. Pour les substances colloïdales cet isomorphisme entre la molécule et la substance n'est pas valable. Lorsque les chimistes parviennent à attribuer une molécule constitutive à ces substances, ses attributs sont perdus : le caoutchouc ne présente plus les mêmes caractéristiques que la substance décomposée associée d'isoprène.

⁵⁰ FURUKAWA, *Inventing polymer science, op. cit.* ; voir aussi Herbert Morawetz, *Polymers, the origins and growth of a science*, New York, Wiley, 1985 ; son autobiographie est également intéressante : Hermann STAUDINGER, *From organic chemistry to macromolecules: a scientific autobiography on my original papers*, New York, Wiley Interscience Publishers, 1970 [Première édition allemande, 1961]

polymérisation et la structure du caoutchouc, de la cellulose et d'autres substances polymérisées. Staudinger constitue les premières bases de son école de recherche, fondée sur la défense de sa théorie macromoléculaire.

Car au milieu des années 1920 cette théorie est loin d'être acceptée par l'ensemble de sa communauté en chimie organique. En suggérant que l'approche moléculaire-structurale de la chimie organique reste féconde pour l'étude des colloïdes, et même la seule à même d'élucider leur structure, sa communauté reste, au mieux, sceptique. Dans ses mémoires, il se souvient des réactions que son concept de « macromolécule » pour étudier les caoutchoucs soulève parmi ses collègues⁵¹ : « Laisse tomber l'idée des grandes molécules », lui écrit son collègue chimiste organicien Heinrich Wieland en 1926, « Les molécules organiques avec un poids plus grand que 5000 n'existent pas. Purifie ton caoutchouc [...] et il cristallisera »⁵¹. Staudinger est alors isolé au sein de sa discipline. Son programme de recherche n'est pas représentatif de ce qui oriente les pratiques de ses collègues chimistes organiciens, davantage tournés vers l'identification de nouvelles substances organiques et la détermination de leur structure moléculaire. Le chimiste américain Elmer K. Bolton (1886-1968) est venu compléter son doctorat en Allemagne à partir de 1913, au Kaiser Wilhelm Institute de Berlin sous la direction du grand professeur de chimie organique Richard Willstätter (1872-1942). De retour aux Etats-Unis en 1916, Bolton est engagé par la firme Du Pont de Nemours, pour travailler initialement sur les colorants organiques, avant de prendre par la suite la direction du département de recherches chimiques de Du Pont. A peu près de la même génération que Staudinger, donc, Bolton décrit ainsi la nature de son travail de doctorat sous la direction de Willstätter, sur les pigments végétaux :

Le travail consistait à isoler ces pigments, à les rendre purs, et ensuite à établir la constitution chimique de la petite tache de pigment qui se trouve dans chaque cellule de la fleur. Prenez le géranium, par exemple. [Le personnel de laboratoire] avait aménagé pour moi un lit d'environ 500 plans de géranium et une femme cueillait chaque matin quelques pétales de la plante et les introduisait dans un acide acétique glacial, d'où le pigment serait extrait ; ensuite, en utilisant de l'éther on faisait précipiter [c'est-à-dire cristalliser] le pigment, et c'était sous une forme très grossière, une des taches était d'élaborer des méthodes de purification.⁵²

Par contraste, les approches d'inspiration colloïdale pour l'étude du caoutchouc et des pigments minéraux se distinguent nettement de la recherche de « purification » qui caractérise la chimie organique, comme c'est le cas chez Du Pont justement, à peu près au même moment où Staudinger élabore son programme :

Fin janvier [1927] le travail a débuté sur l'étude colloïdale, physico-chimique du système dispersé caoutchouc-titanox [...]. Dans l'immédiat, ce programme concerne l'établissement des isothermes d'adsorption du caoutchouc-titanox dans les solvants simples, la recherche d'inférences microscopiques [« *microscopic evidence* »] quant à la localisation du caoutchouc sur les particules de pigment ou dans le solvant des émaux, et

⁵¹ Cité dans FURUKAWA, *Inventing polymer science, op. cit.*, p. 67

⁵² Interview de Bolton par Alfred D. Chandler Jr., HML accession 1668 (interviews)/E.K. Bolton Interview

la détermination de l'efficacité de protection ou d'interdépendance entre divers constituants du caoutchouc.⁵³

Comme on le voit dans cette orientation d'un des programmes de recherche de Du Pont sur l'utilisation du caoutchouc dans les pigments, l'approche colloïdale se focalise sur l'organisation microscopique des constituants d'un système, tandis que la chimie organique cherchera davantage à isoler ces constituants et à les représenter par des « molécules » bien définies. Ainsi, nous interprétons ces deux traditions scientifiques comme deux traditions *épistémologiques* distinctes. La chimie colloïdale promeut une façon d'appréhender les substances originale vis-à-vis de la tradition plus établie de la chimie organique. Elle soulève des interrogations auxquelles la chimie organique est aveugle ; ces interrogations traduisent une représentation des substances et matériaux distincte de celle de la chimie organique, qui laisse de côté – au moins provisoirement – le concept de « molécule » et préfère celui de « dispersion ». Toujours chez Du Pont début 1927, un chimiste des colloïdes propose, au directeur assistant du département de recherches de la compagnie, un programme sur la détermination du degré de dispersion d'extraits cellulosiques. Sachant s'adresser à un chimiste organicien ignorant le jargon spécialisé en chimie colloïdale, le chimiste des colloïdes prend le soin de traduire « degré de dispersion » par « poids moléculaire » : « Utilisation de l'ultracentrifugeuse pour déterminer le degré de dispersion (ou le poids moléculaire, si vous préférez) des dérivés de la cellulose en solution »⁵⁴.

Nouvelle ontologie et nouveaux schèmes explicatifs des propriétés

Chimie colloïdale et particules

Dans son étude sur l'histoire scientifique des polymères, Furukawa s'attache en particulier à analyser et à retracer l'apport d'Hermann Staudinger à la compréhension de ces matériaux au cours de la première moitié du XX^e siècle. Cet auteur présente Staudinger comme une figure scientifiquement marginale dans le contexte de la chimie de l'entre-deux guerres. S'attachant à défendre des conceptions et des idées originales sur des bases empiriques et théoriques robustes, Staudinger est dans un premier temps seul. Seul contre les physico-chimistes, seul contre les chimistes se revendiquant de la spécialité colloïdale, et seul également contre ses propres collègues chimistes organiciens, alors même qu'il cherche à réintroduire les « pères fondateurs » de la grande tradition de la chimie organique allemande – les Liebig et Kekulé – pour étudier et comprendre les colloïdes. Ainsi Furukawa retrace les débats soulevés par la théorie macromoléculaire à partir du début des années 1920 comme une lutte entre deux traditions : celle de la chimie organique « classique » représentée par Staudinger, et la tradition « physicaliste », qui défend la théorie des agrégats et regroupe ses adversaires. Devant l'accumulation des arguments présentés par Staudinger cependant, ses adversaires se rallient progressivement à sa théorie et au milieu des années 1930 le terme de

⁵³ G.D. Patterson, « Fundamental study – rubber titanox system », janvier 1927, GDP 10/Summary reports dispersions 1926-1929

⁵⁴ Lettre, E.O. Kraemer à H. Bradshaw, 9 mars 1927, CRD 21/Fundamental research 1926-1931

« macromolécule » est définitivement accepté, mis à part quelques irréductibles de mauvaise foi. La « victoire » du concept de macromolécule est alors interprétée comme celle de la chimie organique sur la tradition physicaliste et sur la chimie colloïdale. En outre, l'isolement de Staudinger est également épistémologique ; Furukawa interprète en effet le succès du concept de macromolécule comme celui d'une approche holiste, propre à Staudinger, sur une épistémologie réductionniste qui caractérise la tradition physicaliste :

Les débats sur les macromolécules dans les années 1920 et au début des années 1930 témoignent abondamment du heurt [*clash*] qui oppose Staudinger à ses opposants, c'est-à-dire, un heurt entre la tradition organique-structurale et la tradition physicaliste. [...] Sa [Staudinger] théorie s'inscrit dans la tradition organique-structurale, à la fois théoriquement et expérimentalement. Afin d'expliquer les propriétés des composés, cependant, Staudinger s'est écarté du concept classique de structure chimique. Il a toujours avancé que les propriétés physiques et chimiques des polymères sont déterminées non seulement par la structure interne de la molécule, mais plus significativement par sa structure externe, telle que la taille et la forme. C'est sans doute précisément cet écart vis-à-vis de l'approche structurale traditionnelle qui lui a permis d'établir la vision macromoléculaire – contrairement aux tentatives du XIX^e siècle cherchant à établir le concept d'une grande molécule, vite rejetées par les organo-structuralistes. La conception de Staudinger de la matière, holiste, privilégiant le tout plutôt que les parties individuelles, a joué un rôle crucial pour assurer cette transition. Son rejet viscéral du réductionnisme mécanique de l'approche physicaliste peut aussi être compris dans le contexte de sa conception holiste. Ainsi le développement de la théorie macromoléculaire de Staudinger ne peut pas être perçu comme le remplacement d'une théorie par une autre ; elle ne peut pas non plus être interprétée comme un retour à la chimie classique. L'émergence du concept de macromolécule s'est accompagnée d'un basculement épistémologique dans la façon dont les scientifiques observent la matière.⁵⁵

Comme le laisse entendre les deux dernières phrases de cette longue citation de Furukawa, il se joue au cours de cet épisode davantage qu'une théorie des substances colloïdales organiques comme le caoutchouc. Pour rétablir le va-et-vient entre les dimensions perceptibles et imperceptibles sur ces substances, Staudinger fait apparaître d'autres éléments de la dimension imperceptible que ceux que la chimie organique manipule habituellement : à la « structure interne » de la molécule – la disposition des atomes dans la molécule – comme facteur explicatif des propriétés des substances, il substitue la « structure externe », c'est-à-dire la taille et la forme de la molécule. La diffusion de la théorie macromoléculaire s'accompagne, selon Furukawa, de la diffusion de ces nouveaux facteurs explicatifs, cette nouvelle facette de la dimension imperceptible – taille et forme de la (macro)molécule. Cette substitution manifeste un basculement épistémologique ; la transition d'une épistémologie réductionniste, portée par la tradition physicaliste, à une épistémologie holiste, portée par Staudinger. Or si la taille et la forme des molécules sont désormais mobilisées pour rendre compte du comportement des substances, ces considérations restent de l'ordre de l'imperceptible : les macromolécules, même si elles sont comparativement beaucoup plus

⁵⁵ FURUKAWA, *Inventing polymer science, op. cit.*, pp. 87, 90-1

grandes que les molécules généralement étudiées par la chimie organique jusqu'alors, restent quand même invisibles à l'œil nu, et même au microscope optique classique. Comment, alors, justifier cette transition du réductionnisme au holisme que Staudinger serait censé incarner ? De plus, ces nouveaux critères pour redéfinir ce qui compte dans les dimensions imperceptibles, la forme et la taille, sont également défendus et mobilisés par la tradition colloïdale, une source à laquelle Staudinger s'est largement abreuvé.

Ainsi, nous proposons une interprétation différente de celle que Furukawa déploie pour analyser la portée scientifique et intellectuelle de Staudinger. D'une part, « réductionnisme » caractérise aussi bien l'approche de la chimie organique classique que celle préconisée par Staudinger pour comprendre les substances colloïdales. Pour reprendre les catégories de Furukawa, la tradition physicaliste et la tradition organique-structurale sont réductionnistes. D'autre part, établir une causalité liant la diffusion de la théorie macromoléculaire à la mobilisation des nouveaux paramètres imperceptibles (taille et forme) dénature le processus historique par lequel ces paramètres se sont imposés, et surestime l'apport de Staudinger dans ce processus. Trancher sur la question de la nature des éléments microscopiques des colloïdes organiques – micelles, particules, macromolécules ?, valences principales ou partielles ? – n'est peut-être pas l'aboutissement le plus remarquable et décisif des événements dans lesquels cette controverse s'inscrit. L'idée que ces éléments sont mesurables et que leur grosseur et leur forme sont les paramètres essentiels à investir pour rétablir le va-et-vient entre les dimensions perceptibles et imperceptibles est sans doute aussi remarquable et spécifique à cet épisode de la chimie du premiers tiers du vingtième siècle.

Cette idée, Staudinger n'en a pas l'exclusive initiative, loin de là. Il a ici, consciemment ou inconsciemment, absorbé certains présupposés sur lesquels la chimie colloïdale s'est bâtie pour atteindre son ambition à la « disciplinarisation » et sa volonté de se démarquer clairement de la chimie organique. Car, engagé dans la recherche sur la structure de la cellulose et le caoutchouc, Staudinger ne pouvait pas faire l'économie de la littérature représentative de cette spécialité en phase de maturation. Ses écrits, à partir du milieu des années 1920, portent l'empreinte de l'influence de la théorie colloïdale des substances sur sa propre pensée : « Dès le début des études sur les hydrocarbures synthétiques à haut poids moléculaire », écrit-il par exemple en 1929, « nous pensions que le polyindène et le polystyrène sont des colloïdes et que la différence de viscosité peut être attribuée à une différence dans leur degré de subdivision »⁵⁶. L'expression « degré de subdivision » est étrangère à la chimie organique « classique », elle est en revanche caractéristique de la tradition colloïdale, en phase de consolidation alors que les chimistes multiplient les études sur les substances colloïdales à partir du début du siècle. Ostwald, comme indiqué ci-dessus, a assimilé ces études et élaboré le concept de « degré de dispersion » pour identifier et classer ces substances. Une classification que Staudinger s'est également appropriée et que l'on

⁵⁶ Cité dans MORAWETZ, *Polymers, op. cit.* p. 94

retrouve, avec quelques modifications, dans les schèmes classificatoires qu'il élabore autour des macromolécules, dans lesquels il reprend l'expression « degré de dispersion »⁵⁷.

Sa posture au tournant des années 1930 ne semble pas être caractérisée par une opposition en bloc vis-à-vis de la chimie colloïdale, comme le récit de Furukawa incline à cette lecture. Son imprégnation des présupposés de la chimie colloïdale s'accompagne de l'assimilation d'un instrument caractéristique de cette jeune spécialité, l'ultramicroscope, et de l'unité métrique associée, le micromicron ($\mu\mu$) (cf. chapitre 2). En effet Staudinger examine ses échantillons à l'ultramicroscope, même si l'instrument s'avère impuissant à observer les macromolécules, trop fines ou pas assez réfractives pour être résolues. Dans une conférence donnée en juin 1931 à la Société Chimique de France, il propose de remanier le système de classification des colloïdes : alors que sa théorie commence à être acceptée, les colloïdes dont les chimistes commencent à être convaincus qu'ils sont constitués de macromolécules présentent des propriétés spécifiques, ce qui incline Staudinger à les classer à part des colloïdes « micellaires », et propose la catégorie de colloïde « moléculaire »⁵⁸. En effet, un des acquis expérimentaux de Staudinger les plus significatifs est la relation linéaire qu'il est parvenu à établir entre viscosité et poids moléculaire pour les colloïdes moléculaires, ce qui n'est pas le cas pour les colloïdes micellaires. Staudinger ici propose simplement de remettre à jour la classification des colloïdes ; ce n'est pas un rejet de cette classification, encore moins une critique globale de la chimie colloïdale. Significativement, Staudinger termine sa conférence sur un appel à une coopération accrue entre chimie organique et chimie colloïdale : « Ici [pour les colloïdes moléculaires], la chimie organique et la chimie colloïdale doivent travailler ensemble, pour éclaircir la nature de ces substances ».

Par contraste, son discours de remise de prix Nobel en 1953 occulte toute l'influence de la théorie colloïdale et place sur un piédestal la chimie organique de Kekulé. Les quelques références à la chimie colloïdale (« la doctrine colloïdale ») sont péjoratives⁵⁹. Dans la préface à la troisième édition de sa monographie *Organische Kolloidchemie* (chimie des colloïdes organiques, parue en 1950), Staudinger se démarque clairement de la chimie colloïdale, nie son apport, et présente l'étude des macromolécules comme une branche de la chimie organique, excluant la chimie colloïdale :

L'auteur considère ceci [le comportement viscosimétrique des colloïdes] comme un résultat important de ses recherches expérimentales, qui a conduit à considérer qu'un des groupes les plus importants des colloïdes organiques, les colloïdes moléculaires, ne doivent pas être étudiés au point de vue de la chimie colloïdale. Ce sont des solutions de combinaisons macromoléculaires et on ne peut les considérer comme des états accidentellement dispersés des corps en question. De plus, ces dispersions, et les phénomènes colloïdaux qui s'y rattachent doivent être étudiés d'après les méthodes de la

⁵⁷ Les classifications sont présentées en annexe B. STAUDINGER, *Chimie des colloïdes organiques*, Paris, Dunod, 1953 [1^{ère} édition allemande, 1940, traduction française par Henri Gibello] ; voir aussi le discours de Staudinger à la remise de son prix Nobel de 1953 : « Macromolecular chemistry », in *Nobel Lectures : chemistry 1942-1962*, Singapor, World Scientific, 1999, pp. 397-419

⁵⁸ STAUDINGER, « Sur la constitution des colloïdes moléculaires », *Bulletin de la Société Chimique de France*, vol. 49 (1931), pp. 1267-1279

⁵⁹ STAUDINGER, *Macromolecular chemistry*, *op. cit.*, p. 408

Chimie Organique, de sorte qu'à la chimie organique à bas poids moléculaire s'annexe une chimie colloïdale organique, la chimie des colloïdes moléculaires, ou corps macromoléculaires solubles, qui prolonge la chimie organique classique avec des méthodes nouvelles et élargies.⁶⁰

Il restera aux historiens futurs d'analyser jusqu'à quel point ce dénigrement de l'apport de la chimie colloïdale est une reconstruction dans l'après-guerre, une relecture des évènements partielle et hostile vis-à-vis de l'émulation autour de la chimie colloïdale dans la première moitié du siècle. Et, le cas échéant, de comprendre les raisons de ce dénigrement. Comme nous l'avons vu, l'historiographie de la biologie a dans un premier temps considéré l'apport scientifique de la chimie colloïdale au développement de la biologie comme restreint, voir comme un égarement.

Des considérations politiques peuvent expliquer partiellement ce dénigrement. En effet, la posture pacifiste et progressiste que Staudinger incarne pendant la tourmente nazie contraste avec certains de ses collègues de la chimie colloïdale qui ont adhéré au nazisme par idéologie ou par opportunisme⁶¹. Staudinger a toujours affiché ses convictions pacifistes depuis la Première Guerre mondiale, et a occasionnellement milité dans des cercles anti-militaristes. Cette posture, qu'il conserve courageusement en dépit de la détérioration consécutive aux élections de 1933, le contraint à s'isoler au sein de la communauté scientifique allemande, alors que les dirigeants placent aux postes clés des grandes institutions scientifiques des adhérents au parti. Parmi ces scientifiques qui s'alignent politiquement sur le nouveau régime nazi figurent les chimistes des colloïdes Wolfgang Ostwald et dans une plus grande mesure Kurt Hess ; ceux-ci critiquent les théories de Staudinger dans une charge qui devient plus personnelle. Hess, en particulier, essaie de mener les dirigeants nazis à expulser Staudinger de son poste à Freiburg, sans succès cependant. Il est possible que ces relations conflictuelles avec les grandes figures du mouvement des colloïdes pendant la période nazie aient enclin Staudinger à déconsidérer en bloc la chimie colloïdale dans l'après-guerre. Dans l'entre-deux guerres cependant, il est probable que les divergences sur la constitution des colloïdes restent circonscrites à des considérations scientifiques. « Contrairement à la "physique arienne", il n'y avait pas de "chimie arienne des polymères". On trouve peu de traces dans la chimie de Hess et d'Ostwald d'efforts pour combiner le contenu de leur science avec leur idéologie politique. Apparemment, leur position anti-macromoléculaire n'avait que très peu à voir avec l'idéologie Nationale Socialiste. En fait, ils ont utilisé de manière opportune leur affiliation politique avec le Parti, pour assurer ou améliorer leur position et leur statut académique »⁶².

⁶⁰ STAUDINGER, *Organische Kolloidchemie*, Braunschweig, Vieweg & Sohn, 3^{ème} édition 1950 [traduction française par Henri Gibello, *Chimie des colloïdes organiques*, Paris, Dunod, 1953], on notera les majuscules que Staudinger utilise pour « Chimie Organique »

⁶¹ Mary Jo NYE, *Before big science. The pursuit of modern chemistry and physics 1800-1940*, Cambridge (MA), Harvard University Press, 1996, pp. 196-197; Furukawa, *Inventing polymer science, op. cit.*, pp. 161-175 ; Furukawa, « Staudinger, Polymers, and political struggles », *Chemical Heritage*, vol. 11 (1993-1994), pp. 4-6

⁶² FURUKAWA, *Inventing polymer science, op. cit.*, p. 171

L'exemple de l'explication de la viscosité des colloïdes par Staudinger montre que chimie organique et chimie colloïdale s'interpénètrent alors que les chimistes se penchent de plus en plus massivement sur les matériaux colloïdes dans l'entre-deux guerres. Aussi, l'opposition entre la tradition « physicaliste » et celle incarnée par Staudinger – chimie organique classique remaniée pour tenir compte de la taille et de la forme des molécules – ne nous semble pas la plus judicieuse pour saisir l'ampleur des bouleversements qui agitent alors la chimie. Il semble plus important d'établir une opposition entre la tradition de la chimie organique classique et celle portée par l'interpénétration organique-colloïdale spécifique à l'entre-deux guerres, et dont Staudinger reflète une des possibilités. Ceci conduit à interpréter les débats sur les macromolécules comme une manifestation de la décomposition de l'« ontologie des matériaux » qui a assuré le succès de la chimie organique depuis trois-quarts de siècle, et qui est en passe d'être repensée de fond en comble sous la pression des études sur les colloïdes. Car même les colorants organiques, qui ont contribué à l'assise scientifique, technique et industrielle de la chimie organique « classique », sont en passe d'être abordés par la chimie colloïdale, par exemple chez Du Pont (cf. chapitre 3).

La distinction entre « structure interne » et « structure externe » de la (macro)molécule considérée par Staudinger comme facteur explicatif des propriétés de viscosité des colloïdes « moléculaires » résulte d'une évolution plus profonde et massive qu'une légère perturbation endogène à la chimie organique classique. Cette distinction témoigne effectivement, alors que Staudinger travaille à ces schèmes explicatifs, de la prégnance de deux modes d'appréhension et de compréhension de la dimension imperceptible des substances. Comme indiqué ci-dessus, pour certaines substances ou matériaux, la connaissance des éléments chimiques composant une substance, ou la structure (interne) des molécules de la substance au sein desquels ces éléments s'assemblent, est insuffisante pour rendre compte des propriétés de la substance, de sa dimension perceptible. La chimie colloïdale s'est progressivement construite autour du postulat que la répartition en *phases* de la matière qui constitue la substance, l'organisation (la « dispersion ») des entités microscopiques qui la composent – appelées micelles, phases, particules ou molécules..., était aussi importante que la nature chimique de ces phases. Un exemple tiré de l'histoire de la métallurgie au cours de cette période pendant laquelle cet autre mode s'impose et se diffuse à travers la chimie colloïdale, celui de l'alliage d'aluminium connu sous le nom de duralumine, permet de bien saisir l'écart qui sépare ces deux schèmes explicatifs. Comment expliquer que les propriétés mécaniques d'un même alliage, au cours des divers traitements thermiques et mécaniques subis, évoluent parfois radicalement, alors que sa composition chimique reste identique ?

Depuis 1902, Alfred Wilm (1869-1937) est un métallurgiste employé dans un centre de recherches lié à la production de matériel militaire pour l'armée allemande, près de Berlin. Wilm est initialement chargé de développer un alliage plus léger pour les munitions des armes à feu : il s'agit de remplacer le bronze utilisé pour la fabrication des cartouches. Il se tourne dans un premier temps vers les alliages d'aluminium, et essaye en particulier d'appliquer à ces alliages le même traitement thermique utilisé pour renforcer l'acier, connu sous le nom de trempe : le refroidissement rapide de l'alliage en fusion à une température bien en-dessous de

son point de fusion. Bien que plus léger, l'aluminium est un métal plus doux et ductile que le fer, et Wilm se rend rapidement compte que la trempe ne marche pas aussi bien sur les alliages d'aluminium que sur ceux du fer, et même que les alliages obtenus étaient parfois plus doux après la trempe qu'avant. En réexaminant ses échantillons quelques jours après la trempe, ce dernier réalise que la dureté de l'alliage s'est considérablement améliorée entretemps, bien que les échantillons n'aient subi aucun traitement particulier, laissé simplement à l'air libre et à température ambiante. Répétant ces expériences systématiquement, Wilm découvre que l'action de la trempe suivie d'un refroidissement lent, à température ambiante, est un procédé efficace pour renforcer les alliages d'aluminium ; il baptise les alliages d'aluminium produits par ce procédé « duralumine », et dépose un brevet en 1903. Pendant la Première Guerre mondiale, la duralumine est utilisée comme matériau pour la carlingue de certains avions, et appréciée du fait de sa légèreté. Elle ne sera pas utilisée dans les cartouches, cependant⁶³.

Intrigué par ce phénomène, Wilm spéculait sur les causes de ce renforcement par le lent refroidissement de l'alliage à température ambiante. La recherche en métallurgie a alors atteint le stade où les alliages sont systématiquement examinés au microscope, afin de détecter les différentes phases qui les constituent et de lier ces informations à leurs propriétés mécaniques (cf. section suivante). Armé de son seul microscope cependant, Wilm ne détecte aucune caractéristique microscopique particulière, et abandonne son ambition d'expliquer cette méthode de renforcement. L'explication « moderne », celle en tout cas auxquels les métallurgistes se réfèrent encore de nos jours, sera ébauchée quelques années après le brevet de Wilm, par des métallurgistes américains employés au Bureau des normes (*U.S. Bureau of Standards*). Ainsi, en 1919, Paul D. Merica (1889-1957), assisté de R.G. Waltenberg et H. Scott, remarquent qu'« aucune tentative n'a été proposée pour développer une explication des changements de propriétés physiques, en particulier mécaniques, des alliages pendant le vieillissement (« *aging* ») après un refroidissement rapide »⁶⁴. Entretemps, depuis le brevet de Wilm, la théorie colloïdale a gagné en maturité et pénètre parfois les territoires de la métallurgie. Aux États-Unis en particulier, Wilder D. Bancroft (1867-1953), prosélyte de la chimie colloïdale au sortir de la Première Guerre mondiale, défend la pertinence de cette spécialité pour l'étude des métaux⁶⁵. Visiblement avec un certain succès, car Merica et ses collaborateurs, cherchant à élaborer un « mécanisme » du procédé de renforcement par vieillissement (*age-hardening*), assimilent le jargon de la chimie colloïdale – *age-hardening* devient *dispersion-hardening* – et les schèmes associés sur l'explication des propriétés – les propriétés dépendent du « degré de dispersion », ou taille de particules :

Les quatre principales caractéristiques de la théorie originale de la duralumine, rappelle Merica en 1932, étaient les suivantes : (1) le renforcement par vieillissement est possible à cause de la nature de la relation entre solubilité et température du constituant

⁶³ Edgar A. STARK, « Precipitation hardening : from Alfred Wilm to the present », in J. HIRSCH *et al.* (eds.), *Aluminium Alloys. Physical and Mechanical Properties*, Weinheim, Wiley-VCH, 2008, pp. 3-13

⁶⁴ P. D. MERICA, R. G. WALTENBERG, and H. SCOTT, « Heat Treatment and constitution of duralumin », *Trans. AIME*, vol. 64 (1920), pp. 41-77, citation p. 61

⁶⁵ Wilder D. BANCROFT, « Colloid chemistry and metallurgy », *Trans. AIME*, vol. 66 (1922), pp. 604-617

responsable du renforcement ; (2) le constituant responsable du renforcement est CuAl_2 ; (3) le renforcement est causé par la précipitation de ce constituant dans une forme distincte de la dispersion atomique, et probablement dans une forme finement dispersée moléculaire, colloïdale ou cristalline ; (4) l'effet de renforcement du CuAl_2 dans l'aluminium était supposé être relié à sa taille de particule.⁶⁶

Merica établit ici une distinction entre « dispersion atomique » et dispersion colloïdale ou cristalline, et attribue l'effet de renforcement à la présence de ces particules « finement dispersées ». De plus, quantitativement l'effet de renforcement est mis en relation avec la taille des particules précipitées CuAl_2 . Le papier de 1919 met encore plus explicitement en avant cette dichotomie entre atome (ou molécule) et particule (ou phase) comme paramètre explicatif du renforcement :

Les changements qui ont lieu sont très marqués et irréversibles, et doivent correspondre à des changements irréversibles dans la structure et la constitution de l'alliage, ou au moins à des profonds changements moléculaires. Si nous ne sommes pas capables de montrer que des changements de phase ont lieu pendant le vieillissement (*aging*), nous devons alors attribuer ces changements de propriétés physiques à des altérations dans la structure atomique ou moléculaire.⁶⁷

Plus loin, les auteurs concluent qu'un changement de phase est la « cause active » du renforcement, et aussi que le changement de phase est induit par « la précipitation du CuAl_2 sous forme d'une dispersion colloïdale de très petites particules ». L'hypothèse est que la dichotomie introduite par ces auteurs dans cet exemple sur la duralumine, phase vs. structure moléculaire, est similaire voire identique à la dichotomie « structure interne »/« structure externe » introduite par Furukawa pour rendre compte de l'écart de Staudinger vis-à-vis de la chimie organique classique. Merica et ses collaborateurs tentent de « réduire » le phénomène de renforcement de la duralumine à la précipitation d'une phase dispersée CuAl_2 au sein de la matrice d'aluminium environnante. Les caractéristiques physiques de cette phase dispersée, son « degré de dispersion », influent sur le renforcement autant sinon davantage que sa nature chimique. De même, Staudinger et ses doctorants s'acharnent, expérimentalement et théoriquement, à « réduire » la complexité du phénomène de viscosité des substances polymérisées à la forme et à la taille de ses macromolécules. Les éléments chimiques composant la molécule sont moins importants dans cette tentative de réduction que les paramètres taille et forme. On assiste avec ces épisodes à la prégnance d'un nouveau schème explicatif des propriétés des alliages et des substances polymérisées, soutenu et amplifié par la phase de maturation de la chimie colloïdale dans le premier tiers du XX^e siècle : les propriétés des substances dérivent de leur structuration microscopique.

⁶⁶ MERICA, « The Age Hardening of Metals », *Trans. AIME*, vol. 99 (1932), pp. 13-54

⁶⁷ MERICA, SCOTT et WALTENBERG, *op. cit.* p. 61 ; pour une biographie de Merica, voir Zay JEFFRIES, « Paul Dyer Merica 1889-1957 », *Biographical Memoirs of the National Academy of Science*, vol. 33 (1959), pp. 226-239

Chimie organique et molécules

La métallurgie a développé des liens ténus avec la cristallographie, et en a importé la vision que cette dernière porte progressivement sur les cristaux au tournant du XIX^e siècle : le cristal est un agrégat de « molécules » identiques, dont l'arrangement est responsable de la forme cristalline qu'affecte le cristal. C'est pourquoi Merica et ses collaborateurs attribuent spontanément la cause du renforcement de la duralumine, si aucune autre caractéristique spécifique n'est détectée, à un changement dans sa « structure moléculaire ». La cristallographie, à travers sa conception moléculaire des cristaux, relie ainsi des domaines aussi dissemblables à première vue que la métallurgie et la chimie organique ; cette dernière s'étant constituée, comme mentionné ci-dessus, au cours des années 1820-1830 en assimilant certains principes cristallographiques. De la même manière que la forme cristalline est déterminée par la nature et l'empilement des « atomes » constituant la « molécule » représentative du cristal, les propriétés des substances manipulées par la nouvelle culture de la chimie organique sont déterminées par leur « constitution atomique ». C'est en tout cas l'expression utilisée par le chimiste français Charles Adolphe Wurtz (1817-1884), dans un rétrospectif de l'histoire et des acquis de la chimie organique, et qui du reste s'agence remarquablement avec la thèse développée par Klein et Lefèvre :

Une partie de la science était restée en dehors des efforts des chimistes et du système qui s'appliquait plus particulièrement aux composés inorganiques. La chimie organique se bornait alors à la description qualitative des principes extraits des produits d'origine végétale et animale. A la vérité, le génie des découvertes avait amassé de précieux matériaux, mais la science qui consiste à les ordonner n'était pas née. [...] Les éléments de cette coordination ne pouvaient être formés que par l'étude des métamorphoses des composés organiques. *Découvrir la constitution atomique de ces composés et par elle expliquer leurs propriétés et établir leurs relations, tel est le but de la chimie organique.* Déterminer la nature et le nombre de leurs atomes constituants, étudier leurs modes de formation, leurs métamorphoses, tels sont les moyens qu'elle met en œuvre. Ce grand travail ne commença réellement que vers 1830, et, à partir de cette époque, il fut poursuivi avec vigueur et succès.⁶⁸

Un ensemble de substances pour lesquelles ce principe explicatif des propriétés sur la base de leur constitution atomique et moléculaire a bien marché est celui des colorants. En 1876, le chimiste allemand Otto N. Witt (1853-1915), après un doctorant en chimie organique et dix années d'expérience dans l'industrie des colorants, propose le terme « chromophore » pour désigner les molécules ou les groupes caractéristiques d'atomes responsables de la couleur des colorants organiques⁶⁹. Dans le cas où les chimistes sont parvenus à « réduire » la couleur apparente d'un colorant à un chromophore, la transition entre la couleur d'un large échantillon du colorant et celle d'un seul chromophore est continue : « Le colorant est une des rares notions de la chimie à couvrir toute l'échelle, du microscopique ou macroscopique, sans grand

⁶⁸ Cité par François LEPRIEUR, *Les conditions de la constitution d'une discipline scientifique : la chimie organique en France 1820-1880*, Thèse de doctorat de l'université Paris I-Sorbonne, 1977, p. 203

⁶⁹ Aaron J. IHDE, *The development of modern chemistry*, New York, Harper & Row, 1964, p. 458

changement : la couleur reste à peu près la même pour une molécule isolée [...] que pour une assemblée nombreuse de molécules identiques, en solution ou déposées sur une fibre naturelle ou synthétique »⁷⁰. Cette appropriation des matériaux colorants par la chimie organique académique s'inscrit dans des enjeux techniques et industriels considérables. Lorsque Witt revient sur la théorie des colorants organiques, les relations entre universitaires et industrie des colorants deviennent plus ténues, et les laboratoires de recherche industriels s'appuient de plus en plus sur des chimistes organiciens formés au doctorat.

Au cours des trois dernières décennies du XIX^e siècle en effet, ce dogme de la chimie organique – les propriétés des substances dérivent des propriétés de leurs molécules – trouve un terrain d'expression fertile dans les laboratoires privés que les compagnies chimiques industrielles instituent progressivement. Ce dogme est particulièrement efficace dans le secteur des colorants organiques et des produits pharmaceutiques. Au cours de cette période la maîtrise des colorants organiques synthétiques va bouleverser l'industrie des colorants et par voie de conséquence le tissu socio-économique associé. Les recettes traditionnelles des teinturiers pour préparer leurs teintures à partir de colorants « naturels » sont dépassées par la production à grande échelle de colorants synthétiques développés par les grandes firmes comme BASF. La multitude des petits artisans qui caractérisait jusque-là la production des colorants cède la place à quelques grandes firmes qui se partagent la production et l'innovation dans les colorants synthétiques. La chimie organique académique a joué un rôle substantiel dans cette transition en fournissant les outils théoriques et l'expertise sur laquelle s'appuie cette multiplication des colorants synthétiques. Au cours du XIX^e siècle en effet celle-ci a axé son programme sur l'identification moléculaire des substances, leur reproduction en laboratoire, et l'enrichissement de cette palette de substances en les combinant entre elles pour obtenir des substances « artificielles »⁷¹.

Les colorants organiques et certains produits pharmaceutiques comme l'aspirine se sont bien prêtés au jeu des chimistes organiciens dans la mesure où ceux-ci sont parvenus à « réduire » la complexité du colorant naturel à une molécule simple, souvent cyclique ; inversement ils sont également parvenus à synthétiser ces molécules « chromophores » – facteurs de couleurs – à partir de résidus organiques abondants comme le goudron ou la houille, ce qui explique en partie pourquoi les teinturiers traditionnels ne pouvaient pas rivaliser économiquement avec les colorants synthétiques produits par les géants de l'industrie chimique. L'intensification des collaborations entre chimie académique et chimie industrielle a été une des conditions de cette transition vers les colorants synthétiques. La mise en place de laboratoires industriels permanents au cours de cette période en est une manifestation. En 1883, la firme allemande Hoechst qui jusque là commercialisait des colorants, lance une stratégie de diversification agressive vers les produits pharmaceutiques. Un laboratoire de recherche transversal à la compagnie, et dirigé par deux professeurs de chimie organique

⁷⁰ Entrée « Colorant » du *Trésor. Dictionnaire des sciences*, sous la direction de Michel SERRES et Nayla FAROUKI, Paris, Flammarion, 1998, pp. 170-1

⁷¹ Anthony S. TRAVIS, *The rainbow makers: the origins of the synthetic dyestuffs industry in western Europe*, Londres, Associated University Press, 1993

recrutés à l'université, est institué avec pour vocation la synthèse « rationnelle » de nouveaux médicaments, en s'appuyant sur les formules moléculaires structurales censées représenter le principe actif du médicament⁷².

L'historiographie a détaillé cet épisode et d'une manière générale l'a interprété comme une « scientification » des pratiques industrielles. La synthèse de l'alizarine – un colorant orange – par BASF en collaboration avec de nombreux chimistes académiques entre 1869 et 1871 est décrite par Aaron Ihde comme un « point de rupture » dans l'histoire de la chimie des colorants⁷³. La mise en place du premier laboratoire de recherche par BASF en 1874 est décrite par Carsten Reinhardt comme l'implantation d'une recherche « *science-oriented* », qui viendrait en complément de la recherche « *technology-oriented* » qui avait cours jusqu'alors dans les laboratoires des fabriques et ateliers⁷⁴. William Brock, dans une récente synthèse d'histoire de la chimie qui semble faire autorité, présente cet épisode comme le passage d'une ère « paléotechnique » à une ère « néotechnique »⁷⁵. L'historien des techniques Maurice Daumas, cependant, relativise cet apport des approches moléculaires-structurales dans l'essor industriel des colorants synthétiques qui caractérise cette période :

Malgré sa nouveauté et son apparence de technique à base scientifique, 45 ans après sa naissance l'industrie des colorants [synthétiques] ne semblait pas encore être sortie de l'ère traditionnelle des savonniers. Le fait que les couleurs d'aniline fussent rattachées au groupe du triphenylméthane et de ses dérivés ne servit peut-être pas beaucoup les efforts des laboratoires et des ateliers.⁷⁶

Cette évolution des rapports entre univers académiques et industriels pour la chimie organique se déploie également dans le secteur de la métallurgie, à peu près à la même période. À partir des années 1890, les grandes entreprises de métallurgie vont instituer des laboratoires de recherche au sein de leur compagnie, dont la vocation dépasse l'analyse et le contrôle de la qualité des alliages. La toute jeune discipline de la chimie physique propose de nouvelles approches pour appréhender/améliorer les alliages, principalement la pyrométrie et l'analyse des microstructures par microscope optique. Ces caractéristiques pyrométriques et microstructurales sont corrélées aux propriétés mécaniques et thermiques des alliages. Comme pour la chimie organique et le secteur des colorants et des produits pharmaceutiques, les circulations entre univers académiques et industrie métallurgique s'intensifient à partir des années 1880. À l'instar de nombreux historiens de la chimie, Nicole Chézeau interprète cette transition comme une scientification de l'industrie métallurgique, une « inversion de la

⁷² Ernst HOMBURG, « The emergence of research laboratory in the dyestuffs industry, 1870-1900 », *British Journal for the History of Science*, vol. 25 (1992), p. 102

⁷³ IHDE, *The development of modern chemistry*, *op. cit.*, pp. 454-458

⁷⁴ Carsten REINHARDT, « An instrument of corporate strategy : the central research laboratory at BASF 1868-1890 », in E. HOMBURG *et al.* (eds.), *The Chemical Industry in Europe, 1850-1914: Industrial Growth, Pollution, and Professionalization*, Kluwer Academic Publishers, 1998, pp. 239-259

⁷⁵ William BROCK, *The Fontana History of Chemistry*, New York, W.W. Norton & Co., 1993, pp. 293-310 & 640-3

⁷⁶ Maurice DAUMAS, *Histoire générale des techniques*, tome 4, chapitre 3 « Sciences et techniques chimiques », p. 584

relation science-technique », « les innovations reposant, de plus en plus, sur de nouvelles avancées scientifiques en physique du solide »⁷⁷.

Pour beaucoup de matériaux cruciaux pour l'industrie et en particulier pour les alliages, l'approche moléculaire structurale qui fonde les pratiques de la chimie organique est stérile car le concept de « molécule » pour ces matériaux ne fait pas sens. Aussi, lorsqu'à partir du milieu du XIX^e siècle l'industrie métallurgique se dote de laboratoires *d'analyse* pour introduire les méthodes modernes de chimie analytique afin de déterminer systématiquement la composition chimique de ses alliages et matériaux, les chimistes et ingénieurs métallurgistes sont surpris de constater que deux alliages de même composition chimique présentent des propriétés mécaniques très différentes. Ce constat, qui va à l'encontre du dogme de la chimie du XIX^e siècle, a selon Nicole Chézeau et Cyrus Smith précipité l'introduction de laboratoires industriels de *recherche* pour développer d'autres approches visant à rendre compte et apprivoiser les propriétés mécaniques des alliages. Mettant de côté la composition chimique comme variable explicative des propriétés mécaniques, ces approches ont privilégié l'étude des rapports entre microstructures et propriétés perceptibles des alliages. L'introduction du microscope optique est donc systématique dans ces laboratoires à partir des années 1890 en Europe et 1900 aux Etats-Unis. Ces analyses microstructurales permettent de distinguer des différences dans des alliages de même composition chimique, en termes de disposition mutuelle des phases ou de taille des « grains » qui composent ces phases.

Ainsi les deux modes d'explication des propriétés dégagés au paragraphe précédent sont mobilisés dans l'industrie dès les années 1870 et accompagnent l'institution des premiers laboratoires de *recherche* industriels, dotés d'une relative autonomie vis-à-vis de la production. Cette mobilisation se fait un peu plus tardivement cependant pour le réductionnisme microstructural, « physico-mécanique », selon l'expression de Furukawa. Le mouvement des colloïdes ne semble jouer, dans un premier temps et en l'état de l'historiographie, aucun rôle dans la mobilisation industrielle de ce réductionnisme microstructural. L'essor de la chimie colloïdale dans la période de l'entre-deux guerres va en revanche bouleverser et démultiplier la portée de ce réductionnisme, non seulement dans la métallurgie mais dans d'autres secteurs industriels. Elle apporte une vision cohérente et une théorie générale qui met l'accent sur ces microstructures. En pratique, la résolution du microscope optique est limitée à deux dixièmes de micron, ce qui ne permet pas de plonger très loin dans les micro-mondes. La chimie colloïdale jouera un rôle substantiel dans le développement d'une instrumentation de pointe pour explorer plus en avant ces micro-mondes et donc renforcer la portée du réductionnisme microstructural.

⁷⁷ Nicole CHEZEAU, *De la forge au laboratoire – naissance de la métallurgie physique*, Presses Universitaires de Rennes, 2004 ; C.S. SMITH, *interaction, op. cit.*, et *A history of metallography, op. cit.*

Chapitre 2. INSTRUMENTS ET METRIQUE : LE MOUVEMENT DES COLLOÏDES ET LA MESURE DES MICRO-MONDES

Changer d'unité exige une transformation lourde et dure de la vision et de la maîtrise du monde, puisque nous nous assurons le plus souvent de cette maîtrise au moyen de la métrique. Puisque penser veut dire peser, pouvons-nous même penser sans ces formats ?

Michel Serres¹

Dans le chapitre précédent, nous avons mis en avant la redéfinition du territoire des colloïdes qui s'opère au début du XX^e siècle. Des propriétés de diffusion établies par Graham, c'est-à-dire phénoménologiques, la structure microscopique des colloïdes devient la caractéristique essentielle pour les définir. Nous avons également avancé que cette redéfinition des colloïdes s'inscrit dans un bouleversement plus large de l'« ontologie des matériaux » qui structure la chimie du XIX^e siècle, et qui caractérise en particulier la chimie organique. Au cours de ces bouleversements, chimie organique et chimie colloïdale se confrontent sur la structure microscopique des colloïdes. De cette interpénétration entre ces deux traditions disciplinaires émerge une nouvelle signification de ce que le concept de « molécule » signifie, en particulier à travers la diffusion d'un de ses concepts dérivés, celui de « macromolécule ».

Dans ce chapitre, nous souhaitons reprendre cette histoire en insistant particulièrement sur les moyens instrumentaux mis en œuvre pour explorer ces microstructures ou ces micro-mondes, pour les quantifier et les doter d'unités métriques. Le « monde » des colloïdes selon Wolfgang Ostwald, est celui des « dimensions négligées », entre un et cent « micromicrons »². Cette formule d'Ostwald a souvent été reprise dans l'historiographie des colloïdes, sans toutefois peut-être assez insister sur l'originalité que constitue alors la pensée des micro-mondes comme relevant de dimensions, pouvant être mesurés, ni sur la nouveauté de cette unité métrique, le micromicron (symbole $\mu\mu$, vite remplacée par l'unité millimicron, symbole $m\mu$). Une autre unité métrique est détournée de son ancrage initial en spectroscopie des radiations cosmiques et également appropriée pour mesurer les micro-mondes : l'angström. Ce changement d'unité, pour reprendre Michel Serres cité en exergue à ce chapitre, « exige une transformation lourde et dure de la vision et de la maîtrise du monde ».

¹ Michel SERRES. *Jules Verne, la science et l'homme contemporain. Conversations avec Jean-Paul Dekiss*, Paris, Le Pommier, 2003, p. 124

² Wolfgang OSTWALD, *Die Welt der vernachlässigten dimensionen*, Dresden et Leipzig, Verlag von Theodor Steinkopff, 1915 [traduction anglaise par Martin H. Fischer, *An introduction to theoretical and applied colloid chemistry : the world of neglected dimensions*, New York, John Wiley & Sons, 1917]

Cette transformation de la vision et de la maîtrise du monde est en partie provoquée par les débats sur la « réalité moléculaire », qui prennent une acuité brûlante au tournant du siècle, et traversent l'ensemble des sciences physiques, y compris la chimie colloïdale. Si les atomes et les molécules existent réellement, alors on doit pouvoir mesurer leur taille et leur forme. L'historienne Mary Jo Nye a montré que le physico-chimiste français Jean Perrin (1870-1942) a joué un rôle essentiel dans ces débats, « en démontrant que la discontinuité de la matière n'était pas une hypothèse métaphysique, comme bien des anti-atomistes l'affirmaient, mais qu'elle était une hypothèse physique pouvant être soumise à la vérification expérimentale »³. Pour mener à bien cette entreprise, Perrin a fait appel à la chimie des colloïdes et en particulier à un instrument que ce domaine vient d'enfanter, l'ultramicroscope. Quelques années après, Svedberg, fasciné par les expériences de Perrin et l'ultramicroscope, invente un autre instrument pour mesurer les particules colloïdales, qu'il baptise ultracentrifugeuse. Encore un peu après, la réalité moléculaire appropriée sur le terrain de la catalyse par le physico-chimiste américain Irving Langmuir (1881-1957) débouche sur une autre méthode générique pour mesurer la morphologie des petites particules, méthode appelée « BET ».

Il est significatif que les mesures des atomes, des particules colloïdales et de la taille et de la forme des molécules se multiplient à peu près simultanément, en dépit de la diversité des échelles métriques qu'elles mobilisent. Ainsi Mary Jo Nye note la convergence des entreprises de Langmuir, Perrin et Svedberg vers la quantification des discontinuités, même si Langmuir s'est concentré sur les molécules les plus simples, et Svedberg sur les petites particules et les grosses molécules : « Les Travaux de Langmuir [...] répondaient précisément aux préoccupations récentes en chimie physique, notamment celles du physico-chimiste Suédois Theodor Svedberg concernant l'établissement des dimensions moléculaires et ce qui allait être désigné par 'réalité moléculaire', c'est-à-dire, une image visuelle simple, cinétique-mécanique, en physique et en chimie »⁴. Comme nous le verrons également, le microscope électronique est également historiquement lié à ce mouvement des colloïdes. L'objet de ce chapitre est d'explorer l'émergence de ces instruments qui accompagnent l'essor de la chimie colloïdale et sont concomitants à ces bouleversements sur l'ontologie des matériaux et de la matière. Quels acteurs développent ces instruments ? Quelle(s) institution(s) les hébergent ? Quelles questions se posent-ils, qu'est-ce qui les anime ? Comment s'y prennent-ils ?

³ Mary Jo NYE, *Molecular Reality. A perspective on the scientific work of Jean Perrin*, New York, American Elsevier, 1972, pp. 1-2 ; voir aussi, pour une étude plus récente, Charlotte BIGG, « Evident atoms : visuality in Jean Perrin's Brownian motion research », *Studies in History and Philosophy of Science*, vol. 39 (2008), pp. 312-322

⁴ Mary Jo NYE, « At the Boundaries : Michael Polanyi's Work on Surfaces and the Solid State », in Carsten Reinhardt (ed.), *Chemical Sciences in the Twentieth Century*, Weinheim, Wiley VCH, 2001, pp. 246-257, citation p. 250

L'ultramicroscope, le millimicron et la réalité moléculaire

Elaboré par deux savants allemands entre avril 1901 et octobre 1902, l'ultramicroscope est le premier instrument à donner à « voir » certains éléments des micro-mondes que le microscope optique classique est impuissant à résoudre⁵. Son avènement résulte d'une configuration institutionnelle et scientifique favorable aux entreprises risquées en optique de précision. L'ultramicroscope émerge de deux décennies de coopérations entre l'acteur industriel allemand le plus réputé en microscopie – la firme Carl Zeiss – et le fabricant de verres Schott & Co., tous deux situés à Iéna (Jena), dans le Thuringe. Toutefois ce contexte industriel d'alliance entre verrier et opticien qui prélude à l'ultramicroscope ne doit pas conduire à sous-estimer l'action d'un chimiste en particulier, doté de motivations qui lui sont propres et distinctes de celles de ces firmes, dans l'alignement des facteurs qui ont concouru à cet avènement.

Quelques années avant qu'il ne se lance dans l'assemblage d'un ultramicroscope, le chimiste Zsigmondy travaille dans la fabrication de verres colorés, les verres « rubis à l'or » (*gold ruby glass*). Ces verres sont alors appréhendés comme des substances colloïdales, mais les chimistes et artisans verriers peinent à comprendre et à expliquer les fascinantes propriétés optiques de ces verres. Les techniques physico-chimiques modernes ont décelé la présence de ce qui sera bien après Zsigmondy appelé « nanoparticules » dans ces verres et vitraux utilisés parfois depuis l'Antiquité⁶, ce qui témoigne d'une longue tradition artisanale et industrielle associée à ces (nano)matériaux. Ce qui se joue avec Zsigmondy et l'ultramicroscope est la *prise de conscience* de la présence de petites particules dans ces matériaux séculaires et que ces particules sont responsables de la coloration des verres, ce qui ouvrira la voie à la manipulation consciente et délibérée de ces particules pour performer sur ces verres. L'ambition de Zsigmondy cependant dépasse largement le domaine scientifique et technique des verres rubis à l'or ; ces matériaux lui servent de tremplin pour s'inscrire – et parfois trancher – dans des débats scientifiques qui lui sont contemporains sur la discontinuité des colloïdes et de la matière en général, débats qui se dénouent dans un même mouvement. L'ultramicroscope et la quantification *absolue* de la taille de ces particules qu'elle engendre occupent une place essentielle dans ce dénouement.

⁵ L'historien David CAHAN a réalisé une étude détaillée de l'avènement de l'ultramicroscope (« The Zeiss Werke and the ultramicroscope : the creation of a scientific instrument in context », in J. BUCHWALD (ed.), *Scientific credibility and technical standards in 19th and early 20th century Germany and Britain*, Boston, Kluwer, 1996, pp. 67-115). Toutefois la présente section de chapitre est animée de questions originales vis-à-vis de Cahan, qui s'attache à replacer l'ultramicroscope dans son contexte industriel.

⁶ Trinitat PRADELL *et al.*, « Technology of Islamic lustre », *Journal of Cultural Heritage*, vol. 9 (2008), pp. e123-e128; S. BIANCHIN *et al.*, « Medieval and renaissance glass technology in Valdelsa (Florence). Part 3 : vitreous finds and crucibles », *Journal of Cultural Heritage*, vol. 6 (2005) pp. 165-182

Zsigmondy et l'hétérogénéité des solutions colloïdales

Richard Adolf Zsigmondy (1865-1929) étudie d'abord la chimie organique et obtient son doctorat en 1889 à l'université d'Erlangen. Ses préférences scientifiques le portent par la suite à travailler pendant une année avec un physicien de l'université de Berlin, August Kundt, ce qui détonne pour un jeune docteur en chimie organique. Zsigmondy a avant tout été attiré par la chimie inorganique, mais le prestige et le potentiel attracteur de la chimie organique sont alors tels à cette époque en Allemagne qu'il s'est probablement laissé glisser sur la plus grande pente de la chimie organique. Sous l'autorité de Kundt à Berlin, Zsigmondy est introduit à la préparation des couleurs lustrées (*luster colours*) dans les verres et porcelaines. Ces lustres sont composés de minces feuilles d'or, parfois sous la forme d'alliages avec d'autres métaux comme le bismuth ou le titane. Découvrant que le traitement thermique du verre ou de la porcelaine est aussi déterminant pour sa couleur que sa composition chimique, Zsigmondy est conduit à mettre de côté l'approche chimique classique de ces verres et à s'appropriier la chimie colloïdale pour tenter d'appréhender les remarquables propriétés de ces lustres⁷. Les chimistes et praticiens de ces matériaux savaient alors que l'or en leur sein se trouve dans un état « finement divisé », relevant de ce fait du domaine des colloïdes. L'expérience accumulée dans l'étude des verres le mène par la suite à un poste d'enseignant spécialiste des technologies du verre à l'école supérieure technique de Graz (*Technische Hochschule*) en 1893 et ensuite à un poste de chimiste industriel chez le verrier Schott & Co. à Iéna en 1897. Zsigmondy s'occupe alors de la production et de l'étude des verres colorés.

Au cours de ces changements institutionnels, Zsigmondy reste passionné par ce thème des colloïdes, et s'imprègne de la littérature sur le domaine. Il y découvre en filigrane les doutes qui travaillent les chimistes qui se sont penchés sur les colloïdes depuis la grande partition opérée par Graham : qu'est-ce qui différencie, à un niveau microscopique, un colloïde d'un « cristalloïde » ? Les solutions colloïdales comme l'albumine ou les belles solutions colorées d'or dissolu, qui semblent macroscopiquement homogènes, sont-elles homogènes comme les solutions cristalloïdes tel le sel dissous, ou hétérogènes à partir d'un certain niveau d'observation ? Mais aussi, questionnement crucial pour l'élaboration de l'ultramicroscope : à quoi attribuer la propension de ces solutions colloïdales à exhiber l'« effet Tyndall », c'est-à-dire la diffraction de la lumière qui traverse ces solutions en de petites taches lumineuses polarisées et visibles à l'œil nu ? Zsigmondy est convaincu que cet effet Tyndall permettrait justement de trancher sur la question de l'hétérogénéité des colloïdes : les petites taches lumineuses diffractées par ces solutions colloïdales témoignent de leur hétérogénéité optique, hétérogénéité optique qui suppose à son tour la présence d'éléments hétérogènes à la solution bien qu'intimement mêlés à celle-ci. La validité de ce raisonnement est cependant minée par l'incertitude sur les causes de cet effet Tyndall : est-il provoqué par des « particules » colloïdales très fines, ou bien par des particules plus grossières que contiennent parfois les solutions colloïdales, mais qui ne sont pas responsables

⁷ Pour la biographie de Zsigmondy, voir CAHAN, *The Zeiss Werke and the Ultramicroscope*, op. cit., pp. 87-8 ; voir aussi sa notice biographie sur le site Internet du prix Nobel [http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1925/zsigmondy-bio.html, accédé le 08/12/07]

des propriétés de ces solutions ? En d'autres termes, l'effet Tyndall est-il une caractéristique essentielle ou accessoire des solutions colloïdales ?

Ces questionnements ont certainement contribué à la décision de Zsigmondy de quitter son poste à Schott & Co. en 1900 pour s'installer à son compte en expert des lustres et verres colorés, et plus généralement en chimiste indépendant. La nature de son travail à Schott ne lui permet pas de mener à bien les expériences qu'il conçoit pour répondre à ces interrogations. Devenu expert indépendant, Zsigmondy fait appel à un collègue physicien de la firme Carl Zeiss, Henry Siedentopf (1872-1940), afin qu'ils collaborent sur un nouveau type de microscope fondé sur cet effet Tyndall. Zsigmondy a probablement rencontré Siedentopf alors qu'il travaillait à Schott ; le verrier d'Iéna est en effet une excroissance de Zeiss, et fournit des verres de haute qualité aux microscopes que celui-ci commercialise. Aussi les échanges étaient nombreux entre Zeiss et Schott depuis l'institution formelle de cette dernière en 1882. Au tournant du siècle, Zeiss a déjà acquis une stature industrielle considérable dans l'optique de précision en grande partie grâce au travail du physicien d'Iéna Ernst Abbé (1840-1905) qui bouleverse à partir de 1870 la conception et la production des microscopes et fait embaucher de nombreux autres physiciens par la firme à partir de 1898, dont Siedentopf. Le succès du travail d'Abbé au sein de la firme Zeiss incline ses dirigeants à parier sur la recherche et à encourager le développement d'innovations radicales dans la microscopie. Ainsi Zeiss, sans embaucher formellement Zsigmondy, laisse celui-ci exploiter le matériel de ses laboratoires et fait travailler Siedentopf sur son projet. L'ambition est de réaliser un dispositif pour magnifier les taches lumineuses de l'effet Tyndall, c'est-à-dire de magnifier la lumière non pas transmise par l'objet à magnifier, mais diffractée. L'objectif du microscope est alors positionné à la perpendiculaire de la source lumineuse qui éclaire l'objet à magnifier :

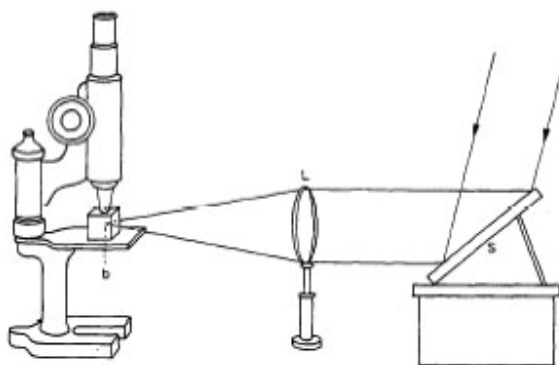


Figure 2.1 — Schéma de l'ultramicroscope utilisé par Zsigmondy

Source : [<http://www.curiosphere.tv/.../img/microZsigmondy.jpg>, accédé le 12/06/09]

A partir de 1901 Zsigmondy et Siedentopf travaillent sur ce dispositif et fin 1902 le premier ultramicroscope donne des images focalisées. Zsigmondy a alors réussi à synthétiser – grâce à ses contacts industriels – des solutions colloïdales d'or assez peu dispersées pour éviter la formation de particules grossières, qui sédimentent. Comme le spectacle des étoiles par une nuit claire, de minuscules points lumineux apparaissent à l'objectif, ce que Zsigmondy

interprète comme une preuve définitive de la présence de fines particules, invisibles au microscope optique classique, dans ses solutions colloïdales d'or ; autrement dit, ces solutions sont hétérogènes :

Grâce à l'ultramicroscopie j'étais capable de trancher sur la question [de l'hétérogénéité des colloïdes] en faveur de la position tenue par Faraday, Bredig et d'autres [les colloïdes sont des particules solides, et non des molécules]. Il était clair que les particules d'or qui provoquent la couleur rouge de la solution colloïdale, sont les mêmes que celles qui polarisent la lumière.

C'est le récit que Zsigmondy fait de son travail peu après l'invention de l'ultramicroscope, dans ce qui va s'avérer une des premières monographies sur les colloïdes et publiée en 1905⁸. Ce récit témoigne de la confluence de ses pratiques industrielles sur les verres rubis à l'or avec ses interrogations plus vastes sur la nature des colloïdes, dans les motivations qui engendrent l'ultramicroscope : un chapitre est dédié aux relations entre taille de particules et couleur du verre rubis, tandis que la problématique générale du livre se concentre sur la preuve expérimentale de l'hétérogénéité des solutions colloïdales⁹. En « rendant visible des particules ultramicroscopiques » (un leitmotiv de son ouvrage), Zsigmondy apporte la preuve que les solutions colloïdales sont constituées de petites « particules », contrairement aux solutions de « cristalloïdes » qui elles, sont constituées de « molécules » qui n'exhibent pas d'effet Tyndall. Il contribue ainsi décisivement à distinguer microscopiquement les colloïdes des cristalloïdes, et donc à asseoir la légitimité de l'étude des colloïdes comme discipline parmi les chimistes. Sa reconnaissance scientifique locale est très rapide, et Zsigmondy obtient la chaire de chimie inorganique de l'université de Göttingen en 1907. Mais le prix Nobel pour l'invention de l'ultramicroscope et la preuve de l'hétérogénéité des colloïdes ne lui revient qu'en 1925. Plus proche de notre problématique cependant, ces expérimentations sur l'hétérogénéité des colloïdes s'accompagnent de la quantification absolue de la taille des particules colloïdales et de l'institution d'une nouvelle unité métrique, le « micromicron ».

Nouvelle unité métrique et nouvelle ontologie des matériaux

A l'aide d'un raisonnement géométrique simple, Zsigmondy parvient à déduire du nombre de particules d'or dans un petit volume, qu'il compte laborieusement, la taille moyenne de ces particules. Il exprime ces données non pas en microns, qui est la norme pour les travaux en microscopie, mais en « micromicrons » (symbole $\mu\mu$), qu'il introduit comme un millième de microns ou un millionième de millimètre¹⁰. Les particules qu'il mesure ont alors une taille comprise entre 6 et 200 « $\mu\mu$ », soit entre 6 et 200 nanomètres pour utiliser l'unité en vigueur de nos jours. Le micron (symbole μ) est introduit à peine trois décennies avant l'introduction

⁸ Richard ZSIGMONDY, *Zur Erkenntnis der Kolloide. Über irreversible hydrosols und ultramicroscopie*, Jena, Gustav Fischer, 1905 ; traduction anglaise par Jerome Alexander, *Colloids and the ultramicroscope. A manual of colloid chemistry and ultramicroscopy*, New York, John Wiley, 1909 ; citation extraite de l'édition américaine de 1909, p. 93

⁹ *Ibid.*, chap. XI pour les liens entre taille et couleur, et Introduction et chapitre I pour la problématique générale.

¹⁰ *Ibid.* p. 20

du micromicron. Il est proposé par les chercheurs industriels et universitaires qui manipulent le microscope au début des années 1870 pour désigner un millième de millimètre. Cette unité est rapidement appropriée pour manipuler des longueurs simples (entre 1 et 1000 μ) au microscope. Le système métrique est alors en voie d'implantation en France, et surtout, en phase d'internationalisation. Il est politiquement promu à partir de la monarchie de Louis-Philippe, et devient officiellement l'unique système de longueur reconnu à partir du premier janvier 1840. Le système métrique s'internationalise officiellement en 1875, lors de la tenue de la Conférence diplomatique du Mètre à Paris, à laquelle 20 états sont représentés. Cette conférence aboutit à la signature du traité connu sous le nom de la Convention du Mètre, dans lequel les états signataires s'engagent à fonder et à entretenir le Bureau International des Poids et des Mesures, dont la mission initiale est d'établir et de conserver les prototypes du mètre et du kilogramme. La mission du Bureau s'est par la suite élargie à d'autres activités de métrologie, ainsi qu'à l'établissement des constantes physiques qui conditionnent les mesures. En 1879 le micron est adopté par la Commission Internationale des Poids et des Mesures, officialisant son existence et son usage dans les instances internationales¹¹.

L'usage scientifique et technique du microscope optique est alors en phase d'intensification. Les ventes de microscope de la firme Zeiss par exemple augmentent rapidement entre 1870 et 1890¹². Le microscope devient peu à peu un instrument incontournable du laboratoire de recherches et d'analyses en métallurgie¹³, ainsi qu'en biologie et en particulier, au sein de la cytologie¹⁴. L'apparente homogénéité des protoplasmes cellulaires, y compris à l'échelle d'observation rendue possible par le microscope, semblait incompatible avec la grande diversité des fonctions et des capacités cellulaires. L'expansion de la cytologie à partir du milieu du 19^{ème} siècle a amené les biologistes à spéculer sur les relations structure/fonction à une échelle sub-microscopique. Ce n'est pas par hasard que le nom « ultramicroscope » a été suggéré à Zsigmondy pour son invention par l'éminent bactériologiste allemand Emil von Behring (1854-1917), lauréat du premier prix Nobel de médecine en 1901. Von Behring et Siedentopf vont en effet très vite magnifier des bactéries à l'aide de l'ultramicroscope¹⁵. Le préfixe « ultra » accolé à « microscope » fait également parfaitement sens pour décrire cette invention : *Ultra* signifie, en latin, « au-delà de... ». Précisément, un des sens de *ultra* « indique qu'on est au-delà de la mesure ou de la quantification habituelle pour un phénomène, une réaction »¹⁶. Ainsi von Behring, en choisissant *ultramicroscope* vers 1903 pour nommer le dispositif inventé par

¹¹ Henri MOREAU, *Le système métrique. Des anciennes mesures au Système International d'Unités*, Paris, Chiron, 1975

¹² Entre 1856 et 1870, la firme produit 1237 microscopes, tandis que pour la période plus courte 1885-1886 la production atteint 1459 unités ; cf. Cahan, *op. cit.*, pp. 75-6

¹³ Nicole CHEZEAU, *De la forge au laboratoire – naissance de la métallurgie physique*, Rennes, Presses Universitaires de Rennes, 2004

¹⁴ Neil MORGAN, « The Strategy of Biological Research Programs: Reassessing the 'Dark Age' of Biochemistry 1910-1930 », *Annals of Science*, vol. 47 (1990), pp. 139-150, p. 142; Grame GOODAY, « 'Nature' in the Laboratory: Domestication and Discipline with the Microscope in Victorian Life Science », *The British Journal for the History of Science*, vol. 47, n°3 (1991), pp. 307-341

¹⁵ ZSIGMONDY, *Colloids and the ultramicroscope*, *op. cit.*, p. 109

¹⁶ CNRS, *Trésor de la langue Française*, Paris, Gallimard, 1994, tome 16, p. 788

Zsigmondy et Siedentopf, signifie que ce nouveau microscope permet de mesurer ce qui n'est pas mesurable habituellement, ce qui sort de la mesure. La microscopie avait en effet ouvert, depuis le XVII^e siècle, une voie de perception et de connaissance « directe » des micro-mondes. Ses limites ont été essentialisées en une frontière incarnant pendant plusieurs siècles la limite entre le perceptible et le non-perceptible. *Au-delà*, toute connaissance ne peut s'obtenir que par inférence et la quantification est plus hasardeuse. En reculant cette frontière à quelques millièmes de microns, l'ultramicroscope provoque une brèche dans cette frontière et permet de quantifier des longueurs qui n'étaient pas quantifiables jusque là, qui sortaient de la mesure.

Cette extension de la prise sur les micro-mondes et cette focalisation sur la taille des particules colloïdales mène Zsigmondy à remodeler la dichotomie colloïde/cristalloïde établie par Graham. Alors que la classification de Graham des substances colloïdales s'est opérée sur la base de leur comportement macroscopique (diffusent lentement, ne cristallisent pas), Zsigmondy remanie cette classification en se fondant sur les caractéristiques microscopiques des substances : la taille des particules devient un critère pour distinguer les cristalloïdes des colloïdes d'une part, et les colloïdes des suspensions non colloïdales d'autre part :

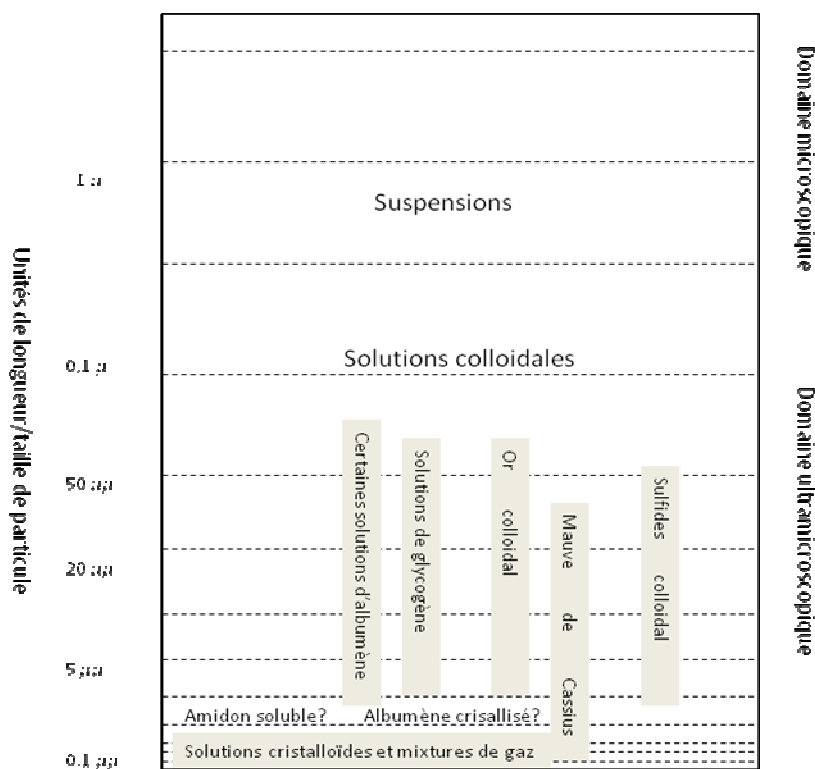


Figure 2.2 — Classification des solutions de Zsigmondy

Celui-ci s'est inspiré des classifications des sables, cailloux et rochers distinguées par leur taille, effectuées par les géologues peu avant. Substances indiquées verticalement : celles dont la taille de particules peut varier sur une certaine gamme. Substances écrites horizontalement : la taille de particule est fixe. Source : ZSIGMONDY, *Colloids and the ultramicroscope, op. cit.*, p. 27

De la discontinuité des colloïdes à la discontinuité de la matière

L'ultramicroscope, et l'unité associée le micromicron, se diffusent très rapidement de l'étude de la bactériologie et des colloïdes vers la chimie physique *mainstream*. Car le débat restreint sur l'hétérogénéité des colloïdes n'est qu'une pièce du puzzle sur la réalité moléculaire que chimistes, physico-chimistes (la jeune discipline hybride) et physiciens essayent de compléter une bonne fois pour toutes au tournant du siècle. Jean Perrin, éminent physico-chimiste français, jouera durant la première décennie du siècle un rôle essentiel dans ce puzzle, aidé de l'ultramicroscope¹⁷. Plutôt que l'« hétérogénéité » employée par les acteurs des colloïdes, le débat sur la réalité moléculaire se pose plutôt en terme de « continuité »/« discontinuité » de la matière. Zsigmondy a conclu de ses expériences qu'il n'y avait pas de transition abrupte entre les « particules » colloïdales et les « molécules » des cristalloïdes. Puisque les solutions colloïdales sont hétérogènes, et qu'il n'y a pas de transition abrupte entre les colloïdes et les cristalloïdes, alors les cristalloïdes sont également des substances hétérogènes, c'est-à-dire constituées d'éléments dispersés identifiables et mesurables. Dit autrement, toutes les solutions sont discontinues, malgré leur apparence homogène et l'intuition que l'on peut prélever une partie sans cesse plus petite de la solution sans jamais s'arrêter. Cela signifie que les molécules existent comme les particules colloïdales existent, c'est-à-dire visuellement, « réellement ».

La démarche générale de Perrin pour établir expérimentalement la réalité moléculaire est de collectionner les expériences qui permettent de déterminer une valeur de N , le nombre d'Avogadro. Une des expériences élaborées par Perrin concerne les émulsions colloïdales de gomme-gutte, dont il détermine la répartition des grains dans des colonnes verticales, et leur taille. Ces grains de gomme-gutte sont en effet soumis au mouvement brownien, qui, dans la perspective de la réalité moléculaire, est interprété comme l'agitation moléculaire perturbant les particules colloïdales. Cette expérience est cruciale dans la démonstration de Perrin, et la valeur de N qu'il obtient converge avec les valeurs expérimentales des autres expériences. Cette convergence est alors censée montrer que N correspond à une grandeur universelle de la matière, soit le nombre d'atomes ou de molécules contenues dans une quantité prédéfinie de matière, appelée « mole ». En même temps que le dix millionième de centimètre (10^{-7} cm), Perrin utilise également le micromicron dans ses calculs¹⁸. Ainsi cette unité va également se diffuser parmi les autres domaines des sciences physiques, et en particulier en chimie physique. En 1913, L'Association internationale des sociétés de chimie (*International Association of Chemical Societies*) rassemblée à Bruxelles prend acte de cette diffusion et promeut son utilisation : « La Commission reconnaît que le symbole $\mu\mu$ ($= \mu \times 10^{-3}$) n'est pas strictement logique, mais recommande qu'il soit conservé étant donné l'universalité de son usage »¹⁹. L'Association internationale des sociétés de la chimie a pour vocation de clarifier et standardiser la nomenclature et la terminologie au sein des chimistes. Elle sera remaniée en 1919 et renommée Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée (mieux connue sous

¹⁷ Cf. NYE, *Molecular reality*, op. cit. et BIGG, *Evident atoms*, op. cit.

¹⁸ PERRIN, *Les atomes*, Paris, Flammarion, 1991 [reprend textuellement la première édition de 1913], p. 94

¹⁹ Cité dans *JACS*, vol. 36, n°1 (1914), p. 79

l'acronyme anglais IUPAC) qui continue jusqu'à nos jours à arbitrer et à uniformiser la nomenclature chimique. Pour plus de cohérence dans la notation, comme le laisse entendre la Commission, le symbole $\mu\mu$ sera rapidement abandonné au profit du « millimicron » ($m\mu$) et les chimistes des colloïdes vont continuer à faire usage de cette unité jusqu'au milieu des années 1930 environ. Le millimicron ne sera jamais reconnu par la Commission Internationale des Poids et des Mesures, ce qui indique que son utilisation est moins répandue que le micron.

The Svedberg et l'ultracentrifugeuse

Alors que Perrin se lance dans les expériences décisives sur la réalité moléculaire, The Svedberg est fasciné par celles-ci et par les possibilités scientifiques qui s'ouvrent avec l'ultramicroscope. Cherchant initialement d'autres voies pour démontrer la réalité moléculaire, Svedberg s'acharne par la suite à perfectionner les techniques de centrifugation pour sonder les micro-mondes ; une nouvelle instrumentation générique qu'il baptise « ultracentrifugation » découlera de ces améliorations, dont l'importance industrielle sera considérable. Selon l'historien Anders Lundgren, cette propension de Svedberg à se focaliser sur l'instrumentation reflète une position « idéologique », dans la mesure où cette primauté accordée au développement d'un instrument scientifique serait tout entière asservie à la preuve expérimentale de l'existence de la molécule²⁰. Peut-être Lundgren aurait-il pu ajouter qu'une autre composante idéologique distincte de la réalité moléculaire est également essentielle pour expliquer cette propension à l'amélioration des instruments : la conviction que les propriétés des substances colloïdales sont gouvernées par leur microstructuration. L'ultracentrifugeuse est alors pour Svedberg un vecteur de quantification de ce lien entre microstructure et macro-propriétés²¹.

Dans les pas de Zsigmondy

Svedberg commence ses études de chimie à l'université d'Uppsala en Suède en 1904²². Suivant de près les expériences de Perrin et la chimie colloïdale, il devore *Zur Erkenntnis der Kolloid* que Zsigmondy vient de publier. Il parvient à réunir les pièces pour construire un ultramicroscope et étudie à son tour la formation et la croissance des particules colloïdales. Sur la base de ces expériences il soutient sa thèse en 1907 et part à l'été 1908 en Allemagne,

²⁰ Anders LUNDGREN, « The Ideological Use of Instrumentation. The Svedberg, Atoms, and the Structure of Matter », in Svante LINDQVIST (ed.), *Center on the Periphery. Historical Aspects of 20th-Century Swedish Physics*, Watson Publishing International, 1993, pp. 327-346

²¹ De même, Andrew EDE (« Colloids and quantification : the ultracentrifuge and its transformation of colloid chemistry », *Ambix*, vol. 43 (1996), pp. 32-45) interprète le succès de l'ultracentrifugeuse à partir des années 1930 comme la transition vers une chimie colloïdale quantitative. L'étude de l'émergence de l'ultramicroscope incline cependant à penser que cette phase de quantification démarre dès le début du siècle.

²² Les éléments biographiques de Svedberg sont tirés de Stig CLAESSON, Kai O. PEDERSEN, « The Svedberg 1884-1971 », *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, vol. 18 (1972), pp. 594-627 ; voir aussi LUNDGREN, *op. cit.* et Milton KERKER, « The Svedberg and Molecular Reality », *Isis*, vol. 67, n° 2 (1976), pp. 190-216 ; ainsi que The SVEDBERG & Bengt G. RANDY (eds.), *Physical chemistry of colloids and macromolecules : proceedings of the international symposium to celebrate the 100th anniversary of the birth of Professor The Svedberg on 30 August 1884*, Oxford, Blackwell Scientific Publications, 1986

où il rencontre notamment Zsigmondy. Avec ce dernier il étudie en détail le soufre colloïdal et remarque que cette substance contient des particules de taille très variées. Il spécule alors sur d'éventuelles relations entre taille et propriétés des « sols » correspondants²³ (un « sol » est le terme pour désigner des particules solides en suspension dans un liquide, soit une classe des colloïdes). Zsigmondy était déjà convaincu que la taille de particule est un paramètre essentiel pour expliquer les propriétés²⁴. Sans doute encouragé par Zsigmondy, Svedberg va rapidement placer ce postulat au cœur de son approche des colloïdes et en faire un horizon général de ses recherches.

Dès 1911 à l'aide d'un ultramicroscope il cherche à affiner la connaissance de la taille des particules et à mettre l'emphasis davantage sur la distribution des tailles plutôt que sur la taille moyenne d'un échantillon donné²⁵. Il se confronte alors très vite aux limites de l'ultramicroscopie : fonctionnant sur le principe de la diffraction des rayons lumineux, les échantillons examinés à l'ultramicroscope doivent remplir certaines conditions : la différence d'indice de réfraction entre le soluté et le solvant doit être importante pour favoriser la diffraction. En pratique donc, la microstructure de nombreuses substances peuvent difficilement être quantifiées avec l'ultramicroscopie, comme beaucoup de substances biologiques ainsi que certains oxydes métalliques. Même pour les substances qui marchent bien avec l'ultramicroscope, les images obtenues ne permettent pas d'obtenir aisément la distribution de taille des particules. En 1915 avec un de ses étudiants il a l'idée d'utiliser la sédimentation pour mesurer la taille des particules et en 1921, une fois la guerre terminée, d'augmenter artificiellement la sédimentation par centrifugation afin de pouvoir mesurer des particules plus petites. Les expériences de centrifugation sont alors couplées à un ultramicroscope²⁶.

Le séjour aux Etats-Unis – l'élaboration de l'ultracentrifugeuse

Ainsi, cette primauté accordée à la quantification des microstructures n'est pas le fruit d'une longue maturation qui aurait saisi Svedberg au cours de ses recherches sur les colloïdes. Elle est, au contraire, un moteur qui guide aussi bien ses réflexions théoriques que ses pratiques expérimentales depuis le début de sa carrière scientifique. Et qu'il transmet évidemment à ses étudiants. Alors qu'il est chercheur invité à l'université de Wisconsin aux Etats-Unis en 1923, il rappelle à ses jeunes étudiants américains l'importance de la connaissance précise de la microstructure pour comprendre les colloïdes : « Les propriétés des colloïdes », enseigne Svedberg, « dépendent dans une large mesure de la taille, de la forme et de la structure des particules »²⁷. Cette position épistémologique qu'il défend continuellement est peut-être parmi les raisons qui ont amené le directeur du département de chimie de l'université de Wisconsin,

²³ CLAESSON & PEDERSON, *op. cit.*, p. 597

²⁴ ZSIGMONDY, *Colloids and the ultramicroscope*, *op. cit.*, pp. 20-1

²⁵ *Ibid.* p. 599

²⁶ Boelie ELZEN, « The failure of a successful artifact. The Svedberg ultracentrifuge », in Svante LINQVIST (ed.), *Center on the Periphery*, *op. cit.*, pp. 347-377, surtout p. 349

²⁷ The SVEDBERG, *Colloid Chemistry*, ACS Series, 2nd édition 1928 [première édition 1924, reprend les cours que Svedberg donne à ses étudiants à l'université de Wisconsin, p. 128

John H. Mathews, à proposer à Svedberg de venir passer l'année 1923 aux Etats-Unis, pour enseigner, pour ses recherches, et également comme invité d'honneur du prestigieux symposium sur les colloïdes que Mathews est en passe d'organiser. C'est en tous cas lors de ce séjour américain, dans la petite ville de Madison dans l'état du Wisconsin (au nord des Etats-Unis, dans la région des grands lacs), que Svedberg élabore le prototype de ce qu'il nommera en 1924 l'« ultracentrifugeuse »²⁸.

Au sortir de la Grande Guerre la Suède est, comme les autres pays européens, épuisée par le conflit et les crédits pour la recherche scientifique sont rares. Aussi cette invitation de l'université du Wisconsin est une aubaine pour Svedberg, une opportunité d'obtenir des crédits et le temps nécessaire pour mener à bien ses expériences d'accélération artificielle de la sédimentation des particules par centrifugation. Comme indiqué ci-dessus, la sédimentation était depuis quelques années une approche privilégiée par Svedberg pour déterminer la distribution de taille des particules. En collaboration avec Herman Rinde, un autre chimiste d'Uppsala et avec lequel il perfectionnera l'ultracentrifugeuse une fois rentré des Etats-Unis, il publie en janvier 1923 dans le *Journal of the American Chemical Society* une théorie sur les liens entre sédimentation et taille de particules²⁹. Cet article, le premier que Svedberg publie aux Etats-Unis, a peut-être attiré l'attention des figures américaines des colloïdes, et de Mathews en particulier, sur les travaux de Svedberg. Son invitation témoigne de la volonté de la communauté scientifique américaine à se positionner en égal avec la science européenne, qui a historiquement dominé la science du continent américain tout au long du 19^e siècle.

Au cours de l'entre-deux guerres en effet, la communauté scientifique américaine prend progressivement conscience qu'elle est en passe de rattraper son retard avec les leaders scientifiques européens « historiques » que sont l'Angleterre, la France et plus tardivement l'Allemagne. Elle aspire à s'imposer comme un centre scientifique d'envergure internationale, avec lequel les européens doivent compter. De ce fait, l'émulation européenne autour des colloïdes depuis le début du siècle s'est rapidement propagée sur le continent américain³⁰. Wolfgang Ostwald a contribué à initier cette émulation en donnant 56 conférences au cours de l'année 1913 encourageant à l'étude des colloïdes au sein de la plupart des universités américaines. Pendant la guerre, le Conseil National de la Recherche (*National Research Council*), l'organe gouvernemental mis sur pied pour coordonner la mobilisation scientifique américaine, institue une division des colloïdes chargée de perfectionner les masques à gaz, les caoutchoucs, les écrans de fumée... L'effort de guerre a amené de nombreux chimistes à toucher au domaine des colloïdes et cette dynamique perdure dans l'après-guerre. La

²⁸ D'autres efforts scientifiques et techniques indépendants de Svedberg sur la centrifugation à haute vitesse ont eu lieu, nous nous restreignons ici à l'ultracentrifugeuse de Svedberg, voir ELZEN, *The failure, op cit.* et même auteur, « Two ultracentrifuges : a comparative study of the social construction of artefacts », *Social Studies of Science*, vol. 16 (1986), pp. 621-662

²⁹ SVEDBERG & RINDE, « The determination of the distribution of size of particles in disperse systems », *JACS*, vol. 45 (1923), pp. 943-954

³⁰ Andrew EDE, *The Rise and Decline of Colloid Science in America 1900-1935. The Neglected Dimension*, Burlington (VT), Ashgate, 2007

proportion des publications scientifiques sur le domaine croît fortement, et les universités mettent en place des cours voire des filières de formation orientées sur la chimie colloïdale³¹.

Invité d'honneur du symposium national sur les colloïdes organisé par Mathews, Svedberg en profite pour défendre sa position épistémologique et diffuser ses priorités de recherche. Il intitule sa conférence « la technique en chimie des colloïdes » et incline les praticiens des colloïdes à ne plus se restreindre aux instruments utilisés jusqu'à présent en chimie et à développer une instrumentation idoine à ce domaine. « C'est l'opinion de l'auteur », écrit Svedberg à l'occasion de ce symposium, « qu'il n'est possible d'obtenir un réel progrès en chimie colloïdale que par le développement de méthodes de mesure exactes. [...] Ce qui est indispensable, c'est de faire de bonnes recherches quantitatives sur des systèmes aussi bien définis que possible »³². Joignant la pratique à la parole, il s'entoure d'une équipe de jeunes étudiants et les oriente vers cette approche quantitative des colloïdes. Elmer O. Kraemer (1898-1943) sera parmi ces étudiants, à qui Svedberg confie la mesure de la distribution des tailles de particules dans les émulsions de benzène et d'eau³³, et la quantification de la production des particules colloïdales par la méthode de l'arc électrique³⁴. Mais c'est avec J. Burton Nichols (1902-1995) que Svedberg va réaliser le premier prototype de l'ultracentrifugeuse. Après avoir suivi Svedberg en Suède, Nichols et Kraemer seront tous deux embauchés par Du Pont quelques années plus tard et, dans le cadre de son imposant programme de recherche « fondamentale », propageront la posture réductionniste de Svedberg au sein de Du Pont.

Nichols semble avoir rempli une fonction plus que d'exécutant dans le développement de l'ultracentrifugeuse. Dans un document autobiographique, il en fait le récit suivant : « Un problème a immédiatement capté mon attention, le développement d'une technique optique pour étudier la sédimentation de particules colloïdales pendant la centrifugation afin d'augmenter la sensibilité. La première centrifugeuse optique grossière en a résulté, avec de sérieux problèmes de convection »³⁵. Considérant l'humilité qui transparaît dans les nombreux échanges scientifiques et personnels que Nichols a entretenus et qui ont été conservés, on peut donner un certain crédit à l'affirmation ci-dessus. Aussi deux innovations décisives concourent à l'ultracentrifugeuse : la ventilation à l'hydrogène de la chambre de centrifugation pour garder la température constante et éviter les problèmes de convection qui perturbent la sédimentation, et l'installation d'une caméra pour enregistrer la sédimentation à

³¹ EDE, *Rise and decline*, *op. cit.*, chapitre 5 et John W. SERVOS, *Physical chemistry from Ostwald to Pauling. The making of a science in America*, Princeton (NJ), Princeton University Press, 1990, p. 304

³² SVEDBERG, « The colloid chemistry technique », in *Colloid symposium monograph*, University of Wisconsin, 1923, pp. 75-94

³³ KRAEMER & A.J. STAMM, « A new method for the determination of the distribution of size of particles in emulsions », *JACS*, vol. 46 (1924), pp. 2709-2718

³⁴ KRAEMER & SVEDBERG, « Formation of colloid solutions by electrical pulverization in the high-frequency alternating current arc », *JACS*, vol. 46 (1924), pp. 1980-1991

³⁵ Nichols, « biographical sketch », 25 août 1978, JBN 7/ultracentrifuge and its use

vitesse de centrifugation constante, ce qui interdit d'arrêter la centrifugation pour prendre les mesures³⁶ :

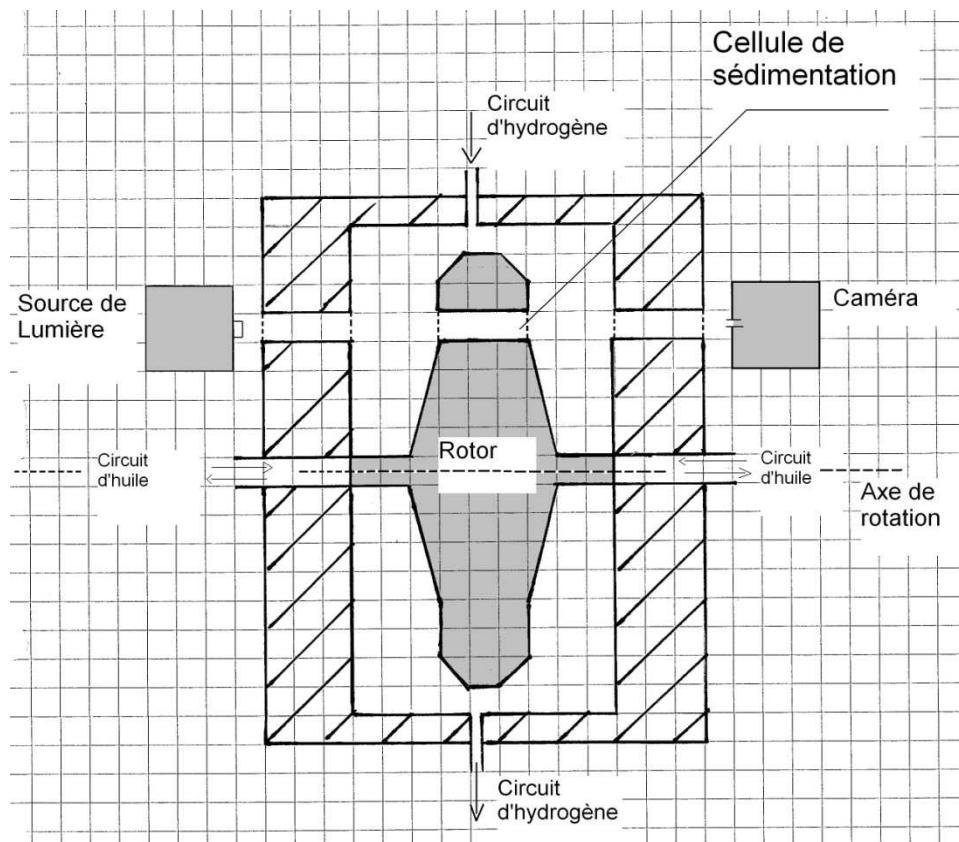


Figure 2.3 — Schéma de l'ultracentrifugeuse de Svedberg de 1924
Source : inspiré de ELZEN, *Two ultracentrifuges*, *op. cit.*, p. 626

³⁶ ELZEN, *Two ultracentrifuges*, *op. cit.* décrit en détail les innovations techniques ; Nichols et Svedberg déposent un brevet qui sera accordé le 8 novembre 1927 (U.S. patent 1,648,369)

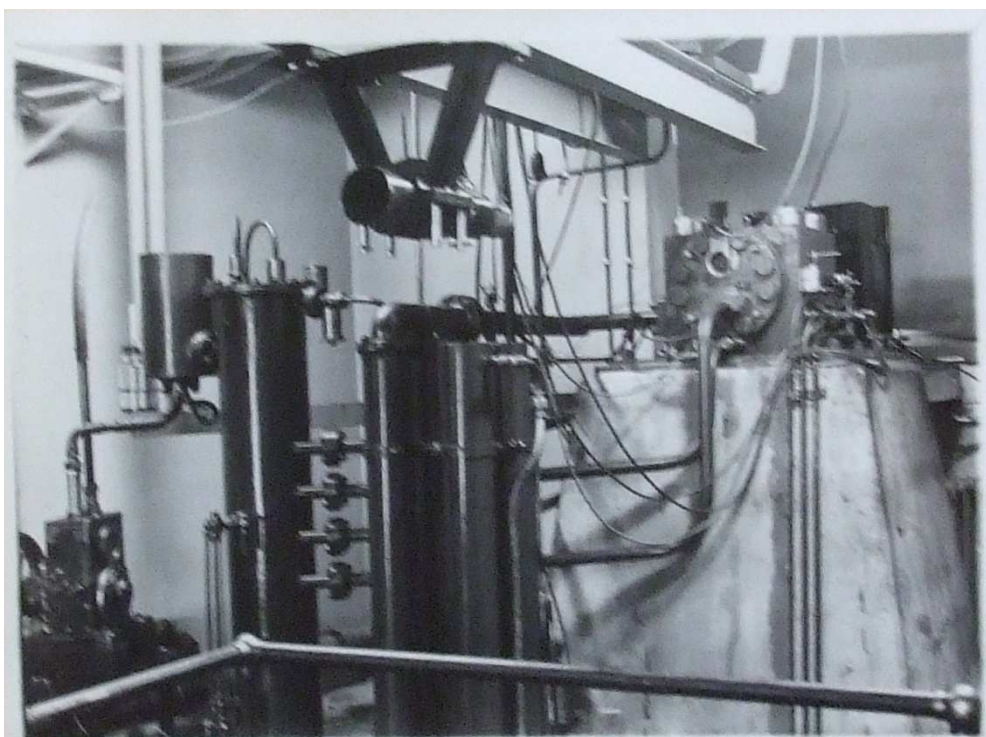


Figure 2.4 — Photographie d'une ultracentrifugeuse utilisée dans le laboratoire de Svedberg d'Uppsala en 1931
Source : avec l'aimable autorisation du Hagley Museum and Library

Nichols et Svedberg établissent ainsi le premier prototype des ultracentrifugeuses à caméra et turbine à huile, ventilées à l'hydrogène. Comme Zsigmondy avec l'ultramicroscope, Nichols et Svedberg calibrent leur appareil avec des particules d'or ; l'unité introduite par Zsigmondy, qui s'est largement disséminée au sein de la chimie colloïdale et au-delà, est naturellement reprise par ceux-ci pour exprimer la taille des particules mesurées³⁷. Le nom « ultracentrifugeuse » est choisi par Svedberg en 1924, alors qu'il est rentré travailler en Suède avec Rinde. Ce nom est explicitement choisi pour inscrire ces centrifugeuses dans la lignée – et le dépassement – de l'ultramicroscope : « La nouvelle centrifugeuse que nous avons construite permet la détermination de particules qui ne peuvent pas être rendues visibles avec l'ultra-microscope. En analogie avec l'appellation de l'ultra-microscope et de l'ultra-filtration nous proposons le nom *ultra-centrifugeuse* pour cet appareil »³⁸.

Svedberg, qui souhaite aligner l'étude des colloïdes sur l'étude des « ultrastructures », conçoit l'ultracentrifugeuse comme un instrument idoine à la chimie colloïdale. Ainsi cet instrument, initialement, n'est pas pensé par celui-ci comme transversal aux sciences physiques et biologiques, mais circonscrit au domaine des colloïdes. Ce domaine est cependant, dans les années où l'ultracentrifugeuse est élaborée, très vaste puisque ses représentants revendiquent le territoire des protéines, de la cellulose, des pigments, des

³⁷ NICHOLS & SVEDBERG, « Determination of Size and Distribution of Size of Particle by Centrifugal Methods », *JACS*, vol. 45 (1923), pp. 2910-2917

³⁸ SVEDBERG & RINDE, « The Ultracentrifuge, a new instrument for the determination of size and distribution of size of particles in amicroscopic colloids », *JACS*, vol. 46 (1924), pp. 2677-2693, citation p. 2677-8

caoutchoucs, des fibres textiles... Malgré le potentiel de l'ultracentrifugeuse parmi ces secteurs techniques, scientifiques et industriels hétéroclites, et son acclamation par les grandes figures de la chimie colloïdale, cet instrument se diffuse relativement lentement dans les laboratoires industriels et académiques. En 1928, Du Pont est la seule institution en Amérique du Nord à posséder une ultracentrifugeuse de type Svedberg. Nichols, embauché depuis peu par cette compagnie, est invité au symposium des colloïdes qui se déroule cette année à Toronto pour qu'il y présente cet instrument. James W. McBain (1882-1953), éminent chimiste des colloïdes de l'université de Stanford en Californie, invité d'honneur du symposium de 1926, écrit à Nichols suite à sa présentation qu'il a été « très impressionné par les larges possibilités de l'ultracentrifugeuse élaborée par Svedberg et vous-même, et pour laquelle vous avez donné un aperçu remarquable à Toronto en juin dernier. [...] Il me semble que cette nouvelle ultracentrifugeuse est une méthode d'investigation beaucoup plus importante que l'ultramicroscope »³⁹. Souhaitant équiper son laboratoire d'une ultracentrifugeuse, McBain demande à Nichols des précisions sur les coûts et la difficulté de la construction. Cependant la complexité technique des ultracentrifugeuses rend leur construction difficile et extrêmement chère. Avant la fin des années 1930, les ultracentrifugeuses du modèle de Svedberg, à turbine à huile, sont rarissimes. Aussi le prix Nobel que Svedberg reçoit dès 1926 le met dans l'embarras, car il considère que la portée de l'ultracentrifugation et de son approche quantitative-microstructurale des colloïdes est encore à démontrer⁴⁰.

Svedberg et la vision « moléculaire » de la vie

L'élaboration de l'ultracentrifugeuse est consciemment et immédiatement perçue par ces acteurs comme un épisode primordial dans l'histoire de la chimie. Fin 1927 un journaliste du *New York Times*, Waldemar Kaempffert, contacte Nichols afin d'élaborer un article sur l'ultracentrifugeuse. Ce dernier lui détaille son fonctionnement et lui explique qu'

avant que cet instrument ne soit conçu, il n'y avait aucun moyen satisfaisant pour les chimistes-chercheurs [« *research chemists* »] d'étudier l'action de la lumière, de la chaleur, des acides et des alcalins etc. sur la taille et structure moléculaire des substances complexes telles que la gélatine, l'hémoglobine [...]. Les unités ultimes, ou molécules, de ces substances ont une taille d'environ un dix-millionième de pouce en diamètre [~ 2,5 nanomètres ou « $\mu\mu$ »].⁴¹

Pour Nichols comme pour Svedberg, l'ultracentrifugeuse manifeste un tournant dans les rapports que les chimistes ont entretenus aux micro-mondes. A travers cet instrument, les « molécules » deviennent des entités mesurables, manipulables. Les micro-mondes s'offrent « en direct » à ces chimistes qui conçoivent précisément les instruments nécessaires à leur prise métrique. Cependant cette volonté de mesure des micro-mondes ne se justifie pas en elle-même, au moins aux yeux de ces acteurs. Décrire ce tournant simplement comme

³⁹ Lettre, McBain à Nichols, 8 février 1929 et 26 février 1929, JBN 4/Misc. Papers #2

⁴⁰ Milton KERKER, « The Svedberg and Molecular Reality : An Autobiographical Postscript », *Isis*, vol. 77 (1986), pp. 278-282

⁴¹ Lettre, Nichols à Kaempffert, 27 décembre 1927, JBN/6 ultracentrifuge 1938-9, emphase de Nichols

l'émergence d'une prise métrique sur les micro-mondes serait rater l'essentiel de ce qui caractérise ce mouvement de la chimie colloïdale dans l'entre-deux guerres. Cette prise métrique s'inscrit dans une posture épistémologique plus vaste, d'essence réductionniste : ces « molécules » déterminent le comportement de la matière à notre échelle. Cette posture épistémologique elle-même accompagne la posture associée de performance sur les substances – et les êtres – en manipulant ces micro-mondes. « Il est évident, énonce Svedberg à l'occasion d'une conférence à l'université du Delaware en 1937, que notre bien-être corporel [« *bodily welfare* »] est hautement dépendant de nos connaissances sur les propriétés des macromolécules et des composés à haut-poids moléculaire. La maladie et la mort ne peuvent pas être combattues avec succès si on ne connaît pas la chimie et la physique des matériaux de notre corps »⁴².

Cette idée, défendue près de 15 ans après l'invention de l'ultracentrifugeuse, est en réalité dans la droite ligne de l'épistémologie des colloïdes que Svedberg a élaboré dans sa jeunesse : les propriétés des colloïdes dépendent de la structure et de la nature de leurs « particules ». A partir de la fin des années 1920 cependant, les enjeux et les ambitions se sont métamorphosés : Svedberg s'est déplacé de l'étude des colloïdes à l'étude des protéines, et de l'étude des propriétés des substances à l'étude de « la maladie et de la mort ». La biologie est alors en passe de devenir « moléculaire », et Svedberg joue un rôle substantiel dans cette transition : « le prestigieux réseau Uppsala-Rockefeller [a] dominé la recherche sur les protéines [dans les années 1930] »⁴³. Ainsi l'ultracentrifugeuse joue un rôle considérable dans l'émergence de la « biologie moléculaire » à la fin des années 1930, émergence activement promue par la fondation Rockefeller. Celle-ci, par le biais de bourses distribuées aux universités, pousse à la dissémination des ultracentrifugeuses aux Etats-Unis à partir de 1937. Ces ultracentrifugeuses permettent de déterminer le « poids moléculaire » des protéines et autres substances biologiques. Le leitmotiv « *particle-size* » des particules colloïdales s'est mué en un leitmotiv « *molecular weight* » des substances utilisées en biologie. Cette transition de la « particule » à la « molécule » et de la taille au poids moléculaire, qui n'a pas été sans générer des critiques parmi les collègues biochimistes de Svedberg, sera reprise au chapitre 5.

Paul Emmett et la « BET »

En 1977, l'*Institute of Scientific Information* basé à Philadelphie et qui conduit des analyses bibliométriques sur l'ensemble des publications scientifiques mondiales, informe Paul Emmett, chimiste retraité de l'université Johns Hopkins dans le Maryland, qu'un de ses articles écrit quarante ans plus tôt est le second article le plus cité parmi toute la littérature

⁴² Svedberg emploi ici une expression délicate à traduire : « [...] if we do not know the chemistry and physics of the material of our own body. » : Svedberg, « The ultracentrifuge and its field of research », conférence à l'université du Delaware (Etats-Unis), 1937 (date non-spécifiée), JBN 6/Svedberg correspondance 1932-1941

⁴³ Lily E. KAY, *The Molecular Vision of Life : Caltech, the Rockefeller Foundation, and the Rise of the New Biology*, Oxford, Oxford University Press, 1996, voir particulièrement Interlude I, citation p. 112

scientifique de la période de l'entre-deux guerres⁴⁴. L'article en question, « L'adsorption des gaz en couches multimoléculaires », est publié en 1938 dans le *Journal of the American Chemical Society* et résulte du travail conjoint d'Emmett avec le chimiste Stephen Brunauer et le physicien Edward Teller, plus connu que ces deux derniers comme « père » de la bombe à hydrogène et ardent défenseur de la surenchère nucléaire qui caractérise la politique américaine de défense pendant la Guerre Froide. Brunauer, retraité de l'université Clarkson dans l'état de New-York, est une vieille connaissance d'Emmett et ceux-ci ont travaillé ensemble bien avant 1938, contrairement à Teller qui a travaillé ponctuellement avec ces derniers uniquement pour cet article. Flatté du succès de leur article, Emmett écrit à Brunauer que leur trio « a simplement débouché sur quelque chose de très utile – utile pour l'industrie comme pour la science pure »⁴⁵. Ainsi Emmett justifie dans cette lignée, rétrospectivement, l'engouement que cette théorie sur l'adsorption des gaz a rapidement entraîné : « [ce grand nombre de citations] n'est pas issu de la renommée de ses auteurs [Teller], mais d'une heureuse combinaison de théorie, d'expérience et d'une grande utilité à la science et à l'industrie »⁴⁶. Effectivement cet article a souvent été considéré par ceux qui l'ont cité comme le point de départ de la méthode dite « BET » (de l'initiale des trois contributeurs) permettant de mesurer la surface géométrique des particules fines. Ces appareils BET ont trouvé des applications techniques et industrielles innombrables, initialement en catalyse, puis très vite dans l'ensemble des secteurs en prise avec des particules fines, des pigments à la mesure de la qualité de l'air.

Dans ses réflexions sur le destin du papier de 1938 cependant, Emmett se demande pourquoi les articles écrits avec Brunauer et antérieurs à 1938 qui interprétaient déjà l'adsorption multimoléculaire comme une méthode de mesure de la surface *absolue* des particules n'ont pas connu le même succès. A juste titre semble-t-il car l'interprétation de cette large appropriation scientifique et industrielle de la BET comme une diffusion de « la science pure » vers des applications industrielles est une vision déformée des événements qui ont concouru à l'émergence de cette instrumentation et des théories associées. Le papier de 1938 est déjà une manifestation, un aboutissement de dynamiques scientifiques aussi bien que politiques et industrielles – en l'occurrence l'amélioration des catalyseurs pour la synthèse de l'ammoniac – qui s'entremêlent depuis au moins les années 1920. L'institution qui héberge Emmett et Brunauer alors qu'ils enfantent la théorie BET est le Bureau de Chimie et des Sols, un laboratoire du ministère de l'Agriculture situé dans les faubourgs de la capitale américaine, plus connu sous le nom officieux du *Fixed Nitrogen Laboratory*, ou laboratoire sur la fixation de l'azote. Ce laboratoire gouvernemental est un produit de la mobilisation scientifique et industrielle de la Première Guerre mondiale, alors que le gouvernement fédéral américain – comme les autres nations industrielles – promeut la synthèse catalytique de l'ammoniac (un

⁴⁴ Lettre, Paul Emmett à Stephen Brunauer, 21 mars 1977, PEP/Correspondance 2.17. Cet institut est à l'origine des bases de données *Science Citation Index* et du logiciel *Web of Science*, qui sont jusqu'à aujourd'hui les plus utilisés en scientométrie, notamment dans le classement des revues scientifiques et dans l'évaluation de la recherche.

⁴⁵ Emmett à Brunauer, *Ibid.*

⁴⁶ Emmett, draft non-daté, PEP/Correspondance 2.17

composé essentiel dans la fabrication des engrais et des explosifs) pour assurer leur autonomie alimentaire et s'affranchir de la dépendance envers les engrais azotés importés du Chili⁴⁷. Emmett est engagé en 1926 au Fixed Nitrogen Laboratory et se confronte dans la décennie qui suit à cette synthèse catalytique de l'ammoniac.

Paul Emmett et le Fixed Nitrogen Laboratory

Paul Hugh Emmett est né en 1900 à Portland, dans l'état de l'Oregon sur la côte Ouest des Etats-Unis. Son père, ingénieur ferroviaire, le pousse à réaliser des études supérieures et Emmett choisit la filière d'ingénierie chimique à la faculté d'agriculture de l'Oregon. Si l'on en croit ses reconstructions autobiographiques, c'est sous l'influence de son professeur de chimie au lycée qu'Emmett et l'illustre chimiste également originaire de l'Oregon Linus Pauling (1901-1994) – ces derniers resteront amis toute leur vie – ont choisi la chimie comme filière puis comme carrière⁴⁸. Une fois diplômé de la faculté d'Agriculture de l'Oregon en 1922 (*Oregon Agricultural College*, qui est maintenant l'*Oregon State University*), Emmett est attiré par le prestige du tout jeune *California Institute of Technology* (situé près de Los Angeles et plus connu sous l'abréviation « Caltech »). Los Angeles est comparativement beaucoup plus proche de l'Oregon que les universités scientifiques réputées de la côte Est comme le *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) de Boston. Arthur A. Noyes (1866-1936), récemment débauché du MIT pour contribuer à instituer la chimie au Caltech, est alors un des chimistes américains les plus réputés et contribue à promouvoir au Caltech sa spécialité, la chimie physique (*physical chemistry*). Une fois arrivé au Caltech à l'automne 1922 pour débiter ses études *post-graduate*, Noyes place Emmett sous la direction de Arthur F. Benton, jeune docteur fraîchement débarqué de Princeton et formé par Hugh S. Taylor (1890-1974), alors la figure académique majeure sur le thème de la catalyse. Benton introduit Emmett à la catalyse, et ce dernier termine son doctorat sur ce thème en 1925. La catalyse concerne les réactions chimiques dont la vitesse (la « cinétique » dans le jargon chimique) est augmentée par des éléments qui ne sont pas, en principe, dégradés par la réaction chimique, ces éléments sont appelés des « catalyseurs »⁴⁹. Par exemple la synthèse catalytique de l'ammoniac (NH₃) : l'azote (N₂) réagit avec l'hydrogène (H₂) en présence de petites particules

⁴⁷ CLARKE M.J., *The Federal Government and the Fixed Nitrogen Industry, 1915-1926*, Thèse de doctorat, Oregon State University, 1977

⁴⁸ EMMETT, « Autobiographical remarks », in DRAUGLIS E. & JAFFEE R.I. (eds.), *The Physical Basis for Heterogeneous Catalysis*, Plenum Press, 1975, xi-xxi; voir aussi, pour la biographie de Emmett: DAVIS B.H., « Paul H. Emmett (1900-1985): Six Decades of Catalysis », *Journal of Physical Chemistry*, vol. 90 (1986), pp. 4701-5; GARTEN R.L., « Paul H. Emmett: Six Decades of Contributions to Catalysis », in DAVIS B.H. & HETTINGER W.P. (eds.), *Heterogeneous catalysis, selected American histories*, Washington D.C., American Chemical Society, 1983, pp. 45-57 ; voir aussi l'interview de Emmett par Burton H. Davis publiée dans *JCE*, vol. 55 (1978), p. 248 et la notice biographique publiée sur le site internet des archives de l'*Oregon State University* [<http://osulibrary.oregonstate.edu/specialcollections/coll/emmett/biographicalnote.html>, accédé le 01/06/2008]

⁴⁹ Dans de nombreuses réactions catalytiques cependant l'action des catalyseurs relève davantage qu'une simple amélioration de la cinétique, ils peuvent déclencher la réaction et déterminer la nature des produits de la réaction, ce qu'on appelle la « sélectivité » des catalyseurs. Bien souvent les catalyseurs sont de petites particules solides tandis que le milieu réactionnel est liquide ou gazeux ; on parle alors de catalyse « hétérogène », pour indiquer que le catalyseur et les réactifs ne sont pas dans la même phase.

de fer qui « catalysent » la réaction entre ces réactifs pour donner de l'ammoniac. Pour sa thèse, Emmett étudie les méthodes de préparation de catalyseurs au nickel et au cuivre par un procédé chimique appelé « réduction » : les oxydes de nickel ou de cuivre sont réduits par l'hydrogène en métaux finement divisés, à l'activité catalytique importante.

La synthèse de catalyseurs performants utilisés dans la production industrielle de l'ammoniac est justement ce qui agite, à peu près au même moment, les chimistes du Fixed Nitrogen Laboratory. Ce laboratoire gouvernemental devient au sortir de la Première Guerre mondiale le principal vecteur d'appropriation du procédé allemand Haber-Bosch aux États-Unis. Les chimistes et ingénieurs formés au laboratoire sont d'une importance capitale pour la conception et l'opération des usines de production de l'ammoniac fonctionnant sur ce procédé⁵⁰. Le développement de catalyseurs qui résistent aux hautes pressions caractéristiques (plusieurs centaines d'atmosphères) de ce procédé, c'est-à-dire dotés d'une durée de vie économiquement acceptable, est une des missions du laboratoire. Les catalyseurs de fer sont très sensibles aux impuretés contenues dans les minéraux qui entrent dans leur préparation. Selon Emmett, les chimistes du laboratoire de fixation de l'azote ont redécouvert que l'ajout d'un faible pourcentage d'oxydes de potassium ou d'aluminium permet d'augmenter significativement l'activité des catalyseurs de fer, ce qui avait déjà été découvert par les chimistes allemands de la BASF au début du siècle. Différentes proportions de ces impuretés sont ajoutées au fer et les catalyseurs ainsi préparés sont testés selon leur degré d'efficacité et leur durée de vie. Ces impuretés sont alors appelées, puisqu'elles ont un effet positif sur la réaction catalytique, des « promoteurs ». La méthodologie pour le développement des catalyseurs et la détermination de la meilleure combinaison de promoteurs est lente, et probablement très empirique. C'est dans ce contexte technico-industriel d'amélioration des catalyseurs que s'insèrent les recherches d'Emmett, qui rétrospectivement seront interprétées comme de la « *basic science* » et une volonté de « rationaliser » le développement des catalyseurs.

Lorsqu'Emmett est embauché au laboratoire à l'automne 1926, on lui demande d'« étudier le mécanisme par lequel les catalyseurs pour la synthèse de l'ammoniac opèrent » et « ce qui fait un bon catalyseur, un mauvais catalyseur, comment marche un catalyseur, etc. »⁵¹. Ainsi la question à laquelle va se confronter Emmett lorsqu'il arrive à Washington est très simple : comment expliquer que quelques impuretés d'oxydes d'aluminium et de potassium permettent d'améliorer significativement l'action catalytique du fer ? Questionnement qui, bien entendu, va le mener à s'approprier les théories qui se frottent alors à l'action catalytique. Le contexte semble favoriser cette poussée théorique au sein d'un laboratoire non-universitaire : la rhétorique de la « science pure » est de plus en plus relayée parmi les élites industrielles et politiques⁵² ; Du Pont, au même moment, lance son

⁵⁰ CLARK, *The federal government, op. cit.* ; voir aussi EMMETT, « The Fixed Nitrogen Research Laboratory », in *Heterogeneous catalysis, selected American histories, op. cit.*, pp. 195-215

⁵¹ EMMETT, *Autobiographical remarks, op. cit.* et interview par Davis, *op. cit.*

⁵² Steven SHAPIN, *The scientific life. A moral history of a late modern vocation*, Chicago (IL), The University of Chicago Press, 2008, en particulier pp. 160-164 ; Ronald KLINE, « Construing 'Technology' as 'Applied

programme de recherche « fondamentale ». Le directeur du laboratoire de fixation de l'azote, Frederick G. Cottrell (1877-1948), « samaritain de la science », encourage les initiatives des chimistes de son laboratoire et en particulier les approches théoriques⁵³. Peut-être Cottrell a-t-il été influencé ou connaît-il personnellement Herbert Hoover, qui, peut-être avant que Emmett ne soit embauché au laboratoire, plaide pour que les Etats-Unis accroissent leur effort sur la science « pure » (cf. chapitre suivant). Emmett est rejoint en 1928 par Stephen Brunauer (1903-1986)⁵⁴ et ceux-ci, dans leur volonté de comprendre comment marche un catalyseur, en viennent à se focaliser sur un phénomène physico-chimique qui fonde toute la catalyse hétérogène et qui est passé d'être bouleversé par la réalité moléculaire : l'adsorption.

De l'étude de l'adsorption à la quantification de la surface des catalyseurs

Pour comprendre comment le mouvement vers les colloïdes, la réalité moléculaire et la quantification de la microstructure des catalyseurs se condensent historiquement autour du tandem Emmett-Brunauer dans l'entre-deux guerres, il est nécessaire d'aborder en profondeur la théorisation de l'action catalytique par ces acteurs. Lorsque le tandem débute ses recherches à la fin des années 1920, il est largement établi parmi les chimistes et ingénieurs que la catalyse hétérogène est un phénomène de surface, d'interaction des gaz ou des liquides, qui contiennent les réactifs, avec la surface du catalyseur. Au tournant du siècle plusieurs théories sont avancées pour décrire la nature de cette interaction. La réalité moléculaire va bouleverser l'interprétation de ces théories et positionner le phénomène d'« adsorption » au cœur de la compréhension de la catalyse. L'adsorption désigne la fixation (réversible ou irréversible) des gaz ou liquides à une surface d'un matériau « adsorbant »⁵⁵. Plus le matériau adsorbant possède une surface étendue, plus son action d'adsorption est importante, c'est pourquoi les catalyseurs sont préparés dans un état « finement divisé », de manière à présenter une grande surface au milieu réactionnel. Pionnier dans l'appropriation du réalisme moléculaire en chimie⁵⁶, Irving Langmuir au cours des années 1910 re-conceptualise l'adsorption comme la fixation des « molécules » de la substance adsorbée avec les « atomes » de la surface adsorbante. Le problème de l'adsorption est ainsi déplacé vers la compréhension des forces et interactions qui lient ces molécules aux atomes de la surface, et Langmuir s'approprie – et contribue à – la nouvelle physico-chimie moléculaire qui décrit ces

Science': Public Rhetoric of Scientists and Engineers in the United States, 1880-1945 », *Isis*, vol. 86, n° 2 (1995), pp. 194-221

⁵³ CAMERON F.T., *Frederick Gardner Cottrell. Samaritan of Science*, New York, Double Day, 1952 ; voir aussi sur Cottrell : BARKER, J.W., *Research Corporation (1912-1952). Dedicated to Progress in Education and Science*, New York, Newcomen Society in North America, 1952

⁵⁴ Sur Brunauer, voir SING Kenneth S.W., « Obituary : Stephen Brunauer (1903-1986) », *Langmuir*, vol. 3 (1987), pp. 2-3

⁵⁵ La distinction entre adsorption et absorption (la pénétration des gaz ou liquides à l'intérieur d'un matériau absorbant) est elle-même clarifiée avec le réalisme moléculaire, mais retracer cette distinction est hors de propos ici.

⁵⁶ Irving LANGMUIR, « Modern concepts in physics and their relation to chemistry », *JACS*, vol. 51 (1929), pp. 2846-2868

forces⁵⁷. La catalyse, désignant des phénomènes de réaction chimique et donc empreinte d'irréversibilité, est alors interprétée comme la rupture des liaisons entre atomes de la molécule adsorbée, suivie de la formation de nouvelles liaisons « covalentes » qui engendrent les molécules-produit au cours de ce processus d'adsorption. L'étude théorique de la catalyse emprunte alors la pente de l'étude de l'adsorption des substances.

Le centre de chimie de Princeton, dirigé par Hugh Taylor et dont la recherche est axée sur la catalyse, est parmi les premiers à s'engouffrer dans les brèches ouvertes par Langmuir, et développe des compétences expérimentales et pratiques sur l'étude de l'adsorption. Benton, dirigé par Taylor et qui sera le mentor d'Emmett au Caltech, s'attache au début des années 1920 à concevoir des dispositifs expérimentaux pour étudier l'adsorption des gaz par les catalyseurs et mesurer précisément les volumes adsorbés⁵⁸. Au cours de son doctorat au Caltech, Emmett s'imprègne de ces techniques de manipulation de gaz et d'adsorption et les re-mobilisent une fois en poste au laboratoire sur la fixation de l'azote. Ses premières recherches avec Brunauer sont dominées initialement par l'étude des équilibres dans le système hydrogène-azote-ammoniac-fer⁵⁹. Emmett emprunte ici les grandes tendances de la discipline chimie physique, qui s'est focalisée depuis son émergence à la fin du XIX^e siècle sur l'étude des équilibres de réaction, c'est-à-dire sur la fraction des réactifs qui est convertie en fonction des paramètres expérimentaux.

Au début des années 1930 cependant, Emmett envisage une autre approche pour comprendre les mécanismes de la catalyse. La surface des catalyseurs devient progressivement considérée par son équipe comme un paramètre explicatif essentiel pour rendre compte de la diversité de la qualité des catalyseurs et de leur forte sensibilité aux impuretés. Faute de sources primaires consultées sur cette période du travail d'Emmett⁶⁰, on peut documenter cette inflexion en reprenant le récit que ce dernier en fait quelques années plus tard, dans un article paru en 1942 alors que la BET connaît déjà un succès considérable :

Il y environ sept ans il est devenu important de mesurer la surface spécifique [*surface area*] des catalyseurs en fer poreux utilisés dans la synthèse de l'ammoniac, afin de déterminer si l'augmentation d'activité qui résulte de l'addition des promoteurs pouvait être attribuée à une augmentation de la surface spécifique totale ou davantage à une augmentation de l'activité par unité de surface⁶¹.

Emmett suppose ainsi que l'addition des promoteurs peut modifier la microstructure des catalyseurs, en augmentant ou diminuant leur surface géométrique, ou la nature de cette

⁵⁷ Cette « molécularisation » de l'adsorption est bien décrite dans le discours que Langmuir donne à l'occasion de la remise de son prix Nobel de chimie en 1932 : « Surface Chemistry », in *Nobel Lectures : Chemistry 1922-1941*, Singapour, World Scientific, 1999, pp. 287-325

⁵⁸ BENTON A.F., « Adsorption of gases by oxide catalysts », *JACS*, vol. 45 (1923), pp. 887-899

⁵⁹ Voir par exemple EMMETT, BRUNAUER *et al.*, « Equilibria in the iron-nitrogen system », *JACS*, vol. 53 (1931), pp. 1778-1786

⁶⁰ Les archives d'Emmett à l'université de l'Oregon ne documentent malheureusement pas le début de sa carrière.

⁶¹ EMMETT, « The measurement of the surface areas of finely divided or porous solids by low temperature adsorption isotherms », *Advances in Colloid Science*, vol. 1 (1942), pp. 1-35

surface. L'état de surface du catalyseur – géométrique ou chimique – conditionne son activité catalytique. La détermination de leur surface permettrait alors de progresser dans l'explication de la disparité des catalyseurs et de leur efficacité. L'adsorption des catalyseurs n'est alors plus un axe de recherche en soi, mais un moyen pour quantifier leur surface. Cette instrumentalisation de l'adsorption comme méthode de quantification des microstructures est rendue possible par l'interprétation moléculaire que Benton propose au début des années 1930 des « isothermes d'adsorption ». Les isothermes d'adsorption représentent la quantité de gaz adsorbé en fonction de la pression appliquée, à température constante. Benton, en utilisant des catalyseurs de fer fournis par Emmett et de l'azote comme gaz adsorbé, et à des températures proches de son point d'ébullition (-196°C), remarque que cette isotherme dessine un saut (« *break* ») :

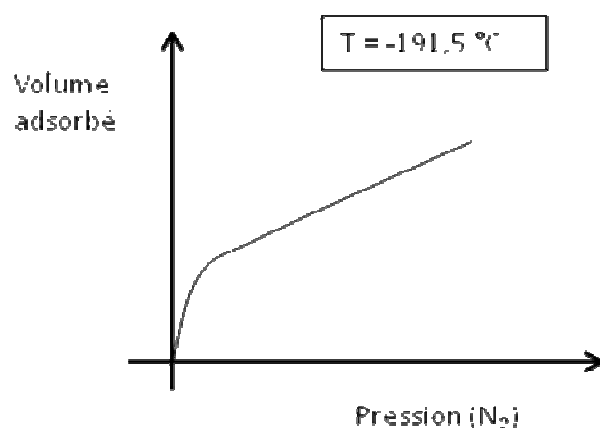


Figure 2.5 — Isotherme d'adsorption de l'azote par des particules de fer telle que mesurée par Benton
Source : A. F. Benton & T.A. White, « The sorption of gases by iron », *JACS*, vol. 54 (1932), pp. 1820-30

L'interprétation que Benton donne à ce saut est cruciale pour l'ambition de l'équipe d'Emmett de quantifier la microstructure des catalyseurs : il suggère que ce saut correspond au remplissage d'une « couche » *unimoléculaire* d'azote autour des particules de fer. Aussi la mesure précise du volume d'azote adsorbé à ce saut permet de déterminer la surface des particules : le volume donne le nombre de molécules nécessaire pour couvrir entièrement les particules, que l'on multiplie par le diamètre d'une molécule pour obtenir la surface du catalyseur. Le raisonnement n'est, en réalité, toutefois pas aussi simple : d'abord parce qu'il s'appuie sur l'hypothèse que toute la surface est adsorbante⁶², ensuite parce que de nombreuses couches moléculaires peuvent se former autour du fer, ce qui rend le lien entre volume adsorbé et nombre de molécules qui se fixent à la surface beaucoup plus problématique. C'est précisément pour calculer la surface des particules dans le cas de

⁶² Est-ce que les molécules d'azote se fixent préférentiellement sur certains sites du catalyseur, ou est-ce qu'ils se fixent indifféremment sur l'ensemble de sa surface ? C'est également pour répondre à cette question que Emmett ambitionne de quantifier la surface de ses catalyseurs.

l'adsorption multimoléculaire qu'Emmett et Brunauer font appel au physicien Teller en 1937⁶³.

Ce détournement de l'adsorption comme méthode de quantification des microstructures témoigne de la fécondité du réalisme moléculaire pour parvenir à cette quantification dans le premier tiers du 20^e siècle. La connaissance de la taille des molécules permet de « remonter » à celle des particules. Les acteurs qui ont contribué à élaborer la BET comme Emmett, Langmuir et Benton sont animés par l'idée que les molécules peuvent se manipuler comme de petites billes dotées d'une taille caractéristique et qui peut être mesurée avec précision. En témoigne ce brouillon d'Emmett lorsque, peu après, il appliquera la méthodologie BET sur des particules de noir de carbone (Fig. 2.6).

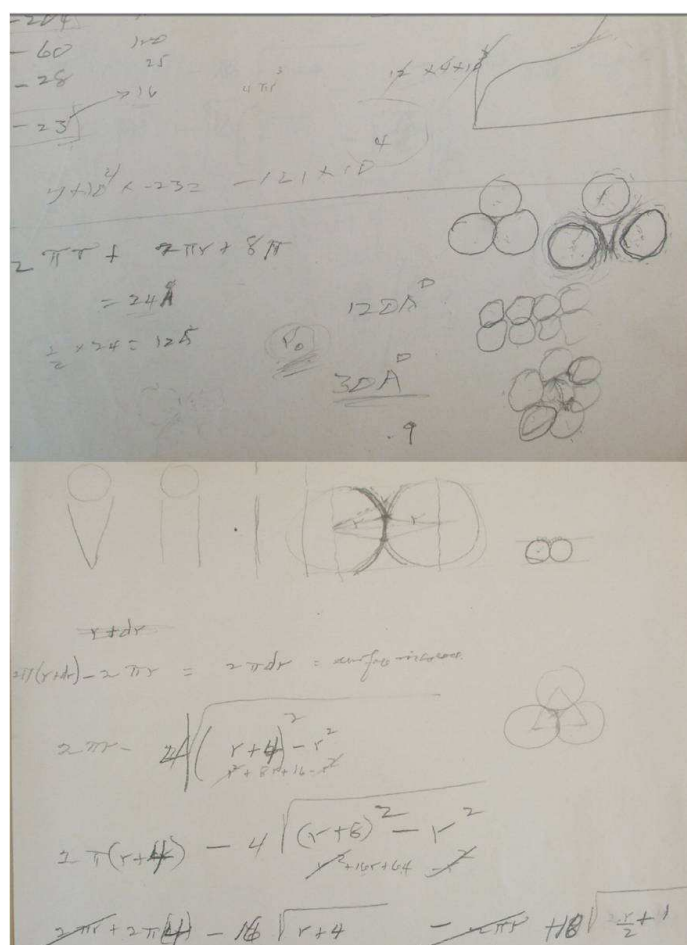


Figure 2.6 — Fragments du brouillon utilisé par Emmett pour calculer la surface de particules de noir de carbone, vers 1942

Tout en haut à droite : une isotherme d'adsorption avec deux « sauts », qui révèlent la présence de deux couches monomoléculaires. A droite : particules entourées de plusieurs couches d'adsorption. Comme on le voit Emmett utilise l'angström comme unité métrique pour exprimer la taille des particules de noir de carbone. La mesure de la surface spécifique des particules s'exprime en revanche en m^2/g . Source : avec l'aimable autorisation des archives de l'Université de l'Oregon.

⁶³ E. TELLER, « The History of the BET paper », in *Heterogeneous catalysis, selected American histories*, op. cit., pp. 227-231

L'apport du mouvement des colloïdes et la versatilité de la BET

Ainsi Emmett, alors que les grandes lignes de la méthode BET sont fixées, s'est rapidement éloigné pour un temps de la catalyse et s'est attaché à appliquer cette méthode sur d'autres particules fines. Le noir de carbone, que ce dernier étudie à partir de 1939 alors qu'il est au département de génie chimique de l'université de Johns Hopkins, est un pigment noir utilisé dans les encres et également dans certains matériaux comme les pneus de voiture pour les renforcer. Avant même que la théorie BET ne soit publiée en 1938, Emmett a très rapidement l'intuition que la méthode qu'il est train d'élaborer peut être utile à de nombreux secteurs en prise avec des particules fines, et non pas seulement en catalyse. Or pendant les années 1930 le mouvement des colloïdes rassemble les secteurs en prise avec ces particules fines comme les pigments. Aussi Emmett, qui n'est pas un chimiste formé à l'étude des colloïdes, se frotte à ce domaine et fréquente les symposiums annuels sur les colloïdes. En l'état des sources mobilisées, il n'est pas possible d'affirmer précisément à quel symposium il s'est rendu, ni exactement ce qu'il comptait y trouver ou y faire. Mais Brunauer écrit à Emmett en 1975 : « Je me rappelle le premier Symposium National sur les Colloïdes auquel j'ai participé ; il se tenait à Ann Arbor au début des années 1930, et tu [Emmett] m'y as emmené. Le professeur Weiser est venu me voir et m'a demandé qui j'étais. Je lui ai donné mon nom, qui ne lui disait rien, mais bien sur je connaissais son livre. Ensuite il m'a demandé : 'Pour qui tu travailles ?' J'ai dit : 'Dr. Paul Emmett'. Il a dit : 'C'est quelqu'un de bien' »⁶⁴.

La mémoire de Brunauer est ici imprécise : les symposiums annuels sur les colloïdes qui ont eu lieu à Ann Arbor (Université de Michigan) sont les symposiums de 1927 et 1940⁶⁵. Vraisemblablement cependant il semble qu'Emmett et Brunauer participent aux symposiums depuis le début des années 1930, alors qu'ils sont à la recherche de méthodes pour déterminer la surface de leurs catalyseurs. La remarque de Brunauer laisse à penser que ces derniers parcouraient la littérature sur les colloïdes⁶⁶, même si, à cette période, leurs publications ne citent pas les principaux journaux et ouvrages sur ce domaine. L'attrait scientifique et industriel de la BET est très vite remarqué par les leaders de l'étude des colloïdes et en particulier par ceux qui s'inscrivent dans la lignée quantitative microstructurale ouverte par Svedberg. Ainsi Kraemer, ancien étudiant et proche collaborateur de Svedberg, qui a peut-être rencontré Emmett par l'intermédiaire des symposiums sur les colloïdes, demande à celui-ci d'écrire un article sur la BET. Il paraît dans le premier numéro de *Advances in Colloid Science*, dont Kraemer est l'éditeur scientifique⁶⁷. Une formule simple est avancée qui permet de lier la surface spécifique avec la taille de la particule. Significativement, Emmett exprime les tailles de particules en microns, et non en millimicrons ; cette dernière unité est alors de moins en moins utilisée.

⁶⁴ Lettre, Brunauer à Emmett, 10 juin 1975, PEP/Correspondance 2.17

⁶⁵ EDE, *Rise and Decline*, op. cit. , Apendix

⁶⁶ Brunauer fait référence ici au professeur Harry B. Weiser (1887-1950), une des grandes figures de la chimie colloïdale américaine, de l'université de Rice à Houston (Texas).

⁶⁷ EMMETT, *The measurement of the surface areas*, op. cit.

La configuration institutionnelle qui abrite l'élaboration de la BET a favorisé sa diffusion vers d'autres secteurs que la catalyse et vers les colloïdes. Le laboratoire de fixation de l'azote est en effet rattaché au ministère de l'Agriculture, et en 1933, la pire année de la crise économique qui démarre en 1929, le directeur du laboratoire vante les mérites de la méthode d'Emmett pour l'étude des sols et de la qualité des terres cultivées afin d'obtenir davantage de fonds. C'est en tous cas ce qu'Emmett raconte bien des années plus tard :

Alors que nous travaillions sur une méthode pour déterminer la surface spécifique des matériaux, il nous est apparu qu'il serait intéressant de mesurer la surface spécifique des sols. Nous avons alors trouvé que les meilleurs sols colloïdaux [« *colloid soils* »] avaient des surfaces d'environ 40 acres par livre. A ce moment nous avions besoin de plus de fonds pour couvrir les recherches prometteuses sur la surface spécifique. Alors le directeur [du laboratoire] a présenté cette nouvelle méthode [...devant le Congrès]. Nous pensions que c'était remarquable et les Sénateurs aussi mais ils ne nous ont pas donné plus d'argent. C'était en 1933 alors que l'argent était rare⁶⁸.

Ainsi, des catalyseurs, Emmett et Brunauer se mettent à étudier les sols tout en restant employés par le même ministère⁶⁹. C'est peut-être par ce biais que ceux-ci en viennent à réaliser le potentiel que le domaine des colloïdes présentait pour leur méthode : l'étude des sols en agriculture relève alors parfois du domaine des colloïdes, comme le suggère l'expression « *soil colloids* » utilisée par Emmett. Cette diversification vers les sols prélude à une diversification plus large de la méthode BET à partir de 1938, qui accompagne Emmett alors qu'il quitte le laboratoire de fixation de l'azote pour rejoindre le département de génie chimique de l'université Johns Hopkins à l'automne 1937. Le laboratoire de la fixation de l'azote peut justifier des travaux sur les sols étant donné qu'il est relié au ministère de l'Agriculture, mais il ne peut pas remplir le rôle de tremplin pour la diffusion d'une instrumentation versatile comme la BET. Aussi, une des raisons majeures qui président à ce virage dans la carrière d'Emmett est sans doute l'ambition de voir cet instrument approprié par d'autres secteurs que la catalyse : « Le développement de cette méthode pour mesurer des surfaces spécifiques ouvre un nouveau champ de recherches que nous sommes très impatients d'explorer ici, à Johns Hopkins » écrit Emmett sans doute pour les responsables de l'université⁷⁰. Une fois à l'université Johns Hopkins, il fait travailler ses doctorants sur les isothermes d'adsorption obtenues sur du noir de carbone (1939), sur du lithopone, et du dioxyde de titane (1938)⁷¹. L'application sur le noir de carbone, qui débute avec les collaborations entre Emmett, ses doctorants, et la firme Cabot Co., « illustre », selon ses termes, « l'application de la nouvelle méthode à des produits d'importance commerciale »⁷². Même si tout au long de sa carrière Emmett s'est concentré sur la catalyse, son implication

⁶⁸ Emmett, Interview, *op. cit.*

⁶⁹ EMMETT, BRUNAUER et Katharina S. LOVE, « The Measurement of Surface Areas of Soils and Soil Colloids By the Use of Low Temperature Van Der Waals Adsorption Isotherms », *Soil Science*, vol. 45 (1938), pp. 57-66

⁷⁰ Emmett, « List of proposal research projects on adsorption and catalysis », non-daté (vers 1938) PEP/Research/20.6/Emmett personal research 1938-1940

⁷¹ PEP/Research/Student Lab Books/12.8-12.48

⁷² Emmett, « List of proposal research projects on adsorption and catalysis », non-daté (vers 1940); La firme Cabot est la plus importante compagnie américaine de production de noir de carbone

dans la diffusion de la BET l'a obligé à se frotter à d'autres univers techniques et industriels. Par exemple en ce qui concerne l'étude des particules fines en suspension dans l'atmosphère et la pollution atmosphérique, Emmett est contacté en 1957 par un chercheur dont « le nom [d'Emmett] lui a été donné [...] comme un chercheur intéressé par les petites particules, leur distribution de taille et d'autres qualités physiques »⁷³.

Les premières mesures effectuées par BET ont du s'affranchir de la suspicion qui entache tout nouvel instrument de pointe, c'est-à-dire que les mesures obtenues ont été testées et calibrées en les comparant avec les mesures données par d'autres instruments. Les étudiants d'Emmett calibrent leurs mesures BET à l'aide d'un ultramicroscope et d'un autre instrument qui vient alors à peine de sortir de cette phase de suspicion : le microscope électronique⁷⁴.

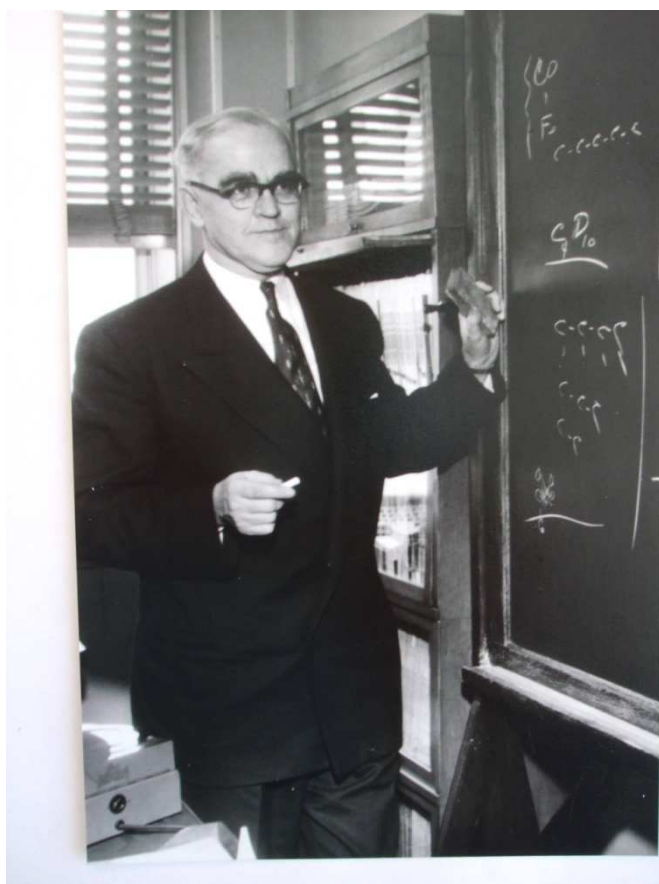


Figure 2.7 — Paul Emmett posant dans une salle de classe, à l'université Johns Hopkins
Avec l'aimable autorisation des archives de l'université de l'Oregon

⁷³ Lettre Louis H. Krough à Emmett, 26 mai 1957, PEP/research/Surface area measurements

⁷⁴ B.L. Harris, « Adsorption of vapors by solids », thèse soutenue en 1941 sous la direction de Emmett, PEP/series II/2.013 dissertations

Eli Burton, le microscope électronique et le « monde des particules fines »

Depuis plus d'un demi-siècle, le microscope électronique est un instrument incontournable pour de nombreuses communautés scientifiques et industrielles. Le physicien allemand Ernst Ruska a reçu très tardivement le prix Nobel de physique (1986) pour rétribuer le premier prototype d'un microscope électronique qu'il élabore en 1933. La fabrication en série et la commercialisation des microscopes électroniques démarre au début de la Seconde Guerre mondiale autour de deux principaux acteurs industriels : la *Radio Corporation of America* (plus communément appelée RCA) aux Etats-Unis et la firme Siemens en Allemagne⁷⁵. John Turkevich (1907-1998), chimiste de Princeton et disciple de Hugh Taylor, a participé au développement du microscope électronique à la RCA à partir de 1940 pour ses propres travaux sur les catalyseurs⁷⁶. Il affirmera plus tard que le microscope électronique a ouvert sur « le monde des particules fines – particules dont la taille s'étale de celle des petites molécules à celle des poussières ordinaires... »⁷⁷. Le microscope électronique est effectivement doté d'un pouvoir de résolution optique supérieur à celui du microscope optique d'environ trois ordres de grandeur⁷⁸.

À la RCA au début des années 1940, une course s'engage entre Turkevich et James Hillier (1915-2007), physicien en charge de la mise au point du prototype que la firme cherche à commercialiser, ainsi que se le rappelle Turkevich : « Pourrais-je synthétiser des particules si fines que le microscope ne pourrait pas les résoudre ? »⁷⁹. L'alliance entre un physicien et un chimiste a été extrêmement féconde pour la microscopie électronique, comme elle l'a été pour l'ultramicroscope entre Zsigmondy et Siedentopf. Au cours des années 1930, plusieurs universitaires en Amérique du Nord se lancent dans l'élaboration d'un microscope électronique, et la plupart de ces entreprises sont rapidement abandonnées devant la

⁷⁵ Pour les premières étapes du microscope électronique en Allemagne, voir la présentation délivrée par Ernst RUSKA à l'occasion de son prix Nobel : « The development of the electron microscope and of electron microscopy », *Review of Modern Physics*, vol. 59 (1987), pp. 627-638 ; Pour le développement du microscope électronique à la RCA, voir Nicolas RASMUSSEN, *Picture Control : the Electron Microscope and the Transformation of Biology in America 1940-1960*, Stanford (CA), Stanford University Press, 1997, Rasmussen se focalise cependant sur l'appropriation de la microscopie électronique par la sphere biomédicale, et non sur l'émergence de l'instrument en lui-même et les apports de la chimie colloïdale dans cette émergence.

⁷⁶ John TURKEVICH, « Catalysis at Princeton University Chemistry Department », in *Heterogeneous Catalysis. Selected American Histories*, *op. cit.*, pp. 463-489, et entretien avec John Turkevich, par Sterling Newberry, vers 1991, Microscopy Society of America Oral History Project

⁷⁷ John TURKEVICH, « The World of Fine Particles », *American Scientist*, vol. 47, n°1 (mars 1959), pp. 96-119

⁷⁸ La résolution d'un microscope est théoriquement limitée par la longueur d'onde utilisée pour magnifier la matière ; plus celle-ci est courte, plus la résolution du microscope est puissante. Les microscopes optiques utilisent des rayons lumineux dont la longueur d'onde est de quelques dixièmes de microns. La résolution pratique des microscopes optiques est d'environ deux dixièmes de microns, ou 200 millimicrons. Les microscopes électroniques utilisent des faisceaux d'électrons pour magnifier la matière ; fortement accélérés, la longueur d'onde des électrons est beaucoup plus courte que celle des rayons lumineux. Ainsi les microscopes électroniques ont une résolution supérieure aux microscopes optiques. Le point clé dans ces microscopes est la focalisation des faisceaux d'électrons par des lentilles électromagnétiques, ce qui est appelé optique électronique. L'optique électronique est avancée principalement en Allemagne au cours des années 1920, et l'invention du microscope électronique au début des années 1930 découle de la maîtrise allemande de l'optique électronique

⁷⁹ Interview de Turkevich, *op. cit.*

complexité de la tache⁸⁰. Il est significatif que le premier prototype fiable en Amérique en Nord, qui sera repris par la RCA, résulte de l'impulsion d'un chimiste et physicien spécialiste des colloïdes, ayant longuement manipulé en ultramicroscopie et intéressé de très près à l'ultracentrifugeuse : Eli Burton de l'université de Toronto. Burton a en effet été le mentor de Hillier avant qu'il ne rejoigne la RCA. Peut-être cette accointance avec le domaine des colloïdes et de l'instrumentation associée a été l'élément distinctif qui a poussé Burton à plus d'acharnement que les autres dans l'élaboration d'un microscope électronique ?

Eli Burton et le premier prototype à l'université de Toronto

Né en Ontario, Eli F. Burton (1879-1948) termine ses études de premier cycle en mathématiques et physique à l'université de Toronto en 1901. Il rejoint ensuite pour plusieurs années le prestigieux Cavendish Laboratory à Cambridge en Angleterre, où il travaille sous la direction du physicien J.J. Thomson, l'un des principaux physiciens qui ont initié la maîtrise théorique et expérimentale de l'électron, quelques années auparavant. C'est au *Cavendish Laboratory* que Burton s'intéresse au domaine des colloïdes, et en particulier aux solutions colloïdales d'argent, pour lesquelles il émet une théorie électrique de stabilité des colloïdes⁸¹. Il retourne à Toronto en 1906 et soutient son doctorat en 1910, et continue à travailler dans le domaine des colloïdes. Il publie en 1916 un des premiers ouvrages écrits par un Nord-Américain sur les colloïdes, *Les propriétés physiques des solutions colloïdales*⁸², dans lequel il reprend les débats qui ont agité Svedberg et Perrin sur la réalité moléculaire. Il est sélectionné pour donner une conférence au premier symposium américain sur les colloïdes en 1923, conférence qu'il intitule d'ailleurs « Les forces déterminant la dimension des particules colloïdales »⁸³, ce qui montre son intérêt précoce à déterminer la taille des particules colloïdales. Burton organise à Toronto le symposium annuel de 1928 sur les colloïdes. C'est vraisemblablement lui qui a invité Nichols à présenter l'ultracentrifugeuse lors de ce symposium. Nichols et Burton ont travaillé ensemble à la fin des années 1920, notamment en échangeant des échantillons et des planches photographiques⁸⁴. Il semble raisonnable d'affirmer que Burton a suivi et contribué à entretenir l'approche préconisée par Svedberg sur la nécessité d'instrumentaliser et de quantifier la recherche sur les colloïdes.

C'est en tous cas dans cette perspective que Burton s'attèle à partir de 1935 à mettre sur pied un prototype de microscope électronique viable. Si l'on en croit les réminiscences de son

⁸⁰ John H. REISNER, « An Early History of the Electron Microscope in the U.S. », *Advances in Electronics & Electron Physics*, vol. 73 (1989), pp. 133-231, surtout pp. 139-149

⁸¹ Pour la biographie de Burton, voir Gérard T. SIMON et Frances W. DOANE, « The History of Electron Microscopy in Canada », in Tom MULVEY (ed.), *The Growth of Electron Microscopy*, Boston (MA), Academic Press, 1996, pp. 79-92; voir aussi J.H.L. WATSON, *A personal recollection – The history of the building of the 1938 Toronto microscopy*, [<http://www.physics.utoronto.ca/overview/history/microscopy/microhist.htm>, accédé le 13 mai 2009]; pour les travaux de Burton sur les colloïdes à Cavendish, voir PARTINGTON, *A history of chemistry*, op. cit., tome 4, p. 736

⁸² *The Physical Properties of Colloidal Solutions* (London: Longmans), qui sera mis à jour et réédité de nombreuses fois

⁸³ Colloid symposium monograph; papers and discussions presented at the first National symposium on colloid chemistry, University of Wisconsin, June, 1923, (J. Howard Mathews ed.), p. 97

⁸⁴ Lettre, Nichols à Burton, 3 mai 1928, JBN 1/ACS conferences 1928-1930

collègue John Watson arrivé à Toronto en 1939, le microscope électronique est pour Burton un moyen d'obtenir « enfin une résolution suffisante pour être capable de voir et d'étudier les particules colloïdales directement en solution et dans les aérosols »⁸⁵. Il vient alors d'assister à une conférence à Berlin sur les applications possibles du microscope électronique⁸⁶, et à son retour à Toronto est fermement décidé à développer un tel microscope au sein du département de physique de l'université, qu'il dirige d'ailleurs depuis 1932. Au cours de la décennie 1930, la spécialité de ce département est la spectroscopie atomique, domaine de recherches alors bien établi internationalement ; travailler en optique électronique paraît beaucoup plus risqué aux étudiants, à juste titre car les fonds gouvernementaux alloués à ce domaine sont quasi-inexistants. Néanmoins Burton parvient à convaincre une poignée d'étudiants à travailler avec lui sur ce prototype à partir de 1935, avec l'aide du Conseil National de la Recherche. Formés en physique, James Hillier et Albert Prebus, en particulier, vont développer un microscope électronique à lentilles magnétiques qui sera le modèle repris commercialement par la suite. En 1938 un premier prototype délivre des images à peu près nettes, s'affranchissant tant bien que mal des problèmes d'astigmatisme et d'aberration causés par les lentilles magnétiques, beaucoup plus complexes que pour les lentilles d'optique classique en verre. Eli Burton assigne comme tâche à ses collaborateurs de prendre autant d'images que possible sur des spécimens biologiques et colloïdaux. De nombreuses images de bactéries et de virus sont prises, ainsi que d'échantillons de noirs de carbone. En se procurant les échantillons, Burton tisse des liens avec les industriels, ce qui permettra par la suite à certains de ses collaborateurs de s'insérer professionnellement. Car les crédits alloués à Burton par le Conseil National de la Recherche ne sont pas renouvelés, ce qui contraint son équipe à quitter l'université de Toronto pour trouver un emploi dans l'industrie. Un étudiant sera ainsi embauché par les laboratoires d'Eastman Kodak, qui rêvent de pouvoir disposer d'un microscope électronique pour leurs propres recherches en photographie ; un autre fondera sa propre entreprise de consultants, sur la base de l'expertise développée sur les noirs de carbone ; James Hillier enfin, rejoindra la RCA, la firme à l'origine de la diffusion de la radio et de la télévision aux Etats-Unis.

En 1940 donc, l'équipe de Burton s'est désagrégée et l'université de Toronto a perdu son expertise en optique électronique, unique en Amérique du Nord. Cependant l'essaimage de son école porte rapidement ses fruits, au point que le microscope électronique est devenu, lorsque les Etats-Unis rentrent en guerre en 1942, un instrument incontournable pour la mobilisation scientifique et technologique. Au cours de la mobilisation, Burton parvient à reconstituer une petite équipe dont les recherches sont largement alignées sur les priorités de l'effort de guerre. En plus des applications militaires du microscope électronique – comme par exemple sur les écrans de fumée ou les masques à gaz –, Burton continue ses projets sur ses applications médicales. Ce dernier a toujours été fasciné par les possibilités qu'ouvrent les instruments de physique de pointe, ainsi que l'étude des colloïdes, dans les sciences de la vie et la médecine. Lorsqu'il prend la tête du département de physique de Toronto, Burton engage

⁸⁵ J.H.L. WATSON, *A personal recollection – The history of of the building of the 1938 Toronto microscopy*, [<http://www.physics.utoronto.ca/overview/history/microsco/microhist.htm>, accédé le 13 mai 2009]

⁸⁶ En 1935 seuls quelques appareils de fabrication « artisanale » existent en Allemagne, la fabrication en série par Siemens ne commençant que quelques années plus tard.

des projets de recherche communs avec des médecins, notamment sur l'étude de l'arsenic colloïdal comme traitement anticancéreux. Le microscope électronique est ainsi perçu, pour certains acteurs des sciences physiques comme Burton, avant tout comme un vecteur de progrès médical⁸⁷. Pendant la Seconde Guerre mondiale, Burton et ses collaborateurs se concentrent sur l'étude des aérosols et des fumées (poussières en suspension dans l'atmosphère), et étudient l'influence des relations entre taille des particules en suspension et pathologies associées par l'inhalation des particules⁸⁸.

Kraemer et le microscope électronique

En février 1940, Hillier est embauché par la RCA ; il y reproduit dans un premier temps le prototype élaboré à l'université de Toronto. La RCA, et singulièrement le physicien d'origine Russe Vladimir K. Zworykin (1889-1982), souvent considéré comme l'inventeur de la télévision, souhaite reproduire la *success story* de la télévision pour le microscope électronique. L'apport d'Hillier est ici décisif, puisqu'à la fin 1943, 58 exemplaires de son premier prototype (baptisé « EM-B », EM pour *Electron Microscope*) sont commercialisés aux Etats-Unis et au Canada, quelques-uns en Russie et en Angleterre⁸⁹. Par la suite un second modèle plus performant (« EM-U ») sera manufacturé à plus grande échelle dans l'après-guerre, avec une emprise internationale plus importante : dès 1948 en Australie et 1949 en Belgique par exemple⁹⁰.

La diffusion de l'instrument dès 1940 va être très rapidement remarquée par Elmer Kraemer, devenu une grande figure américaine du domaine des colloïdes. Avant même que Zworykin ne débute sa campagne de commercialisation du microscope vers le milieu de la chimie (cf. ci-dessous), Kraemer contacte en juillet 1941 le physico-chimiste Thomas F. Anderson (1911-1991), récemment embauché par la RCA pour participer au développement du microscope. Sur le point de lancer une nouvelle revue sur les colloïdes, Kraemer s'adresse à Anderson pour qu'il rédige une partie sur la portée du microscope électronique pour l'étude des colloïdes : « J'ai souhaité inclure dans ce premier volume un papier sur l'application du microscope électronique à la détermination de la taille et des formes des particules sub-microscopiques, et par conséquent j'ai approché divers groupes qui travaillent dans cette perspective »⁹¹. Cette focalisation sur la détermination de la taille des particules s'inscrit dans la brèche ouverte par son mentor Svedberg. D'ailleurs Kraemer conçoit également la BET comme essentielle à l'étude des colloïdes. Bien que, comme détaillé ci-dessus, son origine ne se mêle que très peu avec ce champ des colloïdes, Kraemer décide d'inclure un article sur la BET dans sa nouvelle revue. Cette technique, ainsi que la microscopie électronique, sont

⁸⁷ Cf. RASMUSSEN, *Picture Control*, *op. cit.*

⁸⁸ « Application of the 1938 Model Toronto Microscope », in WATSON, *A Personal Recollection*, *op. cit.*, [<http://www.physics.utoronto.ca/overview/history/microsco/microapp.htm>, accédé le 13 mai 2009]

⁸⁹ REISNER, *Early history*, *op. cit.*, p. 174

⁹⁰ P.S. TURNER, M. VESK, « Electron Microscopy in Australia », Dirk VAN DYCK, « Electron Microscopy in Belgium », in *The Growth of Electron Microscopy*, *op. cit.*, pp. 39-54 & 67-78

⁹¹ Lettre, Elmer Kraemer à Thomas Anderson, 19 juillet 1941, APS, Thomas Foxen Anderson Papers, Ms. Collection 75, Series I, folder « Advances in Colloid Science »

néanmoins pour Kraemer des méthodes clés de la quantification des microstructures, et donc de la « science » des colloïdes dans la veine de Svedberg.

Ayant travaillé des années chez Du Pont, Kraemer est bien conscient de la nature pragmatique de la relation que l'industrie entretient vis-à-vis de l'instrumentation. D'autres instruments sont déjà utilisés pour mesurer la taille des particules fines et le microscope électronique ne peut espérer percer dans les laboratoires industriels que s'il apporte une valeur ajoutée immédiate par rapport à ces instruments. Ainsi Kraemer, qui ne souhaite pas que sa revue se restreigne aux milieux académiques, demande à Anderson que son article « réponde à toutes les questions qui sont posées par de nombreux chercheurs, particulièrement dans l'industrie, et qui souhaitent savoir si le microscope électronique est plus indiqué, pour la détermination de la distribution de taille des multiples produits colloïdaux et finement divisés, que les méthodes plus vieilles de microscopie ultraviolet, les ultracentrifugeuses etc. »⁹². Anderson, suivant les directives de Kraemer, met au cœur de son article la détermination de la taille et de la forme des particules obtenues par différentes méthodes et instruments, et commente les avantages du microscope électronique par rapport aux autres instruments comme l'ultracentrifugeuse⁹³. On retrouve les dépendances qui persistent entre instrument et unité métrique exprimant la mesure de taille. En effet Anderson exprime les résultats de distribution de taille obtenues par ultracentrifugeuse en millimicrons, tandis que celles obtenues par microscopie électronique sont exprimées en angström (symbole Å, 10^{-10} m). Cette unité est alors indissociablement mêlée à la pratique de la microscopie électronique, tandis que l'usage du millimicron perd en importance. En effet, l'angström devient une unité métrique avalisée par le Bureau international des poids et des mesures en 1927, tandis que le millimicron ne sera jamais reconnu par cet organisme.

Le microscope électronique est un instrument pour lequel les physiciens et ingénieurs physiciens *mainstream* ont joué un rôle beaucoup plus considérable que pour l'ultramicroscope ou l'ultracentrifugeuse. Surtout, ses pionniers ont prédit, dès le début des années 1930, que ce microscope permettrait à terme de « voir » les plans atomiques⁹⁴. Il n'est donc pas surprenant que l'angström, unité de physiciens par excellence et historiquement associée aux atomes, devienne au cours des années 1930 inséparable de la microscopie électronique. Cette unité est scientifiquement instituée au cours du Congrès sur le Soleil qui se déroule à Oxford en 1905, son usage est ainsi se répand ainsi rapidement parmi les scientifiques qui étudient les rayonnements solaires et extra-terrestres. À l'origine, cette unité est associée aux mesures de longueurs d'onde de rayonnement électromagnétique ; elle est issue du spectroscopiste suédois Anders Jonas Ångström (1818-1874), qui a précisément

⁹² Kraemer à Anderson, 26 juillet 1941, *Ibid.*

⁹³ Thomas F. ANDERSON, « The Study of colloids with the electron microscope », *Advances in Colloid Science*, vol. 1 (1942) (Interscience Publishers, E.O. Kraemer éditeur), pp. 353-390

⁹⁴ Ce qui a d'ailleurs été un argument phare pour justifier les considérables efforts de développements que la microscopie électronique à nécessité ; Cf. par exemple *Le Monde* (2-3-4 janvier 1939) : « Pour la première fois dans l'histoire de la science, un atome a pu être contemplé », ou *Science Newsletter*, 4 mai 1940 : « Les nouveaux microscopes électroniques pourraient un jour 'voir' des atomes »

dressé en 1868 le spectre du rayonnement solaire⁹⁵. Toutefois la diffraction des rayons X appliquée aux cristaux, qui se répand parmi les physiciens à partir des années 1920, entraîne une large dissémination de l'angström parmi les communautés scientifiques⁹⁶. En effet, la diffraction des rayons X permet de déterminer la distance entre les plans atomiques dans les cristaux, et il se trouve que cette distance est la plupart du temps de l'ordre de quelques angströms. Les cristallographes et les physiciens s'approprient ainsi cette unité au cours des années 1920. Turkevich, bien que chimiste, exprime la taille de ses particules en angströms quand il travaille avec Hillier sur des catalyseurs au début des années 1940, parce qu'il utilise un microscope électronique⁹⁷. Le millimicron, lui, est un produit de la chimie colloïdale, et, dans un premier temps, reste inséparable des pratiques d'ultramicroscopie et d'ultracentrifugation. Les unités racontent l'histoire.

Cependant si l'avènement du microscope électronique doit beaucoup aux physiciens, le domaine des colloïdes agit sur cette instrumentation au cours des années 1930 et 1940 comme un puissant catalyseur de développement. Les praticiens des colloïdes comme Kraemer et Burton, dans la lignée quantitative et instrumentale de Svedberg, poussent à la fiabilité des microscopes en leur demandant de répondre aux questions qui les taraudent : quelle est la taille et la distribution des particules ? Anderson affirme alors que le microscope électronique « sera le parfait outil pour la science des colloïdes dans le futur », puisque la gamme de taille pour laquelle l'efficacité de ce nouveau microscope est la plus grande « coïncide presque exactement » avec l'échelle colloïdale⁹⁸. Peut être pense-t-il à Burton lorsqu'il continue en affirmant : « Il est difficile de ne pas admirer les hommes qui ont très tôt perçu les potentialités du microscope électronique et qui se sont battus pour en faire l'outil pratique de recherche qu'il est aujourd'hui »⁹⁹. Anderson ne s'y trompe pas en affirmant en 1941 que le microscope électronique est avant tout un « outil *pratique* de recherche ». En effet une des caractéristiques remarquables de la diffusion du microscope électronique est que le rôle joué par les universitaires, une fois passée l'impulsion initiale de l'université de Toronto, est dans un premier temps assez faible comparé au rôle des industriels. Il faudra attendre les années 1950 pour que le monde académique prenne massivement conscience du potentiel de ces microscopes, et prenne le relais de l'industrie et de la RCA, en particulier en ce qui concerne leur amélioration. Bien au fait de cette situation, Kraemer insiste auprès d'Anderson pour que son article s'adresse avant tout aux chimistes dans l'industrie : « Je cherche à présenter autant que possible des résultats pratiques susceptibles d'intéresser les chimistes industriels ; car je pense que ce sont ces derniers, plutôt que les universitaires, qui seront les plus intéressés par

⁹⁵ Olof BECKMAN, *Ångström father and son*, Uppsala, Acta Universitatis Upsaliensis, 1997

⁹⁶ EWALD Paul P. (ed.), *Fifty Years of Xray Diffraction*, Utrecht, International Union of Crystallography, 1962

⁹⁷ John TURKEVICH, « Electron Microscopy of Catalysts », *Journal of Chemical Physics*, vol. 23, n°2 (1945), pp. 235-249

⁹⁸ ANDERSON, *Electron microscopy study of colloïdes*, *op. cit.* p. 388

⁹⁹ *Ibid.*, p. 389

votre contribution, et je parierais que la plupart des acheteurs du microscope seront parmi eux »¹⁰⁰.

La RCA, le microscope électronique, et l'état d'urgence industriel et militaire

Effectivement durant les premières années de la commercialisation du microscope électronique, l'industrie constitue le principal utilisateur de ces instruments. Alors que le conflit est déclenché en Europe, et que les Etats-Unis s'appêtent à leur tour à se mobiliser, le noyau de propagation de la microscopie électronique bascule de l'université de Toronto vers les Etats-Unis, et plus particulièrement vers les laboratoires de la RCA, qui ont été transférés en 1942 près de Princeton, dans le New-Jersey. Si l'on peut admettre que le microscope électronique correspond à un besoin dans certaines communautés scientifiques, l'existence d'un marché associé ne va pas de soi à la fin des années 1930. Beaucoup de physiciens et de microscopistes doutent de l'utilité des images produites, quand ils ne doutent pas de la fiabilité même du microscope électronique. C'est avec l'action conjointe des capacités scientifiques, techniques et commerciales de Zworykin et Hillier que la commercialisation des microscopes électroniques va véritablement démarrer à partir de 1941.

Le laboratoire industriel s'est généralisé au cours des années 1920 et 1930 ; une grande partie de ceux-ci sont équipés d'instruments de pointe, nécessitant un personnel qualifié. C'est précisément cette expansion de la recherche industrielle au cours de l'entre-deux guerres qui convainc Zworykin de l'avenir commercial du microscope électronique. Crédité de l'invention de la télévision, celui-ci utilise sa réputation auprès des communautés et des grands médias scientifiques pour pousser l'insertion de cet instrument dans l'industrie, et en particulier dans l'industrie chimique. Il multiplie les conférences et les articles dans les grands journaux comme *Science* et *The New-York Times*. En mars 1942 il présente le microscope électronique au cours du congrès de la section nord-est de l'*American Chemical Society*, à Boston. Dans une veine que reprendra Turkevich quelques années plus tard, il incline les chimistes à penser « structure » et donc microscopie électronique : « La chimie est la science de la composition et de la transformation de la matière. Par conséquent, elle est en prise avec des structures qui s'organisent à partir des dimensions atomiques jusqu'à celles immédiatement visibles à l'œil nu »¹⁰¹. En novembre 1942 il est également à Chicago, pour l'Exposition Nationale de Chimie (*National Chemical Congress*) et à laquelle il fait à peu près la même présentation. Cette exposition nationale rassemble la section de Chicago de l'*American Chemical Society* et la conférence nationale pour l'industrie chimique. C'est au cours de cette conférence que va être instituée la Société Américaine de Microscopie Electronique (EMSA, *Electron Microscope Society of America*). Zworykin est invité par le président de la section de Chicago de l'*American Chemical Society* à organiser un symposium dédié au microscope électronique, au sein de l'Exposition nationale. Plus de 80 personnes assistent à ce symposium, la moitié environ représentant des industries, dont Nichols pour Du

¹⁰⁰ Lettre, Kraemer à Anderson, 29 août 1941, APS, Thomas Foxen Anderson Papers, Ms. Collection 75, Series I, folder « Advances in Colloid Science »

¹⁰¹ Vladimir Zworykin, « The Electron Microscope and its application in Chemistry », DSL, Zworykin collection

Pont. Hormis les représentants de la RCA et de la *General Electric*, les chercheurs industriels présents proviennent de l'industrie chimique et pétrochimique¹⁰². Ainsi, sous l'action de lobbying efficace de Zworykin, l'industrie chimique est un des principaux clients des microscopes électroniques de la RCA. Les firmes chimiques sont bien représentées parmi les clients du premier modèle, l'EM-B (table 2.1).

| Industrie chimique | Autres industries | Laboratoires gouvernementaux | Laboratoires académiques |
|-------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| U.S. Rubber Co. | Westinghouse Lamp Division | U.S. Naval Medical Research Institute | University of Pennsylvania |
| Carbide & Carbon Chemical Co. | Bausch and Lomb | U.S. Bureau of Mines | University of Pittsburgh |
| Linde Air Products | | U.S. National Bureau of Standards | University of Illinois |
| Hercules Powder Co. | | | Carnegie Tech |
| E.I. du Pont de Nemours & Co. | | | SAM Laboratories, Columbia University |
| Celanese Co. | | | Mount Sinai Hospital (New York City) |
| Goodyear Tire and rubber Co. | | | |
| New Jersey Zinc Co. | | | |
| American Viscose Co. | | | |
| Interchemical Co. | | | |

Table 2.1 — Liste des institutions qui ont acheté un EM-B à la RCA, avant 1944 donc
Source : Rapports d'intervention sur les microscopes de la RCA, Tilden Merle collection, DSL

¹⁰² « EMSA 1943 yearbook », pp. 53-4, in Sterling P. Newberry, *EMSA and its People. The First Fifty Years*, EMSA, 1992



Figure 2.8 — Article « Le microscope électronique en chimie » de Zworykin, paru dans la revue *Electronics* en janvier 1943

Sur la photo de la page de gauche : à gauche : Zworykin ; à droite : Hillier

L'effort de guerre a favorisé la diffusion du microscope électronique. Inlassablement, Zworykin présente avant tout son microscope comme un instrument « pratique » pour résoudre les problèmes « pratiques » soulevés par l'engagement de l'armée américaine dans le conflit. La production et la vente de ces microscopes sont assignées d'une haute priorité de 1942 à 1945, c'est-à-dire que les matériaux nécessaires à leur production doivent être facilement accessibles aux unités de production de la RCA, et leur vente limitée aux institutions scientifiques engagées dans cet effort de guerre. Cette dernière condition, cependant, n'est pas très restrictive car c'est la quasi-totalité des ressources scientifiques américaines qui se tourne vers cet effort. La Seconde Guerre mondiale a en effet reconfiguré dramatiquement et durablement la nature et l'extension de l'intervention de l'Etat dans les affaires scientifiques et techniques du pays. Les frontières s'ouvrent radicalement entre militaires, politiques, hommes d'affaire et chercheurs universitaires ou industriels. La préparation des Etats-Unis au conflit qui prélude à la Seconde Guerre mondiale, et en particulier sa préparation technique et scientifique, précède en réalité largement son entrée en guerre « officielle » au printemps 1942. Dès juin 1940 le *National Defense Research Committee* est institué dans le but de coordonner la recherche scientifique à vocation militaire. Un an plus tard ce comité est remanié en un Bureau gouvernemental, l'*Office of Scientific Research and Development* (OSRD, Bureau de la Recherche Scientifique et du Développement), aux prérogatives plus larges que le comité dont il est issu. L'OSRD mobilise et oriente les capacités scientifiques du pays vers les priorités qu'il établit conjointement avec

le gouvernement, notamment le *War Production Board*, y compris et surtout les capacités recelées par les laboratoires industriels. La plupart des grandes firmes chimiques ont ainsi travaillé pendant toute la durée du conflit pour l'OSRD, ce qui leur autorise à s'équiper d'un microscope électronique. Vannevar Bush, alors directeur de l'OSRD et plus tard un des principaux personnages qui ont façonné les politiques scientifiques dans l'après-guerre, a donné son accord pour favoriser la commercialisation des microscopes électroniques par la RCA et s'en justifie ainsi :

[le microscope électronique] est un instrument important et je suis persuadé qu'il ne fait pas l'objet d'une attention suffisante étant donné son importance potentielle. Le sujet m'est apparu il y a quelques temps en rapport avec la production par la RCA, alors que les responsables des priorités [de guerre, établies par le *War Production Board*] se sont tournés vers moi pour quelques conseils à ce propos. Je n'ai pas hésité à leur recommander d'autoriser le programme tel que présenté par la RCA. Je n'ai pas émis cet avis sur la base des applications immédiates pour la guerre, mais plutôt à partir de ma conviction intime que les nouvelles connaissances obtenues par l'utilisation de cet instrument par de nombreux laboratoires compétents mèneront inévitablement à des avancées dans nos techniques [art], ce qui aura un impact favorable sur l'effort de guerre. Il serait difficile, j'en suis sûr, de désigner des avancées précises pour lesquelles cette source [le microscope électronique] est en train de contribuer, bien que je pense qu'il soit possible de le faire.¹⁰³

Effectivement, l'intuition de Bush sur l'importance du microscope électronique dans l'effort de guerre est largement justifiée. Dans le projet Manhattan en particulier, cet instrument a servi à caractériser les barrières de diffusion pour l'enrichissement de l'uranium, et également à caractériser les catalyseurs utilisés pour la préparation du chlore hexafluoré, et donc indirectement de l'eau lourde, un composé nécessaire pour le ralentissement des neutrons et donc pour la préparation de la bombe atomique¹⁰⁴. Emmett et Nichols, comme Turkevich, ont également participé au projet Manhattan¹⁰⁵.

Conclusion

Résumons-nous. La table suivante permet de récapituler les points saillants de l'émergence des instruments ou techniques visant à saisir les micro-mondes mis en avant dans ce chapitre :

¹⁰³ Lettre, V. Bush à W.C. White, 5 février 1942, NARA, OSRD records, RG 227, NC-138 Entry 1, Box 43

¹⁰⁴ Cf. interview de Turkevich, *op. cit.*

¹⁰⁵ Pour Emmett, voir « Autobiographical remarks », *op. cit.* et pour Nichols : lettre, Cole Coolidge à Nichols, 8 août 1945, JBN 4/Miscellaneous

| | inventeurs | institution | rapport au mouvement des colloïdes | motivation scientifique | motivation technique |
|-------------------------|---------------------------|---|------------------------------------|--|---|
| ultramicroscope | Zsigmondy/Siedentopf 1902 | Carl Zeiss informellement , commercialisation Carl Zeiss | endogène | ++ : hétérogénéité des solutions colloïdales | +: liens taille de particules/couleur des vitraux |
| ultracentrifugeuse | Svedberg/Nichols 1923 | Université de Wisconsin | endogène | ++: instrument versatile pour mesurer distribution tailles de particules | ?: (Études pour les pigments/émulsions photographiques) |
| BET | Emmett/Brunauer 1937 | Fixed Nitrogen Laboratory (ministère de l'Agriculture) | périphérique (aide à la diffusion) | +: mécanismes d'adsorption | ++: rationaliser le développement des catalyseurs |
| microscope électronique | Burton/Hillier 1938 | Univ. Toronto/ commercialisation RCA | favorise émergence du microscope | ++: instrument versatile | ++: applications en médecine/hygiène industrielle |

Table 2.2 — Contexte de l'élaboration des instruments présentés dans ce chapitre

Cette récapitulation permet de mettre en avant les traits communs ou distinctifs qui caractérisent l'élaboration de cette instrumentation. Sauf pour l'ultracentrifugeuse, celle-ci fait appel à la collaboration entre physiciens et chimistes. L'ultracentrifugeuse a davantage fait appel à des compétences en génie mécanique qu'en physique. En revanche, les collaborations pour les trois autres instruments entre physiciens et chimistes sont de différentes natures. Pour l'ultramicroscope, la division du travail s'opère sur un clivage théorie/instrument : le chimiste (Zsigmondy) propose la conception de l'instrument pour ses propres questions théoriques et se charge de la préparation des échantillons qui viendront infirmer ou confirmer ses théories, tandis que le physicien s'occupe de l'élaboration du dispositif. Dans le cas de la BET, l'apport du physicien (Teller) est plus restreint, dans la mesure où celui-ci ne contribue qu'à une part de la théorie (relier le volume adsorbé avec la surface de la particule), tandis que les chimistes (Emmett et Brunauer) ont également largement contribué à la théorie et au dispositif expérimental. Pour le microscope électronique, cette division du travail entre physiciens et chimistes ressemble à celle à l'œuvre pour l'ultramicroscope : le chimiste (Burton) fournit les échantillons à examiner (qui sont alors « colloïdaux ») tandis que le physicien (Hillier) a en charge l'assemblage de l'ensemble des pièces du microscope.

Une différence majeure et importante à souligner entre l'ultramicroscope et le microscope électronique se dégage néanmoins. Plus de trois décennies les séparent, et les enjeux scientifiques qui préludent à l'émergence de l'ultramicroscope sur la nature des micro-mondes ont largement perdu de leur acuité et de leur pertinence quand le microscope électronique est élaboré. Les ambitions qui alimentent les acteurs de l'ultramicroscope et de l'ultracentrifugeuse sont avant tout scientifiques et sont tendues vers un seul but : la quantification absolue des microstructures. Ce qui ne veut pas dire que toute considération technique est absente, car cette quête vers la mesure des micro-mondes s'insère dans une stratégie plus vaste d'explication et de performance sur les substances d'essence

réductionniste. Néanmoins quand ces instruments sont élaborés, il n'y a pas de problème pratique circonscrit pour lesquels les savoirs générés par ces instruments pourraient être immédiatement « applicables ». Zsigmondy, significativement, a du quitter son emploi chez le verrier Schott pour inventer l'ultramicroscope. Pour la BET, les motivations scientifiques et techniques se mêlent plus inextricablement ; les savoirs générés par la BET sont supposés être immédiatement applicables au développement des catalyseurs de fer pour la synthèse de l'ammoniac. Enfin, lorsque le microscope électronique est élaboré, la focalisation sur les microstructures n'est plus une démarche originale, elle est en passe de devenir routinière dans l'industrie. Ce qui est un moteur important pour son élaboration et sa commercialisation puisque les acteurs qui y participent sont déjà assurés de la pertinence scientifique et technique de l'investigation des microstructures et de l'existence d'un marché potentiel conséquent.

Ce nouveau mode d'appréhension des micro-mondes n'est pas propre à la chimie colloïdale, et semble également caractériser d'autres domaines des sciences physiques. Parmi les physiciens, l'historien de la métallurgie Cyrus Smith affirme que « [la diffraction des rayons X] marque le début d'un retournement de la tendance vers le toujours plus petit qui a caractérisé la science physique depuis ses débuts. La structure est devenue mesurable, ce qui a attiré l'attention sur ces propriétés si sensibles à la structure qu'elles avaient été jusqu'ici impossibles à appréhender "scientifiquement" »¹⁰⁶. La diffraction des rayons X est un instrument ou une technique incontournable dans ce nouveau mode d'appréhension des micro-mondes. Toutefois la chimie colloïdale n'interagit avec la diffraction des rayons X qu'une fois cette dernière méthode solidement implantée, pour calibrer d'autres instruments et méthodes d'exploration des micro-mondes auquel le mouvement des colloïdes a davantage contribué comme l'ultracentrifugeuse. C'est pourquoi cette méthode n'a pas été détaillée ici. D'autres techniques et instruments permettant de sonder les micro-mondes – mais qui ne relèvent pas nécessairement du réductionnisme microstructural – émergent également pendant l'entre-deux guerres, comme la spectroscopie infrarouge¹⁰⁷ et la résonance magnétique nucléaire¹⁰⁸. Comme nous le verrons dans la partie suivante, l'ensemble de ces instruments et méthodes – ultracentrifugeuse, microscope électronique, BET, spectroscopie infrarouge... – seront rapidement appropriés par l'industrie.

¹⁰⁶ Cyril S. SMITH, « Matter versus Materials : A Historical View », in *A Search for Structure: Selected Essays on Science, Art, and History*, Cambridge (MA), MIT Press, 1981, pp. 112-126, citation p. 121

¹⁰⁷ Yakov M. RABKIN, « Technological innovation in science : the adoption of infrared spectroscopy by chemists », *Isis*, vol. 8 (1987), pp. 31-54

¹⁰⁸ Carsten REINHARDT, *Shifting and Rearranging. Physical Methods and the Transformation of Modern Chemistry*, Sagamore Beach: Watson Publishing International, 2006

Partie II. Appropriation par l'industrie — La recherche
« fondamentale »

Chapitre 3. APPROPRIATION PAR L'INDUSTRIE (I) : INSERTION DE LA CHIMIE COLLOÏDALE ET RECHERCHE « FONDAMENTALE » CHEZ DU PONT – 1917-1928

Dans cette partie nous reprenons l'histoire de la chimie colloïdale, abordée dans la première partie, du point de vue de son appropriation par l'industrie, en étudiant en particulier le cas de la compagnie E. I. du Pont de Nemours (par la suite notée simplement Du Pont), une compagnie fondée en 1802 sur les berges de la rivière *Brandywine* près de Wilmington, dans le Delaware. Cette compagnie est très pertinente pour analyser les bouleversements techniques et industriels dans lesquels cet essor de la chimie colloïdale dans l'entre-deux guerres, ainsi que l'instrumentation de pointe qui l'accompagne, s'inscrivent. Au sortir de la Première Guerre mondiale en effet, Du Pont est sans doute la plus puissante entreprise américaine dans le secteur de la chimie. En 1921, ses ventes totalisent 55 millions de dollars, et 85 en 1925¹. Tandis que les explosifs ont constitué son activité historique, elle est alors engagée dans une vaste campagne de diversification, afin de s'implanter dans les marchés plus prometteurs des fibres textiles et des colorants, des peintures et des vernis. Pour mener à bien cette diversification, elle mobilise d'importantes activités de recherche ; les plus importantes, sans doute, parmi l'ensemble des entreprises du secteur. En 1927 comme nous le verrons, elle engage un important programme de recherche « fondamental », dont la chimie colloïdale constitue un axe privilégié.

Au tournant des années 1920, alors que cette stratégie de diversification est déjà bien amorcée, Du Pont héberge plusieurs laboratoires dans lesquels travaillent plus d'une centaine de chimistes ; la compagnie dépense alors pour ses activités d'« expérimentation et de recherche » plus d'un million et demi de dollars, soit environ 3% de son chiffre d'affaires². Quelques années auparavant un vaste département centralisant ces activités d'expérimentation et de recherches appelé le « *Chemical Department* » a été institué. Ce département chapeaute et devient responsable des activités des laboratoires de la compagnie. La diversification de Du Pont vers des lignes de produit qui n'ont plus grand chose à voir avec les explosifs a constitué un formidable défi pour les chimistes de ce département ; cette diversification a induit la compagnie à embaucher massivement des chimistes de plus en plus formés et spécialisés. Cependant la chimie organique, qui constitue comme nous le verrons l'ancrage théorique et disciplinaire de la première génération de ces chimistes hautement qualifiés, va s'avérer insuffisante pour répondre aux exigences techniques et industrielles de cette diversification. Une autre spécialité de la chimie, la physico-chimie et sa cousine la chimie des colloïdes, va

¹ H&S, Appendix I

² *Ibid.*, p. 120

progressivement pénétrer les laboratoires du *Chemical department* et des départements industriels de Du Pont.

Cette période de l'histoire de Du Pont a déjà fait l'objet de plusieurs travaux académiques³. Pap Ndiaye montre que cette phase de l'histoire de Du Pont consacre l'émergence d'une troisième « culture technique » au sein de ses usines et de ses laboratoires, celle des ingénieurs chimistes⁴. L'entre-deux guerres est effectivement la période de maturation du génie chimique, pendant laquelle son autonomie académique et son identité professionnelle sont consacrées. Selon Ndiaye, les deux autres cultures techniques au sein desquelles le génie chimique s'implante, sont celles des chimistes organiciens et des ingénieurs non spécialisés, qui précèdent cette professionnalisation du génie chimique. Or, cette culture technique des chimistes est elle-même en phase de recomposition alors que le génie chimique se solidifie. Ces chimistes ouvrent en effet radicalement leurs laboratoires à d'autres spécialités que la chimie organique. L'objet de ce chapitre est de retracer l'émergence d'une autre « culture technique » au sein de Du Pont, celle des physico-chimistes. Il s'agit en particulier d'y détailler l'insertion des théories colloïdales puis l'essor des spécialistes des colloïdes, et d'analyser comment cet essor s'inscrit dans ce mouvement vers la recherche « fondamentale ». Comment cette spécialité de la chimie en est-elle venue à être perçue par les leaders du *Chemical department* comme génératrices de connaissances « utiles » ? Le fait que cette insertion commence à peu près en même temps qu'une fraction des chimistes commence à qualifier leurs activités de « fondamentale » est-elle plus qu'une simple coïncidence ?

Diversification, « recherche fondamentale », et insertion des colloïdes chez Du Pont

L'existence de ce département de Chimie en tant que structure stable de Du Pont, dotée de la responsabilité de l'ensemble de ses laboratoires, est déjà en soi une innovation organisationnelle et managériale remarquable. Il faut distinguer ici la création des premiers laboratoires de Du Pont (1902) de l'institution de la structure formelle de l'entreprise qui les gère, quelques années plus tard. L'instauration du département de Chimie en 1911 sera principalement le fait de Charles Reese (1862-1940), titulaire d'un doctorat en chimie organique à l'université d'Heidelberg et embauché en 1902 au sein du plus ancien laboratoire de Du Pont, l'*Eastern Laboratory*⁵. Au début des années 1910 il centralise progressivement l'ensemble des activités de « recherches et autres sujets techniques » sous la gestion de ce département dont il est le premier directeur, établissant un véritable empire expérimental au sein de Du Pont⁶. Ces « recherches et autres sujets techniques » regroupent en réalité toute la

³ Voir la bibliographie en introduction générale à la thèse

⁴ Pap NDIAYE, *Du nylon et des bombes. Du Pont de Nemours, le marché et l'état américain 1900-1970*, Paris, Belin, 2001

⁵ H&S pp. 58-64

⁶ Mémoire, Reese aux directeurs des laboratoires, 10 décembre 1920, HML, Acc 500, series II, part 2, Box 291/Misc. correspondence with the Chemical Department 1918-1921

palette d'activités extrêmement hétérogènes qu'un « laboratoire » peut contenir : analyse et contrôle de la qualité des produits, standardisation des critères de qualité et des rendements, élaboration de nouveaux procédés ou amélioration de procédés existants, amélioration plus ou moins radicale de produits existants, recherche de nouveaux produits... Même si la plupart de ces activités se recouvrent et sont souvent interdépendantes, « recherche » ne désigne qu'une fraction de celles-ci, dont les limites sont assez subjectives et sujettes à négociation. Avec l'embauche plus systématique, au tournant des années 1920, de chimistes formés au doctorat et à la recherche universitaire, la signification de « recherche » va devenir plus exclusive, en se différenciant plus formellement des « autres sujets techniques ».

Considérer le chimiste de laboratoire comme un groupe homogène est extrêmement aveuglant pour étudier l'histoire de la recherche industrielle, comme le montre l'historien Ernst Homburg dans sa revue des premiers laboratoires allemands dans l'industrie des colorants : « Ce serait une grave erreur de confondre le 'chimiste de laboratoire' avec le 'chimiste de recherche' »⁷. Dans le cas de Du Pont, les activités de contrôle et d'analyse, cruciales pour le fonctionnement quotidien des usines et donc des départements de production, sont placées à cette époque sous l'autorité du département de Chimie. L'*Experimental Station* (notée simplement par la suite la Station, située à Wilmington), pourtant le laboratoire le plus axé « recherche » du département, contient une section analytique et chapeaute de nombreuses activités analytiques et de tests pour l'ensemble des départements de production⁸. Le regroupement de l'ensemble des activités de laboratoire sous l'autorité d'un seul département a inévitablement favorisé les tensions et conflits au sein du département de Chimie, mais aussi entre le département de Chimie et ceux de production. Bien souvent ces derniers se sentent dépossédés de leurs compétences lorsque les activités de contrôle et d'analyse routinière échappent à leur responsabilité. Par exemple les responsables des usines des peintures et vernis souhaitent « centraliser tous les travaux techniques des usines sous leur direction »⁹. Les résultats ou analyses obtenus par le département de Chimie sont parfois consciemment dupliqués dans les départements industriels, par méfiance ou méprise à l'égard des chimistes du département de Chimie¹⁰.

De leur côté les chimistes les plus formés académiquement commencent à dominer les postes de direction du département de Chimie (cf. tables 3.1 & 2). Capitalisant sur leur longue

⁷ Ernst HOMBURG, « The emergence of research laboratory in the dyestuffs industry, 1870-1900 », *British Journal for the History of Science*, vol. 25 (1992), pp. 91-111, citation p. 93

⁸ Hamilton Bradshaw à Stine et Bryan, « Organization of Experimental Station », 14 mars 1919, CRD 20/Experimental Station 1907-1919 ; Cf. aussi cet échange entre le responsable « chemical engineering » du département de Chimie et le directeur de la Station : « Beaucoup des rapports [de la Station] contiennent des descriptions de méthodes d'analyses et de tests développés pour les activités de contrôles, d'analyse et de test des matériaux bruts ou des produits finis dans les usines », in Mémoire, Bryan à A.P. Tanberg, 1^{er} mars 1921, HML, Acc 500, series II, part 2, Box 291/Misc. correspondence with the Chemical Department 1918-1921

⁹ Mémoire, J.E. Booge à H. Bradshaw, « service of chemical department to manufacturing operations in chemical engineering lines », 5 mai 1920, CRD 18/ Chemical department 1917-1926. Ce memo a été demandé à Booge (un chimiste de recherche titulaire d'un doctorat en chimie physique et qui collabore fréquemment avec les chimistes des usines) afin qu'il évalue l'état des « coopérations » entre le département de Chimie et les usines pour chacune d'entre elles. Dans bien des cas Booge est pessimiste sur l'état de ces coopérations, et significativement demande à ce que la diffusion de son mémo reste « très restreinte ».

¹⁰ H. Bradshaw à W.M. Whitten, 7 mai 1920, CRD 18/ Chemical department 1917-1926

formation théorique et expérimentale, ces derniers souhaitent réformer les pratiques expérimentales au sein du département vers les habitudes qu'ils ont développées à l'université. « Nous avons fréquemment été frappés », écrit en 1919 le directeur adjoint du département à la recherche Charles Stine (1882-1954), « par le fait que la plupart des rapports de travaux chimiques qui atteignent ce bureau semblent indiquer que nous considérons nos problèmes de façon trop empirique »¹¹. Et Stine, qui a obtenu son doctorat en 1907 à l'université de Johns Hopkins, une des plus prestigieuses pour la chimie aux Etats-Unis, de demander à ses chimistes de théoriser davantage les expériences en cours. Le recrutement plus conséquent de docteurs en chimie s'est accompagné d'une division du travail plus stricte et d'une séparation des rôles plus formelle. Alors qu'en 1918 la « main d'œuvre chimique » (« *chemical workforce* ») de la Station ne comporte que des « chimistes », en 1919 elle comporte des « chimistes et des ingénieurs »¹². Ce qui ne veut pas dire que des « ingénieurs » ont été recrutés et ajoutés aux « chimistes », mais plutôt que les rôles et les identités de fonction se sont différenciés. De même entre 1917 et 1919 les activités du département de Chimie ont été scindées en deux groupes sous l'autorité de deux directeur-adjoints : « recherche » (Stine) et « ingénierie chimique opérationnelle » (L.O. Bryan ; cf. Figs. III.1, 2 et 3). James Booge, directeur de la division *General chemical* et titulaire d'un doctorat en physico-chimie de l'université de Columbia, estime qu'« il est difficile, et probablement aussi non souhaitable, de trouver des chimistes bien formés qui soient également des ingénieurs de conception »¹³.

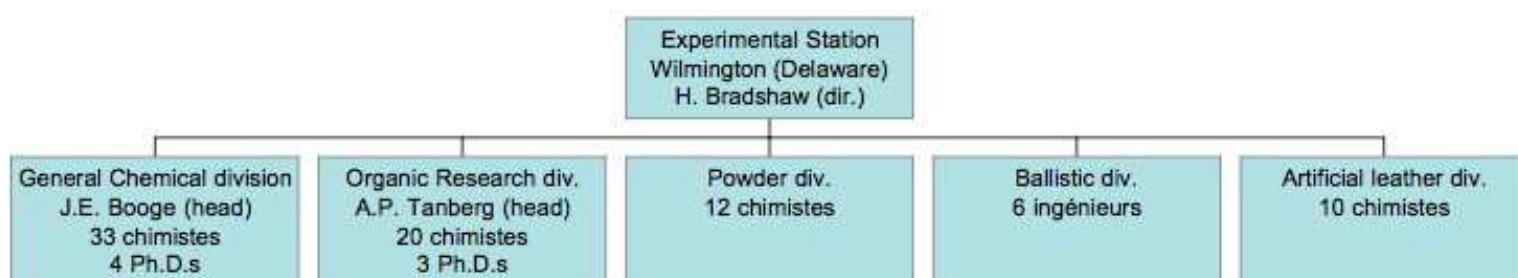


Figure 3.1 — Organisation de l'Experimental Station en 1919, le principal laboratoire du département de Chimie
Source : adapté du document original¹⁴, qui contient l'ensemble du personnel du laboratoire. Les titulaires d'un doctorat ont été retrouvés par le biais de l'*American Men of Science* (Jacques CATTELL (ed.), The Science Press, 8^{ème} édition (1948), 6^{ème} édition (1936), 4^{ème} édition (1927), cf. ci-dessous)

¹¹ Mémoire général de Stine au département de Chimie, 10 octobre 1919, HML, Acc. 0500, II, 2, Box 291

¹² « Names and addresses of Experimental Station employees », 1^{er} mai 1919 et 1^{er} avril 1918, CRD 20/Experimental Station 1907-1919

¹³ Memorandum, J.E. Booge à H. Bradshaw, « service of chemical department to manufacturing operations in chemical engineering lines », 5 mai 1920, CRD 18/ Chemical department 1917-1926

¹⁴ « Experimental Station organizational chart », 1^{er} octobre 1919, CRD 19/Experimental Station history 1904-1929

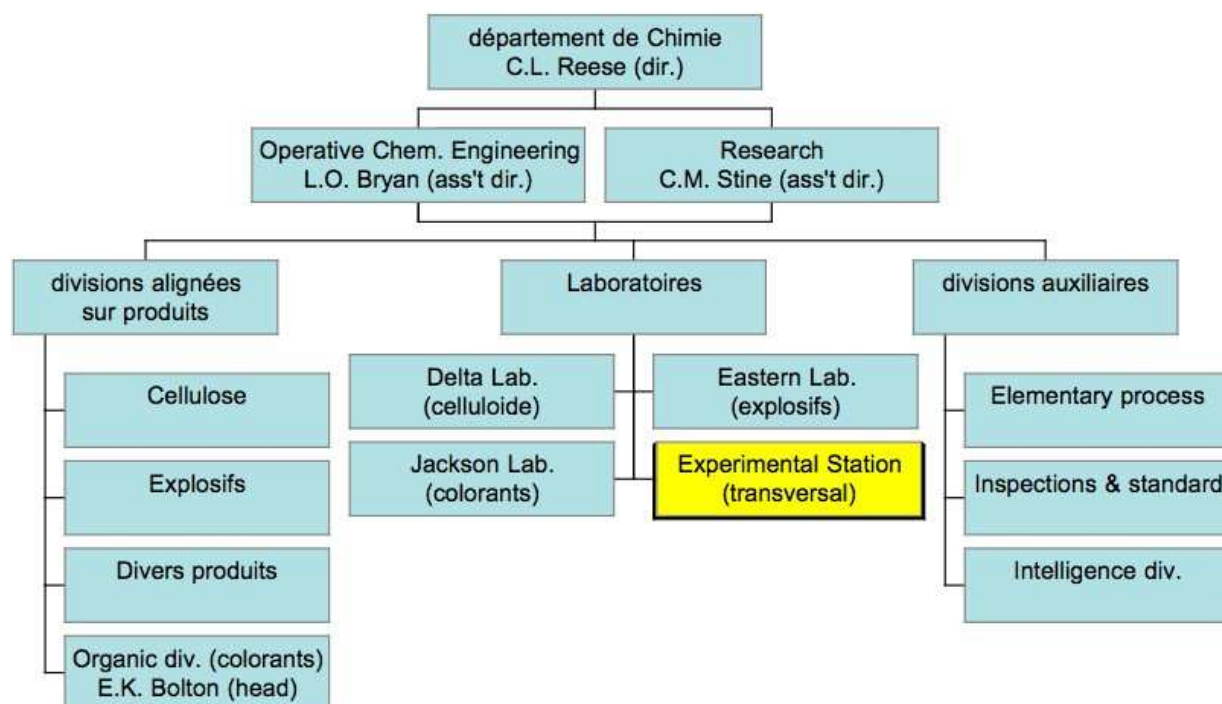


Figure 3.2 — Diagramme organisationnel du département de Chimie en 1919
 Source : adapté de H&S, p. 103



Figure 3.3 — Vue aérienne de la Station en 1925
 Avec l'aimable autorisation du Hagley Museum and Library

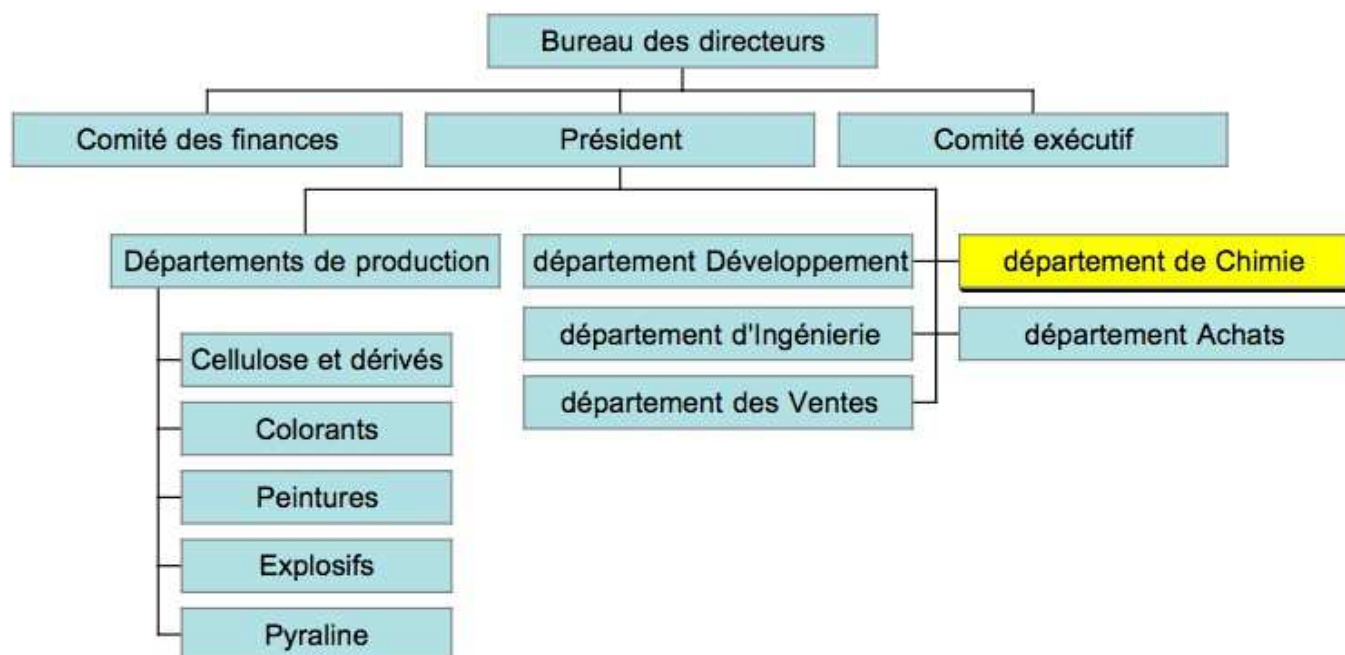


Figure 3.4 — Diagramme organisationnel de Du Pont en février 1921, avant que la compagnie n'adopte une structure décentralisée

Source : CRD 19/Experimental Station history 1904-1929

Selon Ndiaye la « culture technique » des chimistes organiciens – qui prédomine alors au département de Chimie - a dans un premier temps entretenu une hiérarchie, une relation de subordination avec les ingénieurs chimistes et les chimistes des usines¹⁵. Cette hiérarchie du chimiste sur l'ingénieur ne serait en tous cas pas propre à Du Pont, mais pourrait résulter de l'importation aux Etats-Unis de la hiérarchie entre chimistes et ingénieurs qui existe dans les environnements industriels européens, et particulièrement en Allemagne¹⁶. A partir du milieu des années 1920 cependant, la professionnalisation et spécialisation croissante du génie chimique va modifier cette hiérarchie. L'ingénieur chimiste devient plus qu'un ingénieur doté de quelques connaissances en chimie et en mécanique : il est formé directement aux procédés industriels courants dans l'industrie chimique. Cette spécialisation du génie chimique dispense aux ingénieurs dans l'industrie chimique un statut et un pouvoir qu'ils ne connaissaient pas une décennie auparavant. Cette réforme du génie chimique est initiée par le MIT, avec lequel Du Pont entretient des liens étroits depuis le début du siècle¹⁷. Significativement, Crawford Greenewalt (1903-1993), qui devient président de Du Pont en 1948, est formé au génie chimique au MIT en 1922.

¹⁵ NDIAYE, *Du nylon et des bombes*, op. cit., pp. 67-70

¹⁶ Ulrike FELL, *Chimie et industrie en Europe: l'apport des sociétés savantes industrielles du XIX^e siècle à nos jours*, Paris, Archives contemporaines, 2001, pp. 85-90

¹⁷ John SERVOS, « The Industrial Relations of Science : Chemical Engineering at MIT 1900-1939 », *Isis*, vol. 71, (1980), pp. 531-549

C'est dans ce contexte de tension – conflits entre les départements dans la responsabilité des activités de « recherches et autres sujets techniques » et différenciation/hiéarchie des rôles au sein de ces activités – que l'élite « recherche » du département de Chimie commence à qualifier certaines de leurs activités comme « recherche fondamentale ». « Il devrait y avoir une division [au sein du département de Chimie] entre les hommes engagés dans les divers travaux d'un intérêt immédiat pour les départements industriels et les hommes engagés dans la recherche fondamentale »¹⁸. « Fondamental », semble ici conforter la représentation que cette élite se fait d'elle-même davantage comme *chercheur* industriel plutôt que comme chimiste industriel en prise avec « les intérêts immédiats » de la production, une hypothèse qui sera confirmée avec les utilisations de cet adjectif par la suite.

En 1920, face notamment aux fortes pertes sur les colorants organiques et les peintures, les dirigeants de la compagnie envisagent de réorganiser radicalement sa structure managériale globale. La compagnie adopte alors une structure décentralisée, chaque département industriel étant responsable de l'ensemble de ses activités et autonome financièrement. Sous la pression des managers des départements industriels, le département de Chimie est « démantelé » et la plupart des activités expérimentales revient sous la responsabilité des départements industriels, qui instituent des divisions « chimie » au sein de leur département, peuplées en grande partie par le transfert de chimistes du département de Chimie vers les départements industriels. À l'exception de la Station, la gestion des autres laboratoires est transférée aux départements industriels. Les responsables des départements industriels ont demandé le démantèlement du département de Chimie tout en reconnaissant qu'un tel département permettait d'entretenir « une équipe d'experts dans certaines branches spéciales des sciences, comme la physico-chimie, la bactériologie et la chimie colloïdale »¹⁹. Effectivement depuis 1917 quelques docteurs en physico-chimie viennent s'ajouter aux docteurs en chimie organique comme Stine. Ces spécialistes de cette « branche spéciale » sont embauchés par la division « *General chemical* » de la Station et travaillent sur les peintures et la production d'acide nitrique²⁰.

¹⁸ Mémoire, E. Bengel à W.M. Whitten, 5 mai 1920, « Efficiency of the Chemical department », , CRD 18/ Chemical department 1917-1926

¹⁹ H&S pp. 98-110, citation p. 108

²⁰ Mémoire, H. Bradshaw à W.M. Whitten, « Organization of Experimental Station » 14 mars 1919, CRD 20/ Experimental Station 1907-1919

| | Année d'obtention du doctorat et université | Carrière chez Du Pont |
|--------------------|--|---|
| Charles L. Reese | 1886, Heidelberg (Allemagne) | 1902-1906: directeur, Eastern Laboratory; 1906-1911; directeur, High Explosives Operating Department; 1911-1924: directeur, Chemical Department |
| Arthur M. Comey | 1885, Heidelberg (Allemagne) | 1906-1919: directeur, Eastern Laboratory; 1919-1921: special assistant, Chemical Department |
| Hamilton Bradshaw | 1905, Johns Hopkins (Baltimore, MD) | 1905-1917: Eastern Laboratory; 1917-1921: directeur, Experimental Station; 1921-1924, assistant directeur (recherche), Chemical Department; 1921-?: assistant directeur, Chemical Department |
| J.W. Lowrie | 1906, Chicago (Ill) | 1919-?: assistant head, Organic Research Division, Experimental Station |
| Charles M.A. Stine | 1907, Johns Hopkins (Baltimore, MD) | 1907-1916: research supervisor, Eastern Laboratory; 1916-1919: head, Organic Chemicals Division, Chemical Department; 1919-1921, assistant directeur (recherche), Chemical Department; 1921-1924: head, Dyestuff division, Chemical Department; 1924-1930: directeur, Chemical Department; 1930-1945: Executive Committee |
| A. E. Houlehan | 1912, Cornell (Ithaca, NY) | 1915-1917, head, organic section, Experimental Station; 1917-?: associate directeur, Jackson Laboratory, Dyestuffs Department |
| Elmer K. Bolton | 1913, Harvard (Boston, MA) | 1915-1919: organic section, Experimental Station; 1919-1922 : research supervisor, Jackson Laboratory, Dyestuffs Department; 1922- 1929: research directeur, Dyestuffs Department; 1929-1930: assistant directeur, Chemical Department; 1930-1951; directeur, Chemical Department |
| Arthur P. Tanberg | 1915, Columbia (New-York, NY) | 1915-1917: organic section Experimental Station; 1917-1921: head, Organic Research Division, Experimental Station; 1921- ~1950: directeur, Experimental Station |

Table 3.1 — Parcours des docteurs en chimie organique embauchés par Du Pont avant 1919 (liste non-exhaustive). Source : informations tirées de H&S et du dictionnaire biographique *American Men of Science, op. cit.*

| | Année d'obtention du doctorat et université | Carrière chez Du Pont |
|-------------------|---|---|
| Guy B. Taylor | 1913, Princeton (NJ) | 1904-1911: nitric acid operations, Experimental Station; 1911-1918: quitte Du Pont; 1918- 1927: General Chemical Division, Experimental Station; 1927-?: head, fundamental research, physical chemistry |
| H. Essex | 1914, Göttingen (Allemagne) | 1918-1920: Organic Research Division, Experimental Station |
| James E. Booge | 1916, Columbia (New York, NY) | 1917-1928: head, General Chemical Division, Experimental Station; 1928-1931: lithopone research director, Grasselli Co. (Du Pont); 1931-1935: technical director, Krebs Pigment & Color Co. (Du Pont) |
| H. E. Eastlack | 1916, Columbia (New York, NY) | 1918-?: head, pigment section, General Chemical Division, Experimental Station (pigments) |
| Ernest B. Bengner | 1917, Wisconsin (Madison, WI) | 1917-1924: research manager, synthetic leather & photography, Experimental Station & Redpath Laboratory; 1924-1928: chemical director, Rayon Department; 1928-1939: assistant director (fibers), Chemical Department; 1939-?: technical director, Textile Fibers Department |
| T.H. Rogers | 1917, Johns Hopkins (Baltimore, MD) | 1919-1922: chemist, General Chemical Division, Experimental Station |
| Arthur W. Kenney | 1918, M.I.T. (Boston, MA) | 1919-1921: General Chemical Division (pigments), Experimental Station; 1921-1927, head, Intelligence Division, Chemical Department; 1928-1932: x-ray lab, Experimental Station; 1932-1942: optics & general physics lab, Experimental Station; 1942-1945: détaché au MIT pour la guerre; 1945-1956: research physicist, Chemical Department |

Table 3.2 — Parcours des docteurs en physico-chimie ou chimie inorganique embauchés par Du Pont avant 1919 (liste non-exhaustive). Source : *Ibid.*

C'est probablement à travers cette division « *General chemical* » que Du Pont s'ouvre initialement à la chimie colloïdale. En l'état des sources en effet, ce thème des colloïdes pénètre les laboratoires de Du Pont au cours de l'année 1919 ou 1920, par le biais du « moulin colloïdal » (*colloid mill*), un instrument permettant d'étudier et d'obtenir des émulsions par centrifugation. En 1919, le *Chemical department* (nommé par la suite département de Chimie) a engagé des tractations afin de conduire des recherches pour General Motors, la plus grande compagnie américaine d'automobiles, dont Du Pont détient une bonne part du capital. General Motors est alors en quête de carburants plus efficaces pour ses moteurs, et demande à Du Pont de développer des additifs pour réduire l'effet de cliquetis lorsque le carburant traverse les cylindres du moteur (*anti-knock fuel*)²¹. Le moulin colloïdal est une des solutions envisagées pour synthétiser des carburants qui réduisent ces nuisances. Arthur W. Kenney,

²¹ H&S, pp. 126-132

alors qu'il vient d'obtenir son doctorat en physico-chimie au *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), est engagé au département de Chimie en 1919 au sein de la division « *General chemical* » du département. (cf. Figs. III.1, 2 et 3). Kenney est chargé de réaliser la revue de littérature sur la chimie des hydrocarbures et en particulier sur les causes du phénomène de cliquetis de certains carburants lorsqu'ils circulent dans les moteurs. Ses recherches le mènent vers les « solutions colloïdales de gazoline » préparées par centrifugation²². Kenney traduit en anglais plusieurs articles de chimistes allemands sur les colloïdes et sur le moulin colloïdal en particulier. Hermann Plauson, l'inventeur du moulin colloïdal, a récemment publié dans la revue allemande *Zeitschrift für Angewandte Chemie*, il est traduit et diffusé par Kenney au sein du département de Chimie²³. Cet article présente la théorie colloïdale dans la ligne de celle défendue par Wolfgang Ostwald, qui est aussi considéré aux États-Unis comme l'autorité allemande sur les colloïdes.

Le moulin colloïdal permet de réaliser des émulsions ou solutions stables, « colloïdales », en dispersant finement des particules solides ou des phases gazeuses ou liquides par le biais de forces centrifuges intenses. L'article de Plauson décrit son fonctionnement et son utilité pour la pétrochimie et les carburants. Plauson vante également les mérites du moulin colloïdal pour d'autres produits de l'industrie chimique : « A travers l'application du moulin colloïdal, une méthode entièrement nouvelle de production de viscosité a été découverte [...] Le moulin colloïdal permet dans l'industrie d'autres applications encore comme la production des résines [...] et des pigments »²⁴. Cette large palette d'applications supposées du moulin colloïdal n'a pas manqué d'attirer l'attention des chimistes de Du Pont, puisque la compagnie est lancée depuis quelques années dans une vaste campagne de diversification de ses activités industrielles. On retrouve ainsi une traduction d'un autre article général sur les colloïdes, écrit par une sommité Russe (Peter P. von Weimarn), dans les papiers d'un autre chimiste arrivé chez Du Pont en 1923 ; l'article est probablement traduit par Kenney dès 1920²⁵. La division « *General chemical* » du département de Chimie, pour laquelle la revue de littérature sur le moulin colloïdal a été effectuée, plaide pour la construction d'un moulin dans ses locaux. Selon son responsable Roger Williams cet instrument sera « d'une assistance considérable » pour cette division²⁶.

Le moulin colloïdal, cependant, ne semble pas avoir fait beaucoup progresser la recherche sur les carburants anti-cliquetis, et n'a pas tenu ses promesses sur la réalisation des émulsions colloïdales qui permettraient de réduire ces cliquetis²⁷. En revanche il se dissémine

²² Lettre, Kenney à Charles Kettering (directeur de la recherche à General Motors), 22 août 1923, PP 16/Chemical department 1921-1923 ; A.W. Kenney, « High speed agitation devices – Centrifugal Stirrer », 11 octobre 1921, Experimental Station B-report B-194-2, CRD 10/ High speed agitating devices

²³ Kenney, « The colloid mill and its possible applications », 17 octobre 1921, Experimental Station B-report B-194-3, CRD 10/ High speed agitating devices

²⁴ *Ibid.*

²⁵ « von Weimarn theory of the colloidal state », article traduit en anglais depuis la revue « Recueil des travaux chimiques des Pays-Bas », vol. 24 (1920), GDP 10/Research subject file – articles and reprints

²⁶ Lettre, Roger Williams à Hamilton Bradshaw, 28 octobre 1921, CRD 10/High speed agitating devices

²⁷ Reese, 1923 Chemical department report to the Executive Committee, 10 mars 1924, CRD 16/Annual reports 1922-1929

rapidement auprès des chimistes qui travaillent sur les filières industrielles de Du Pont issues de sa diversification : selon Stine, le moulin colloïdal produit des résultats « tangibles et efficaces » pour les colorants et les peintures²⁸. Son appropriation par les chimistes qui travaillent sur des produits différents est un argument pour défendre l'utilité de recherches qui ne soient pas alignées sur les lignes de produit existantes ou sur un département particulier ; et donc, l'intérêt de conserver un département de Chimie indépendant des départements industriels. Ainsi, selon le directeur de la Station Hamilton Bradshaw, le moulin colloïdal « est un exemple [...] de recherche fondamentale d'un intérêt pour l'ensemble de la compagnie, plus efficace avec le présent système unifié [du département de Chimie] »²⁹.

On aurait tort d'interpréter l'apparition de l'expression « recherche fondamentale » au sein de Du Pont au début des années 1920 uniquement comme une « scientification » ou une « théorisation » d'une fraction des recherches qui y sont menées, comme une évolution endogène au groupe des chimistes les plus diplômés. Même si assez rapidement « recherche fondamentale » va emprunter cette pente – sous l'action de Stine – initialement la dissémination de cette expression traduit d'autres préoccupations. Reese, directeur du département de Chimie et engagé dans la lourde tâche de réorganiser le département après la décentralisation de la compagnie, a une conception plus pragmatique que Stine de la recherche industrielle. En 1922 il met en place conjointement avec le département des peintures un programme d'amélioration d'un pigment majeur commercialisé par Du Pont. L'approche pour améliorer le pigment, comme on le verra aux chapitres 6 et 7, reste largement empirique, même si, selon Reese, il s'agit « de développer des informations *fondamentales* à la Station »³⁰. Ce que « fondamental » semble traduire ici est l'autonomie du chimiste-chercheur de la Station vis-à-vis du département des peintures pour améliorer le pigment. L'adjectif sert également à différencier les recherches qui sont menées par les départements industriels de celles qui sont menées par le département de Chimie, lorsqu'elles concernent le même produit. Par exemple pour les vernis, selon Reese le département des Peintures (qui s'occupe aussi des vernis) « a demandé fin 1922 [au département de Chimie] d'entreprendre des études fondamentales sur les vernis »³¹. En l'occurrence il s'agit de trouver un additif pour accélérer la maturation des vernis³². Ici encore le chimiste dédié à cette tâche est autonome dans sa recherche ; les interactions avec le département des peintures sont minimales au moins dans un premier temps, car il s'agit d'une innovation assez radicale. « Recherche fondamentale » cristallise donc différentes conceptions et organisations de la

²⁸ Stine, 1924 Chemical department report to the Executive Committee, 12 février 1925, CRD 16/Annual reports 1922-1929

²⁹ Mémoire, H. Bradshaw à Reese, non-daté, probablement octobre 1921, CRD 18/ Chemical department 1917-1926 ; les rapports de département de Chimie avant 1920 ne semblent pas comporter cette expression « recherche fondamentale » ou « fondamental » tout court, comme le suggèrent les rapports qui ont été conservés

³⁰ Reese, 1923 Chemical department report to the Executive Committee, 10 mars 1924, *op. cit.*, emphase ajoutée

³¹ *Ibid.*

³² Un phénomène appelé « *aging* » : les vernis, une fois synthétisés, doivent être entreposés pendant des mois pour améliorer leur tenue et leur durabilité, ce qui, évidemment, est problématique lorsque la production est importante ; D.V. Gregory, « Aging of varnish », Monthly progress report, 16 janvier 1922, CRD 20/Combined progress report for December 1922

recherche au sein de Du Pont : l'expression permet de marquer la responsabilité du département de Chimie sur les projets qu'on lui soumet ou qu'il engage de lui-même.

Comme pour le moulin colloïdal, l'expression marque les recherches qui peuvent être « d'un intérêt pour l'ensemble de la compagnie », le développement de connaissances ou d'instruments transversaux à l'ensemble des activités industrielles de Du Pont. Également elle reflète la volonté de « théoriser » les pratiques au sein du département, de « s'assurer que les facteurs fondamentaux physiques et chimiques impliqués dans un procédé soient compris en profondeur avant que le procédé dépasse la phase de recherche »³³. Dans tous les cas l'expression reflète la pertinence d'un département indépendant des départements industriels et dont la vocation principale est expérimentale. Elle manifeste la solidification du chimiste *chercheur*, différencié du chimiste d'usine et du chimiste de contrôle.

Il n'est donc pas surprenant que la théorie colloïdale et les instruments associés³⁴ pénètrent les laboratoires de Du Pont au moment où la compagnie consolide fermement sa stratégie de diversification, et où son département de recherche central revoit ses compétences et sa vocation comme un département de service pour l'ensemble des départements industriels. L'apport de la chimie organique, qui est l'ancrage disciplinaire de la première génération de chimistes hautement qualifiés embauchée par Du Pont, est limité pour les produits vers lesquels Du Pont vient de se diversifier. Un des problèmes qui se posent sur les vernis, en effet, est la tendance des pigments dont ils sont composés à flocculer et sédimenter, ce qui altère les propriétés du vernis. La chimie organique est insuffisante à la compréhension de ce phénomène ; en revanche la chimie colloïdale, qui traite de la dispersion des pigments et qui étudie les conditions de floculation, est beaucoup plus indiquée. Aussi le chimiste dégagé pour l'étude « fondamentale » des vernis en 1922 envisage une approche « physico-chimique et colloïdale » du problème.

Au début ce sont les premiers physico-chimistes de la compagnie comme Kenney qui introduisent ce thème des colloïdes au sein des laboratoires de Du Pont en traduisant des articles par exemple, ce qui n'a rien de surprenant puisque l'étude des colloïdes s'est institutionnellement rapprochée de la physico-chimie pour prendre son essor universitaire. Puis un spécialiste des colloïdes, formé au doctorat à l'université de Wisconsin, est embauché en 1923³⁵. Début 1926 il se tourne entièrement vers l'étude colloïdale de la nitrocellulose, « fondamentale », afin d'« accumuler des données qui puissent être appliquées à la solution des problèmes dans le domaine de la nitrocellulose ». La nitrocellulose est un composé que l'on retrouve dans les vernis, certaines peintures et colorants organiques ; pour les fibres textiles la cellulose est également un composé essentiel. Stine lorsqu'il engage cette recherche colloïdale sur la nitrocellulose espère que les résultats pourront être « appliqués » à l'ensemble de ces produits. Le domaine des colloïdes répond à ce besoin de « transversalité »

³³ mémorandum, E.C. Lathrop (division inspection et standard) à l'ensemble du département, « Chemical department staff meeting », 14 août 1924, CRD 18/Chemical department 1917-1926

³⁴ L'ultramicroscope est envisagé dès 1922 par Gregory pour son étude sur les vernis, « Aging of varnish », *op. cit.*

³⁵ Robert V. Williamson, doctorat à l'université de Wisconsin en 1923, source : *American Men of Science*, *op. cit.*, 9^e édition

qui caractérise une des vocations du département de Chimie : engager des recherches qui puissent être utiles à l'ensemble des activités industrielles de la compagnie. Alors que quelques années plus tôt l'étude de la cellulose relevait aux yeux des leaders de Du Pont de la chimie organique³⁶, au cours des années 1920 ceux-ci considèrent progressivement que son étude relève de la chimie colloïdale.

Du Pont ici suit son temps scientifique. La Première Guerre mondiale a accéléré le processus de recrutement de chimistes hautement diplômés. En 1914, l'industrie allemande domine au niveau international la production et la commercialisation des colorants synthétiques. L'arrêt des exportations allemandes vers les Etats-Unis y déclenche une pénurie de colorants, l'industrie américaine étant en état de dépendance technique et commerciale vis-à-vis de ces colorants. Au cours de la guerre Du Pont décide de se lancer dans la production des colorants, une décision prise « pas simplement par considération stratégique, mais parce qu'elle était politiquement nécessaire »³⁷. À partir de 1916 la compagnie embauche des spécialistes de chimie organique, y compris des titulaires d'un doctorat, pour acquérir la maîtrise scientifique et technique des colorants organiques. Ces embauches ont contribué à implanter aux positions clés du département de Chimie des chimistes organiciens. Progressivement cependant, des spécialistes de la physico-chimie sont à leur tour embauchés dans l'après-guerre. La discipline physico-chimie est alors effectivement pensée comme plus pertinente pour les procédés les plus récents de l'industrie chimique comme la fixation de l'azote à haute pression et la production électrolytique du chlore et de la soude³⁸. La Première Guerre mondiale a également accompagné une évolution des relations entre la discipline physico-chimie et l'industrie. Tandis qu'avant-guerre l'influence est indirecte, c'est-à-dire que les docteurs en physico-chimie forment les chimistes et ingénieurs, qui se destinent à l'industrie, aux rudiments de la physico-chimie, mais ne sont pas eux-mêmes embauchés, dans l'après-guerre ces docteurs commencent à être embauchés sur une base permanente³⁹. Pour Du Pont cette vaste stratégie de diversification semble responsable de cette ouverture vers la physico-chimie : les docteurs de cette discipline sont en effet affectés aux secteurs vers lesquels Du Pont se diversifie : les peintures et la production d'acide nitrique (la chimie « lourde ») (cf. tables 3.1 & 2). Significativement alors que les premiers directeurs du département de Chimie sont des chimistes organiciens, dans l'après-Seconde Guerre des physico-chimistes seront directeurs du département.

La Première Guerre mondiale a également contribué à implanter la chimie des colloïdes. Le succès des chimistes des colloïdes lors de la mobilisation pour l'effort de guerre a attiré l'attention sur ce domaine, et a enclin à considérer en particulier sa pertinence pour

³⁶ « Nous avons parlé [avec les responsables de la division recherche en chimie organique] d'un sujet fondamental en chimie organique comme les dérivés de la cellulose », memorandum, Tanberg à Stine, « 1922 prospects under plan III », 29 novembre 1921, CRD 19/Experimental Station History 1904-1929

³⁷ H&S p. 77

³⁸ L.F. HABER, *The Chemical Industry 1900-1930*, Oxford, Clarendon Press, 1971

³⁹ John SERVOS, *Physical Chemistry from Ostwald to Pauling. The Making of a Science in America*, Princeton (NJ), Princeton University Press, 1990, pp. 214-218

l'industrie⁴⁰. L'effort de guerre et le contexte de rivalité nationale qui le précède et le suit a accru la demande sur les caoutchoucs et les fibres textiles, ce qui accroît en retour la mobilisation scientifique sur ces matériaux. La chimie colloïdale vante ses mérites pour l'étude de ces matériaux stratégiques, et connaît un certain engouement dans l'entre-deux guerres. En hébergeant des chimistes des colloïdes au cours des années 1920, Du Pont s'adapte à son contexte scientifique.

Colloïdes, catalyse et polymérisation – la mise en place du programme « fondamental » de Stine

Science pure et recherche fondamentale

Les responsables des politiques scientifiques et techniques considèrent souvent que le « modèle linéaire » de l'innovation – la science « pure » est la source du progrès technique et industriel – prend ses racines dans l'immédiat après-Seconde Guerre et en particulier dans le rapport *Science the Endless Frontier* de Vannevar Bush. Ce rapport est considéré comme incarnant un consensus liant la tradition libérale américaine à l'interventionnisme fédéral visant à financer massivement la recherche universitaire dans l'après-guerre. L'analyse de la politique scientifique américaine dans l'entre-deux guerres de David Hart montre ici deux choses (au moins). Ce modèle linéaire est déjà fermement implanté dès les années 1920 dans les esprits et défendu parmi certaines élites industrielles et universitaires, et également dans une moindre mesure parmi les élites politiques. D'autre part les options et orientations de la politique scientifique et technique sont très sensibles aux orientations politiques et idéologiques plus globales ; différentes perceptions de l'état libéral détermineront la structure du système d'innovation en cours, et en particulier le mode de financement de la science « pure »⁴¹. Quand Herbert Hoover (1874-1954), alors ministre du Commerce, défend en 1925 le « besoin vital pour un financement plus important de la science pure », cette position s'inscrit dans une vision interventionniste de l'état fédéral, la version « associationniste » de l'état libéral selon Hart⁴². L'essor de la recherche industrielle est très marqué au cours des années 1920, la croissance du nombre de laboratoires industriels étant la plus forte entre 1925 et 1930⁴³. Laisée à elle-même, cette croissance ne serait pas efficace à long terme selon Hoover car l'industrie et les institutions privées où sont générés les savoirs – comme la Rockefeller Foundation – négligeraient d'entretenir les savoirs « purs » ou « fondamentaux », « source de la science appliquée » : « la croissance soudaine des laboratoires industriels

⁴⁰ Andrew EDE, *The Rise and Decline of Colloid Science in America 1900-1935. The Neglected Dimension*, Burlington (VT), Ashgate, 2007, p. 58

⁴¹ David M. HART, *Forged Consensus. Science, Technology and Economic Policy in the U.S. 1921-1953*, Princeton (NJ), Princeton University Press, 1998

⁴² Herbert HOOVER, « The Vital Need for Greater Financial Support to Pure-Science Research », *Mechanical Engineering*, vol. 48, janvier 1926, pp. 6-7. Discours donné par Hoover lors du congrès de 1925 de la Société Américaine d'Ingénierie Mécanique, à New-York.

⁴³ Arnold THACKRAY *et al.* (eds.), *Chemistry in America, 1876-1976*, Dordrecht, Reidel, 1985, p. 112

menace la recherche en science pure [...] en provoquant la déplétion du personnel en recherche fondamentale [vers les rangs de la recherche industrielle] »⁴⁴.

Lorsque Stine élabore son programme de recherche « fondamentale » en 1926, il partage les craintes de Hoover et a sans doute eu connaissance de son discours prononcé devant l'*American Society of Mechanical Engineers* à New York en décembre 1925. Cette « déplétion du personnel fondamental » est pour Stine plus qu'une métaphore : c'est une réalité qu'il a pu constater au sein du département de Chimie dont il est directeur depuis 1924. En 1924 par exemple, sur les 38 employés « technique » du département de Chimie au début de l'année, 14 ont été transférés aux départements industriels de manière permanente, ce qui diminue fortement les capacités de recherche du département⁴⁵. Ces transferts sont une constante de l'histoire du département de Chimie et révèlent l'impossibilité la plupart du temps pour ses chimistes d'abandonner les projets sur lesquels ils ont été impliqués alors qu'ils deviennent prometteurs pour les départements industriels. Notamment pour pallier à ces transferts qui minent la continuité de son département, Stine propose fin 1926 au comité exécutif de dégager des fonds pour poursuivre des travaux de « science pure ou de recherche fondamentale » ; les chercheurs embauchés pour ce programme seraient dotés d'une grande autonomie dans leur projet de recherche, ce qui limiterait le risque de leur transfert vers d'autres départements⁴⁶. Ce programme est accepté par le comité exécutif avec quelques modifications de forme, en particulier la préférence de « recherche fondamentale » à « science pure ». « Recherche fondamentale » atteint alors les plus hautes strates de la compagnie et est approprié irréversiblement par l'ensemble des responsables de la recherche et une fraction des chercheurs. Très vite, l'expression va cristalliser différentes conceptions de la recherche industrielle et de la vocation du département de Chimie au sein de la compagnie, conceptions qui divergent souvent de celles de Stine. Tanberg, le directeur de la Station, distingue à peu près au même moment la « recherche technologique » de la « recherche en science pure », et affirme que cette dernière n'a rien à faire dans les laboratoires industriels⁴⁷.

Pour Hoover la recherche scientifique est une activité trop importante, pour la prospérité économique et sociale à long terme, pour être laissée aux seuls jeux des acteurs privés et des marchés. Il perçoit l'essor dramatique des laboratoires industriels et de leur penchant « appliqué » comme une menace pour « la science pure », que l'état fédéral doit réguler. Il s'oppose en cela à différentes branches du libéralisme, en compétition au sein des institutions fédérales, des laboratoires industriels et universitaires, et des fondations privées qui financent et hébergent également la recherche comme la Carnegie Institution⁴⁸. Cette compétition est un miroir grossissant de la compétition qui se déroule chez Du Pont au cours des années 1920 et

⁴⁴ HOOVER, *The vital need*, op. cit., p. 6

⁴⁵ Bolton, « Development of the Chemical Department », 1940, CRD 18/Budget appropriation :expenditures 1907-1944

⁴⁶ Stine au comité exécutif, « Pure science work », 18 décembre 1926, CRD 21/History Fundamental Research 1926-1939

⁴⁷ Tanberg, « Methods used in technological research. A brief discussion from the point of view of the Central Chemical department », 28 octobre 1925, CRD 19/Experimental Station History 1904-1929

⁴⁸ HART, *Forged Consensus*, op. cit., chap. 2

1930. Du Pont apparaît comme un état dans l'état, et Stine lutte pour que les recherches menées au sein de son département, dont une certaine partie génère des connaissances, ne soient pas dictées par les impératifs immédiats des activités industrielles de la compagnie. Même si son programme connaît des infléchissements conséquents par la suite – issus en grande partie de la Grande Dépression – à long terme il se révèle être un succès et la vision de Stine de la recherche industrielle devient dans l'après-Seconde Guerre mondiale celle de la compagnie.

Au milieu des années 1920 cependant, l'idée que les laboratoires industriels doivent héberger des recherches se calquant sur « la science pure » est loin d'être acquise. Stine néanmoins dispose alors d'un allié de poids : la *General Electric* (GE), qui est elle-même également divisée sur l'opportunité d'héberger la « science pure », mais qui affiche au cours des années 1920 une adhésion sans faille au modèle linéaire. Irving Langmuir, le célèbre physico-chimiste des laboratoires de GE, est déjà un héros parmi l'ensemble de la communauté scientifique américaine. Tout en construisant avec le chimiste Gilbert N. Lewis du Caltech une nouvelle théorie des molécules, il améliore radicalement la qualité des ampoules électriques vendues par GE. Il est l'archétype du mariage heureux « science pure »-industrie. Lorsque Stine contacte des chimistes académiques réputés pour leur proposer de quitter l'université et de venir chez Du Pont pour démarrer son programme, l'un d'entre eux suppose que Stine « parie que les hommes sélectionnés pour ce travail seront les prochains Langmuir ou Coolidge [un autre chercheur phare de GE] »⁴⁹. Car Langmuir, au cours des nombreux discours qu'il donne avant et après la remise de son prix Nobel de chimie en 1932, diffuse deux affirmations fortes : d'une part que ses succès sur les ampoules découlent directement de son travail théorique sur les atomes et molécules, d'autre part il ré-écrit l'histoire des laboratoires de GE et affirment que ceux-ci ont été créés pour et ont toujours favorisé la « science pure ou recherche fondamentale »⁵⁰. Cette dernière affirmation est largement invalidée par les travaux des historiens, même avec la conception la plus ouverte de « recherche fondamentale »⁵¹. Comme Tanberg, Langmuir affirme la séparation entre recherche technologique (qu'il appelle « recherche en ingénierie ») et « science pure », mais contrairement à celui-ci il affirme que la science pure se justifie dans les laboratoires industriels.

GE, ainsi que les Bell labs de AT&T, sont un modèle pour Stine, et celui-ci s'appuie sur leurs directeurs au moment de lancer son programme⁵². Peu après il demande à ce que le responsable du groupe des colloïdes du programme fondamental, Elmer Kraemer, puisse visiter les Bell labs afin de s'en inspirer ; effectivement Kraemer s'y rendra à l'automne

⁴⁹ Cité dans H&S p. 228

⁵⁰ Irving LANGMUIR, « Atomic Hydrogen as an aid to industrial research », *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 20 (janvier 1928), p. 332 ; –, « Fundamental industrial research », *GE Review*, juillet 1935, p. 324

⁵¹ Leonard S. REICH, *The making of American industrial research. Science and business at GE and Bell, 1876-1926*, Cambridge (MA), Cambridge University Press, 1985 ; George WISE, *Willis R. Whitney, General Electric, and the Origins of US Industrial Research*, New York (NY), Columbia University Press, 1985

⁵² Lettre, Stine à Willis R. Whitney, 24 mars 1927, CRD 21/Fundamental Research 1926-1931

1927⁵³. Les hommes et les idées circulent d'ailleurs intensément depuis le début des années 1920 entre ces grands laboratoires industriels ; sous l'impulsion de Reese les réunions informelles de ces directeurs de recherche ont laissé place à une organisation plus formelle en 1923, le *Directors of Industrial Research* (DIR)⁵⁴. La « recherche industrielle » est essentialisée au cours de cette période, et transcende les secteurs industriels.

Si la consolidation de la rhétorique de la science pure dans l'entre-deux guerres a été bien étudiée dans l'historiographie⁵⁵, les pratiques de recherche effectives et l'insertion à GE de la « recherche fondamentale » ainsi que sa légitimité aux yeux des managers de la compagnie l'ont moins été. Au moment même où Langmuir affiche dans ces discours la primauté de la science pure à GE, le directeur de ses laboratoires Willis Whitney affirme à Stine que « cette politique [promouvoir les « travaux d'une nature ultra-scientifique »] a été graduellement freinée par la direction récemment, la tendance actuellement étant de travailler sur des problèmes pouvant déboucher sur des applications pratiques »⁵⁶. Selon l'historien George Wise, l'intégration réalisée par Langmuir entre théorie physico-chimique et connaissance pratique – dont ce dernier fait une généralité des laboratoires industriels –, relève de l'exception dans les laboratoires. Comme pour Du Pont, les laboratoires de GE ont dû composer avec la pression permanente du retour sur investissement⁵⁷. Venant effectivement confirmer les aveux de Whitney à Stine sur le désengagement pour les travaux « ultra-scientifiques », certaines études sur l'interprétation des patrons de diffraction des rayons X par certains matériaux sont abandonnées à peu près au même moment⁵⁸. L'adhésion au modèle linéaire et la rhétorique de Langmuir en particulier, semble, au milieu des années 1920, n'être guère plus qu'une façade qui masque le pragmatisme des directeurs des laboratoires – ou des dirigeants de la compagnie auxquels ceux-ci doivent rendre des comptes. Ce qui a pu pousser Hoover à encourager les institutions de recherche à promouvoir la science « pure ». L'hypothèse est qu'au cours des deux décennies suivantes, cette façade est devenue authentique, les élites industrielles devenant progressivement persuadées qu'une recherche décorrelée des activités industrielles immédiates est la clé de la prospérité future de la compagnie.

Un programme endogène au département de Chimie ?

Ce pragmatisme vis-à-vis de la recherche au moment où Stine met en œuvre son programme, ce dernier en est bien conscient : « J'espère que vous êtes aussi convaincus que moi », écrit Stine à l'été 1927 aux responsables de la Station, « que le futur du département central de Chimie est entièrement lié à notre capacité à produire de nouveaux développements

⁵³ Lettre, Stine à E.P. Craft (directeur des Bell labs), 27 septembre 1927, et H.D. Arnold à Stine, 28 septembre 1927, CRD 21/Fundamental research 1926-1931

⁵⁴ H&S pp. 315-6

⁵⁵ Ronald KLINE, « Construing 'Technology' as 'Applied Science': Public Rhetoric of Scientists and Engineers in the United States, 1880-1945 », *Isis*, vol. 86, n° 2 (1995), pp. 194-221

⁵⁶ Lettre, Whitney à Stine, 28 mars 1927, CRD 21/Fundamental research 1926-1931

⁵⁷ WISE, *Willis R. Whitney*, *op. cit.*

⁵⁸ SERVOS, *Physical Chemistry*, *op. cit.* p. 272

profitables de temps en temps »⁵⁹. Effectivement quelques années plus tôt Stine avait averti le comité exécutif que beaucoup de dirigeants de la compagnie se font une vision déformée de la vocation du département de Chimie, en attendant principalement le « développement de choses radicalement nouvelles »⁶⁰. En 1933, le président de la compagnie Lammot du Pont estime, en échangeant avec Stine, que la recherche fondamentale « n'a pas encore produit de résultats concrets »⁶¹. Comme nous le verrons dans la partie 3 cependant, le groupe des colloïdes a déjà produit des résultats « concrets » sur les pigments, en particulier en ce qui concerne leur brevetage, même s'il ne s'agit pas d'une innovation radicale de produit. Cette perception du laboratoire central comme vecteur d'innovations radicales, « usine à inventions », est une image populaire ; la vocation des grands laboratoires industriels est avant tout d'améliorer les produits et procédés existants et la portée des brevets qui les protègent⁶². Stine d'ailleurs rappelle au comité exécutif que le succès du département de Chimie est tributaire de la bonne connaissance de l'ensemble des techniques mises en œuvre par les départements industriels. Pour produire du neuf, le département de Chimie doit être bien intégré aux activités industrielles de la compagnie, ce qui semble *a priori* paradoxal.

Il faut donc se demander ce que Stine, bien au fait de cette situation, entend par « science pure » et comment il envisage son intégration dans la compagnie. Les historiens David Hounshell et John Smith se sont focalisés sur Carothers et le groupe de chimie organique lorsqu'ils ont analysé le programme de Stine, réduisant ainsi la portée de son programme à l'invention du nylon : « La découverte du néoprène et du nylon a préservé au programme de recherche fondamentale de Du Pont une place dans l'histoire ; autrement cela aurait pu être une expérience en recherche industrielle ratée et oubliée. [...] Bien qu'une variété d'évènements internes et externes ait pesé sur son aboutissement, le facteur critique était que Stine mette en place un programme attractif pour Carothers, et qui l'encourage à travailler dans le domaine prometteur de la polymérisation »⁶³. En se focalisant sur Carothers et l'invention du nylon, ces auteurs font une lecture de l'émergence de ce programme comme un accomplissement endogène au département de Chimie, et à Stine en particulier. Il faut se demander quels facteurs exogènes ont pu assurer à Stine le succès de son programme.

Dans l'après-Première Guerre les universités américaines cimentent des relations avec les grandes compagnies industrielles plus étroites ; leur ambition de croissance les oblige à diversifier leurs sources de revenus et à solliciter plus largement les entreprises⁶⁴. La Première Guerre mondiale a en effet facilité « l'intégration de la science et de l'ordre industriel »⁶⁵. Dans ce contexte, Du Pont a noué en particulier des liens très étroits avec le MIT. La compagnie attend du MIT des jeunes chimistes et ingénieurs-chimistes hautement qualifiés et dont la formation répond à ses besoins, elle attend un service de consultants de la part de ses

⁵⁹ Mémorandum, Stine à Cole Coolidge et Tanberg, 29 juillet 1927, CRD 21/Fundamental research 1926-1931

⁶⁰ Stine, 1924 report to the Executive Committee, 12 février 1925, CRD 16/annual reports 1922-1929

⁶¹ Lettre, Lammot du Pont à Stine, 24 mars 1933, PP 18/Chemical department Fev. 32- Aug. 38

⁶² John K. SMITH, « The scientific tradition in American industrial research », *Technology and Culture*, vol. 31 (1990), pp. 121-131

⁶³ H&S p. 248

⁶⁴ HART, *Forged consensus*, op. cit. pp. 35-37

⁶⁵ SERVOS, *Physical-Chemistry*, op. cit., pp. 204-220

membres réputés ; elle finance des *fellowships* et propose aux laboratoires du MIT des sujets de recherche⁶⁶. Reese, lorsqu'il quitte le département de Chimie, devient le représentant de la recherche à l'extérieur de la compagnie⁶⁷, et connaît bien les chimistes influents du MIT, dont Warren K. Lewis qui y a élaboré la première filière moderne de génie chimique. En avril 1925, au cours d'une conversation entre ceux-ci, Lewis informe Reese que le MIT a entrepris « beaucoup de travaux sur l'application des rayons X aux problèmes industriels », et aussi que la firme New Jersey Zinc s'est récemment équipée d'un appareil à rayons X. New Jersey Zinc est un des principaux concurrents de Du Pont sur le marché du lithopone, un pigment minéral blanc. Reese écrit rapidement à Stine que l'équipement de New Jersey Zinc en rayons X est « préoccupante » (« *concern* »), car cette compagnie pourrait enrichir ses brevets sur les pigments à partir d'informations spécifiques à l'analyse par rayons X⁶⁸. Le MIT informe également Reese que les analyses par rayons X permettent de déterminer la taille des particules colloïdales, et que ces informations sont « très prometteuses, en particulier pour leurs applications pratiques sur les pigments »⁶⁹.

Aussi, quand Stine détaille son programme au comité exécutif, celui-ci est au courant que New Jersey Zinc dispose d'équipements pour analyser ses pigments aux rayons X, et en particulier pour déterminer la taille de ses pigments – qu'il l'ait appris peu avant par l'intermédiaire du MIT et de Reese, ou par d'autres canaux auparavant. Alors que Stine ne le mentionne pas dans son premier exposé au comité exécutif en décembre 1926, il en fait un argument pour vendre son programme lors de la deuxième tentative, en mars 1927, qui est alors accepté par le comité⁷⁰. Il faut noter ici que Stine assimile ces recherches de New Jersey Zinc sur l'application des rayons X et la détermination des tailles de particules à « recherche fondamentale »⁷¹. Cet argument a certainement dû peser dans la décision du comité exécutif d'avaliser le programme de Stine ; pour celui-ci en tous cas la « recherche fondamentale » est aussi un moyen de rester dans la compétition avec les autres firmes, et en particulier avec la compagnie New Jersey Zinc. Car ce programme permet également l'appropriation par Du Pont d'un autre instrument prometteur dans cette compétition, et en particulier dans la détermination de la taille des pigments : l'ultracentrifugeuse.

Alors que Bradshaw, l'adjoint de Stine, propose à Kraemer début 1927 de diriger le futur groupe des colloïdes du programme de recherche fondamentale, ce dernier axe son plan de recherches sur l'ultracentrifugeuse. Kraemer est alors professeur assistant à l'université de Wisconsin, et a participé au développement de l'ultracentrifugeuse avec Svedberg ; il recommande l'embauche de Nichols, qui est encore à Uppsala au sein du laboratoire de

⁶⁶ NDIAYE, *Du nylon et des bombes*, *op. cit.*, pp. 57-62 ; Servos « Industrial relations », *op. cit.*

⁶⁷ H&S p. 126

⁶⁸ Lettre, Reese à Stine, 29 avril 1925, PP 16/Chemical department 1924-1925

⁶⁹ Lettre, G.L. Clark à Reese, 23 avril 1925, PP 16/Chemical department 1924-1925

⁷⁰ Lettres, Stine au comité exécutif, « Pure science work », 18 décembre 1926, *op. cit.* ; – « Fundamental research by the Du Pont company », 31 mars 1927, CRD 21/Stine memos 1926-1931

⁷¹ *Ibid.*, Stine, *Fundamental research*, *op. cit.* : « aucun de nos compétiteurs dans ce pays [...] ne sont engagés dans la recherche fondamentale, à l'exception de quelques exemples isolés, comme l'étude que la compagnie New Jersey Zinc a entreprise sur la relation entre taille de particule et pouvoir couvrant des pigments pour l'oxyde de zinc. Cela devrait nous assurer de la sagesse de notre plan à entreprendre un travail de cette nature ».

Svedberg à travailler sur l'ultracentrifugeuse : « L'institution ou organisation qui mettra la main [*capturing*] sur Mr. Nichols à son retour d'Europe, sera grandement avantagée dans l'étude de la cellulose dans une perspective fondamentale. Est-il nécessaire de préciser que cet instrument [l'ultracentrifugeuse] est d'une grande importance pour d'autres genres de systèmes dispersés, le caoutchouc, les pigments etc. »⁷². L'ultracentrifugeuse jouera effectivement un rôle important pour le développement des pigments au sein de Du Pont, en particulier dans les brevets. Jusqu'au milieu des années 1930, Du Pont sera la seule institution aux Etats-Unis à disposer d'une ultracentrifugeuse de type Svedberg, et cet instrument va s'avérer capital dans la détermination précise de la taille des particules de pigment. Ce rôle et les connections de Stine aux départements industriels par le biais de la « recherche fondamentale » seront détaillés au chapitre 7.

Des facteurs internes à Du Pont mais exogènes au département de Chimie ont également contribué à assurer l'intégration du programme de recherche fondamental. Selon Stine le responsable production du département industriel des colorants est « anxieux d'entendre ce que le département central de Chimie est en train d'entreprendre dans cette ligne [recherche fondamentale] ». Ce dernier, rassuré par le contenu que Stine envisage pour son programme, est « entièrement favorable aux deux types de travaux fondamentaux, la chimie colloïdale et la catalyse »⁷³. Le département des colorants organiques est ainsi favorable à un programme sur les colloïdes, sans doute en reconnaissance de l'importance que le moulin colloïdal a revêtu dans l'étude des colorants au sein de Du Pont depuis plusieurs années, comme indiqué ci-dessus. La catalyse est également un axe du programme de Stine (cf. figure ci-dessous). En 1921 ce thème scientifique et technique est déjà perçu par les responsables du département de Chimie comme transversale à l'ensemble des lignes industrielles de la compagnie, et donc, comme les colloïdes, devant faire l'objet d'un traitement spécifique et autonome par les chimistes du département⁷⁴.

La théorie colloïdale propose une représentation des matériaux qui fournit un trait commun aux lignes de produits *a priori* disparates que Du Pont commercialise. La cellulose et ses dérivés comme la cellophane, la rayonne et la pyraline, les colorants et les peintures minérales... sont appréhendés comme des dispersions de molécules ou de particules plus ou moins grossières. Avec la pénétration des théories colloïdales au début des années 1920, Stine a absorbé la vision colloïdale des matériaux et en a fait un argument pour défendre son programme axé non pas sur des lignes de produit mais sur des branches de la chimie académique⁷⁵. Stine a ainsi contacté un des plus prestigieux chimistes des colloïdes aux Etats-Unis, Wilder D. Bancroft de l'université de Cornell, afin qu'il commente son programme sur

⁷² Lettre, Kraemer à Bradshaw, 9 mars 1927, CRD 21/Fundamental Research 1926-1931

⁷³ Lettre, Stine à Tanberg, CRD 21/Fundamental Research 1926-1931

⁷⁴ Mémoire, H. Bradshaw à Reese, non-daté (probablement octobre 1921), *op. cit.*

⁷⁵ Stine au comité exécutif (1927), *op. cit.* : « [la chimie colloïdale] est un des domaines pour lesquels des informations fondamentales manquent cruciallement. [...] Quand on sait que le domaine des organosols [les dispersions dans les solvants organiques] couvre les produits comme les peintures, les vernis, les laques, la pyraline, les films photographiques, la fabricoïde, le caoutchouc, la dynamite et bien d'autres, son importance pour notre Compagnie peut être facilement appréciée ».

les colloïdes. Bancroft conseille à Stine de séparer son programme en théorie générale de la rayonne, théorie du lithopone, et chimie colloïdale de la cellulose⁷⁶. La nitrocellulose est un composé commun à ces produits, mais Bancroft suggère qu'une étude colloïdale de la cellulose devrait être distinguée d'une étude du lithopone et de la rayonne. Ce qui est une autre manière d'affirmer la distinction entre la chimie colloïdale « pure » et « appliquée » qu'il diffuse par ailleurs⁷⁷. Stine reconnaît cette distinction⁷⁸, ce qui lui permet d'isoler Kraemer à la Station et de lui fixer comme tâche (notamment) l'étude de la cellulose, persuadé que les connaissances générées sur la cellulose seront importantes par la suite pour la rayonne et les autres dérivés de la cellulose.

Cette même configuration est à l'œuvre dans le choix du programme du groupe de chimie organique. Alors que depuis le dernier tiers du XIX^e siècle la chimie organique industrielle s'est concentrée sur l'étude des colorants, Stine sélectionne pour son programme un domaine alors marginal au sein de la chimie organique académique : la polymérisation. Cet épisode du programme a déjà été étudié par Hounshell et Smith et également par Furukawa ; il n'est pas nécessaire d'y revenir ici en détail. Notons simplement que le département industriel des colorants a engagé au milieu des années 1920 des programmes importants sur le caoutchouc artificiel, et que la polymérisation du butadiène est une des principales routes envisagées. Les fibres textiles artificielles et les caoutchoucs artificiels sont des matériaux éminemment stratégiques pour l'industrie dans l'entre-deux guerres ; Du Pont espère réussir là où même les géants industriels allemands ont échoué⁷⁹. Lorsque Stine et Bradshaw proposent au chimiste organicien de Harvard Wallace Carothers – consacré plus tard comme l'inventeur du nylon – de structurer son programme de chimie organique autour de la polymérisation, ces derniers sont bien conscients que celle-ci constitue un « verrou technologique » dans la maîtrise des fibres textiles et des caoutchoucs.

Le vaste programme de recherche fondamentale de Stine s'inscrit dans la tension inéluctable à tout département centralisé qui se conçoit comme un service de recherche au sein d'une organisation industrielle : tension entre autonomie et utilité, c'est-à-dire utilité visible et immédiate pour les activités de production. Ce programme de « science pure », qui a rapidement été re-labélisé « recherche fondamentale », n'est pas la duplication des thèmes et modes de recherche qui ont cours dans l'univers académique. Le choix des axes effectués par Stine et les autres dirigeants du département répondent bien évidemment à des critères autres que scientifiques. Les thèmes de la polymérisation, de la catalyse et des colloïdes ont alors déjà largement pénétré les laboratoires de Du Pont, y compris et surtout hors du département de Chimie. Par exemple au sein du département industriel de la Rayonne, la théorie colloïdale est appréhendée par ses chimistes pour avancer sur ses propres programmes de recherche et

⁷⁶ Lettre manuscrite, Bancroft à Stine, 17 avril 1927, CRD 21/Fundamental Research 1926-1931

⁷⁷ SERVOS, *Physical chemistry*, *op. cit.* p. 311

⁷⁸ Lettre, Stine à Bancroft, 21 avril 1927, CRD 21/Fundamental Research 1926-1931

⁷⁹ Elmer Bolton, « Du Pont research » : an address delivered on the occasion of the presentation to Dr. Bolton of the Perkin Medal of the American Section of the Society of Chemical Industry, New York City, January 5, 1945

problèmes techniques rencontrés dans les fibres textiles artificielles⁸⁰. Des docteurs formés à la physico-chimie et aux colloïdes sont embauchés également par le Jackson Laboratory, le principal laboratoire de ce département ; ces chimistes se rendent au symposium national sur les colloïdes en 1928, et échangent avec les spécialistes universitaires des colloïdes, comme par exemple avec Eli Burton à Toronto⁸¹. Le choix de ces axes et leur légitimité dans la compagnie sont assurés parce qu'ils sont au préalable déjà largement présents dans l'ensemble des laboratoires de Du Pont.

Qu'elle qu'ait été la vision ou l'ambition de Stine à l'égard de son programme, celui-ci ne se calque pas sur la recherche académique, sur la science « pure ». Tous les sujets ne se valent pas et tous les résultats scientifiques du programme ne se valent pas non plus. Le cas exposé ci-dessus de l'importance de la recherche fondamentale pour la compétition dans les brevets sur les pigments reflète une stratégie plus vaste de renforcer la portée des brevets. Le directeur assistant de la Station préconise début 1927 de mettre en valeur l'apport potentiel sur les brevets, afin de mieux défendre le programme de Stine lorsqu'il sera présenté au comité exécutif. Selon ce dernier en effet, la recherche fondamentale permettra à Du Pont « d'être dans une position beaucoup plus favorable en protégeant ses industries par des brevets larges et valides »⁸². Même si l'adhésion au modèle linéaire – au moins dans les discours – et le prestige de la science « pure » permet à Stine de faire accepter son programme par les dirigeants de la compagnie, la « recherche fondamentale » diverge rapidement dans l'entre-deux guerres de la « science pure », et permet dans les faits d'approprier de nouveaux moyens pour perpétuer les finalités établies du laboratoire industriel : les brevets et l'amélioration des procédés et produits.

Il ne faut toutefois pas sous-estimer ce que ce programme comporte comme nouveauté pour la recherche industrielle. Des universitaires déjà en poste sont recrutés comme Kraemer et Carothers, ayant donc déjà développé leurs propres thématiques de recherche ; cette pratique de recrutement contraste avec les habitudes antérieures de recruter des docteurs fraîchement diplômés. Cependant cette pratique sera abandonnée au cours de la décennie 1930, à travers la réorganisation de la recherche fondamentale vers une plus grande pertinence pour les départements industriels. Malgré les politiques de recherche au sein de Du Pont plus conservatrices lors de la Grande Dépression, ce programme rapproche davantage encore Du Pont de l'univers académique. Par exemple les interactions sont permanentes entre le groupe des colloïdes, Svedberg à Uppsala et l'environnement de recherche académique sur les colloïdes de Wilmington et de Philadelphie, comme cela sera abordé au chapitre 5. Ce programme a ainsi largement contribué à ancrer l'autonomie du département de Chimie au sein de Du Pont. Au sortir de la guerre, le directeur du département de Chimie Elmer K. Bolton, pourtant largement à l'origine des politiques plus conservatrices lors de la Grande Dépression, pourra affirmer que « la préoccupation première du département de Chimie est le

⁸⁰ Ferdinand SCHULZE, *The Technical Division of the Rayon Department 1920-1951*, Wilmington (DE), E.I. du Pont de Nemours & Co., 1952

⁸¹ Lettre, A.S. Hunter à E.F. Burton, 27 juin 1928, DPF 2/Rayon 1927-1928

⁸² Lettre, Cole Coolidge à A.P. Tanberg, 9 mars 1927, CRD 21/Fundamental research 1926-1931

futur »⁸³. Ceci contraste avec les perceptions antérieures du département comme un département de service. Dans l'immédiat ce programme s'accompagne d'une réforme de la qualification formelle des activités du département : une dichotomie fondamental/appliqué est introduite, dichotomie dans laquelle les activités de recherche doivent se mouler (cf. figure III.5). Cette bi-catégorisation ancre formellement une séparation des activités qui existaient déjà dans les représentations des dirigeants du département de Chimie. Toutefois Bolton, devenu directeur du département, l'abandonnera quelques années plus tard, et la dichotomie fondamental/appliquée ne sera plus inscrite dans les diagrammes organisationnels du département de Chimie.

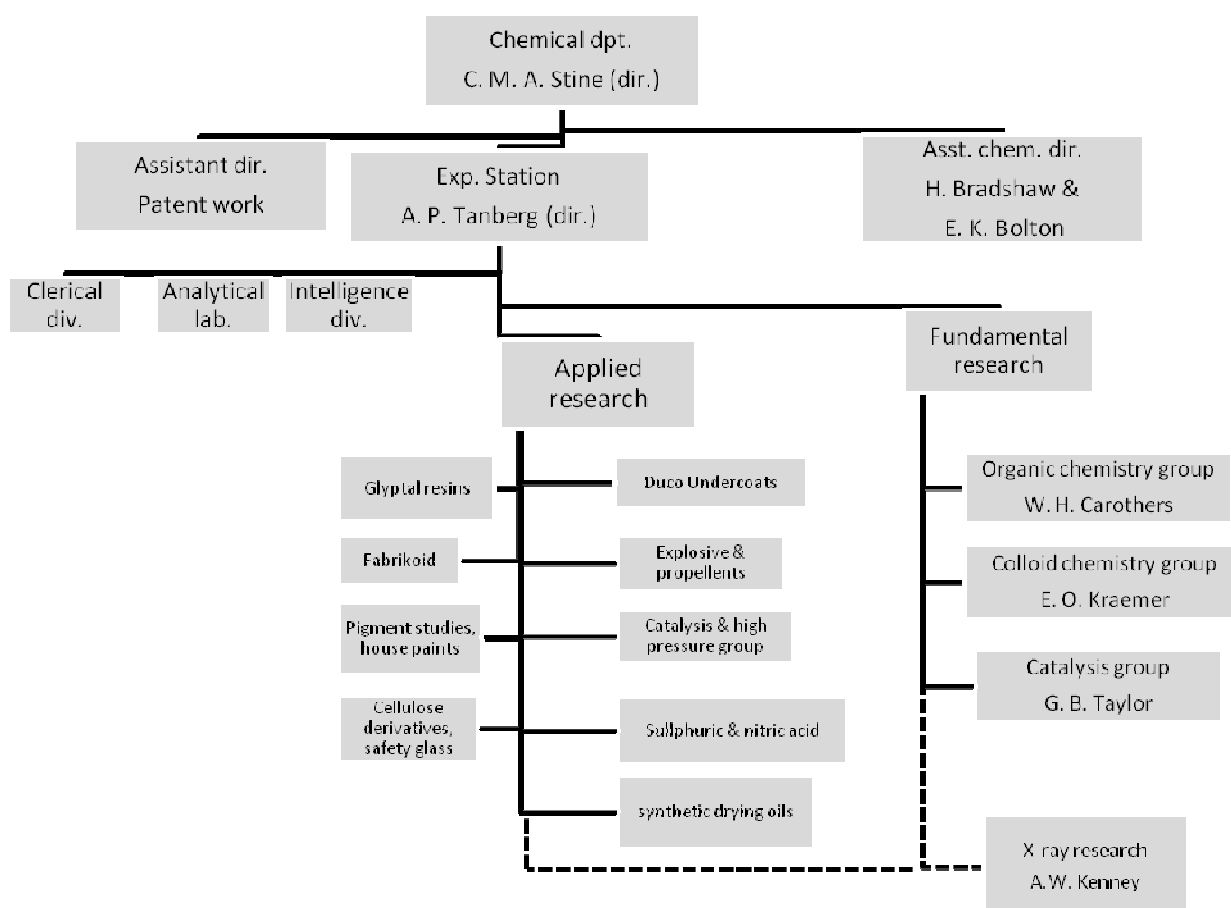


Figure 3.5 — Diagramme organisationnel du département de Chimie, 1929

Source : adapté de « organisational chart of the Chemical department », 23 mars 1929, SCS 3/CRD organisational charts

⁸³ Bolton, *Du Pont Research*, op. cit.

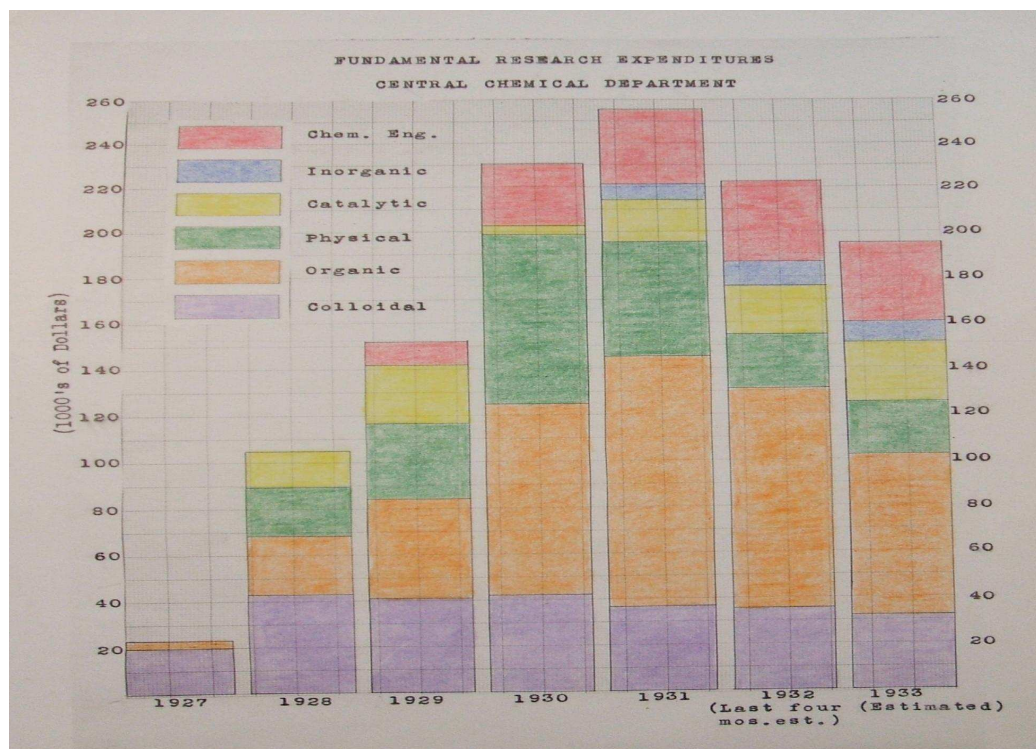


Figure 3.6 Dépenses du programme de recherche fondamentale par axe, 1927-1933
(Chem. Eng. : chemical engineering, génie chimique). Source : CRD 18/Budget appropriation 1907-1944

Chapitre 4. APPROPRIATION PAR L'INDUSTRIE (II) : IMMIXTION AVEC LA PHYSIQUE ET INSTRUMENTATION

O Worthy Doctor !

Prologue

*Then the officers of the children of
Israel came and cried unto Pharaoh, saying,
Wherefore dealest thou thus with thy servants ?
There is no straw given unto thy servants,
And they say to us, Make brick.*

Exodus V, 15-16

Manifesto

*Full many seasons have come and gone, that we have
Boaten despairingly at thy door.
And we have cried, Give us X-ray data, wherefore
You have turned us aside with soft words, having not the
wherewithal to grant that which we asked.
And we have striven mightily. In the sweat of our brows have
we wrought small miracles, making thy ancient X-ray machine
labor even unto the going down of the sun to bring forth a
single morsel of knowledge.
Our hands are grown calloused, and our hearts are bitter. We
cry out beneath our heavy load, and in our midst there arise
blasphemers, saying, *''#(\$'%&_
We beseech thee, O Doctor. Intercede with the Mighty Ones,
that they may grant us the wherewithal to perform our daily
tasks, and that thou mayest continue to sit upon the fundament
which thy steatopygous job hath given thee.*

Epilogue

*The Bird of Time's already on the wing—
The Sands of Life are dropping one by one*

We beg to remain, O Master, your humble supplicants,

C.W.J. Wende, A.A. Johnson, J.B. Nichols¹

¹ « An open letter to Doctor Arthur Webster Kenney, being a recital of grievances and a prayer for succor », non-datée, Pictorial collections, Gordon D. Patterson collection, HML

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, la « recherche fondamentale » ancre l'autonomie du département de Chimie, et contribue à séparer discursivement et organisationnellement les activités de recherche des activités de contrôle et d'analyse des laboratoires de Du Pont. Dans un premier temps l'expression permet d'affirmer une distinction – et une hiérarchie – entre les différents chimistes qui peuplent ces laboratoires ; elle accompagne la légitimation du chimiste *chercheur*, dont la vocation principale est la recherche plutôt que la gestion des activités routinières d'analyse et de production. Avec le programme de Stine toutefois, comme nous le verrons dans ce chapitre, l'expression emprunte rapidement la pente du « pourquoi » du comportement des substances, pente qui la mène vers sa signification contemporaine. Ce programme est en phase avec l'évolution plus large de l'ensemble des laboratoires de Du Pont, évolution qui accorde plus d'attention aux propriétés physiques des substances et à leur « structure ». Les ambitieux objectifs de maîtrise technique et industrielle des nombreux matériaux et produits que Du Pont manipule l'a font s'ouvrir à d'autres questions et méthodes que ce « chimie » recouvre traditionnellement jusqu'alors. Historiquement liée à la chimie en effet, la compagnie s'ouvre néanmoins à la physique pour améliorer ses performances industrielles à partir de l'entre-deux guerres, et ce faisant reste en phase ou anticipe les évolutions plus générales de la chimie universitaire comme de la chimie industrielle. La théorie colloïdale, qui accompagne scientifiquement et techniquement Du Pont pendant sa vaste entreprise de diversification, assure la transition vers cette nouvelle attention sur les aspects physiques des substances. Les acteurs des colloïdes de Du Pont, en particulier Kenney, sont les mêmes qui assurent l'ouverture du département de Chimie vers la physique discipline, et vers l'instrumentation sophistiquée associée.

Ainsi, dans l'exposition de son programme de recherche fondamental de mars 1927 au comité exécutif, Stine affirme qu' « une des portions les plus importantes et indispensables d'un programme de recherche fondamental est la physique. Du Pont a jusqu'à présent souvent négligé ce domaine mais ne peut plus continuer ainsi »². Le programme de Stine s'accompagne effectivement d'une ouverture délibérée à la physique-discipline. Quelques docteurs en physique sont embauchés, tandis que les physico-chimistes commencent à peupler davantage les laboratoires et à obtenir une légitimité et une visibilité accrues au sein de la compagnie. En 1930 un « comité en physique » est institué parmi les chercheurs de la Station, qui deviendra quelques années plus tard une « section de physique » au sein du département de Chimie, dont la vocation est de proposer et de mettre en œuvre des « recherches en physique générale ». Cette section est responsable de l'assimilation au sein de la compagnie des instruments et méthodes comme la diffraction des rayons X, la RMN, les méthodes spectroscopiques (ultraviolet, Raman, infrarouge...), la BET, la microscopie électronique, la diffraction électronique... – et parfois apporte des améliorations substantielles à ces instruments. L'importance de cette section ne cesse de croître tout au long des années 1930 et, avec la mobilisation de Du Pont pour l'effort de guerre scientifique et en particulier dans l'instrumentation physique de pointe, devient considérable entre 1941 et 1945. Ainsi, depuis la mise en place du programme de Stine, cette ouverture vers la physique se traduit souvent,

² Stine au comité exécutif, « Fundamental research bu the Du Pont company », 31 mars 1927, *op. cit.*

dans les faits, par une attention accrue portée aux instruments scientifiques et méthodes d'analyse des matériaux, à leur développement au sein de la compagnie et en-dehors, et à leur dissémination parmi les départements industriels. L'instrumentation est réifiée par les managers de la recherche de Du Pont au cours de cet épisode. Ce processus de réification à travers un rapprochement avec la physique-discipline constitue l'objet de ce chapitre.

En outre, cette immixtion avec la physique revendiquée au sein des laboratoires de Du Pont à partir de la fin des années 1920, contraste avec la mise en avant de la chimie pour (re)définir l'image de la compagnie à peu près au même moment. Au début des années 1930 en effet, Du Pont souffre d'une importante crise de son image, de pressions politiques et de la part des médias. Un refrain fortement péjoratif revient chaque fois que Du Pont est invoqué : « *Merchant of Death* »³, allusion aux profits records que la compagnie a dégagé lors de la Première Guerre mondiale et la production massive des explosifs à laquelle elle s'est prêtée. Du Pont, et en particulier son département marketing, s'est employé à remodeler son image auprès du grand public à travers de grandes campagnes publicitaires et radiophoniques vantant « les merveilles inventées par les chimistes de Du Pont ». Le slogan « *Better things for better living through chemistry* »⁴, qui accompagne officiellement Du Pont pour plusieurs décennies, est inventé en 1935⁵.

Insertion des rayons X chez Du Pont – de la métallurgie à la chimie

Les rayons X ouvrent, pour ainsi dire, le bal de l'instrumentation appropriée ou développée par la « recherche en physique générale » au sein de la Station. Découverts dans les dernières années du 19^e siècle, leur appropriation scientifique et industrielle connaît un essor après la Première Guerre mondiale. Au début des années 1920 aux Etats-Unis, quelques laboratoires académiques comme le MIT et une poignée de firmes industrielles essayent de tirer parti de ces rayons X pour étudier et améliorer certains matériaux de l'industrie, en particulier l'acier et les alliages. La firme *General Electric* (GE) domine alors, ainsi que tout au long de l'entre-deux guerres, la production et l'innovation dans les tubes à rayons X. En 1923, alors qu'il est encore directeur du département de Chimie, Charles Reese est introduit à l'utilisation industrielle des rayons X par l'intermédiaire d'un gradé de l'armée américaine du *Watertown Arsenal*, un site militaire de production de canons et de blindés situé dans le Massachussetts. Le général du *Watertown Arsenal* montre à Reese les possibilités de détection des défauts dans les aciers qu'offre l'utilisation des rayons X. Le domaine scientifique et industriel de la métallurgie est effectivement pionnier dans l'application des rayons X, ce secteur ayant depuis la fin du siècle précédent introduit l'étude des microstructures comme questionnement de recherche et stratégie générale d'amélioration des alliages (cf. chapitre 1). Suite à cette

³ « Marchant de mort »

⁴ « De meilleurs objets pour mieux vivre grâce à la chimie »

⁵ Pap NDIAYE, *Du nylon et des bombes. Du Pont de Nemours, le marché et l'état américain 1900-1970*, Paris, Belin, 2001, pp. 188-190 ; Susannah HANDLEY, *Nylon : the story of a fashion revolution*, Baltimore (MD), Johns Hopkins University Press, 1999, chap. 2 ; Jeffrey MEIKLE, *American Plastic : a cultural history*, New Brunswick (NJ), Rutgers University Press, 1995, p. 133

démonstration, Reese devient plus attentif à cette récente méthode de caractérisation des matériaux, sans toutefois essayer de l'implanter immédiatement à la Station⁶. Début 1925, il rencontre un chercheur industriel de la firme *Union Carbide & Carbon*, qui vient de distinguer plusieurs formes cristallines du graphite grâce à leur caractérisation par rayons X. Cette distinction des formes de graphite a permis à Union Carbide de mettre au point des thermocouples (des capteurs de température) plus perfectionnés. Impressionné par la portée de cet exemple de succès technique et industriel des rayons X, Reese envisage sérieusement leur utilisation par les laboratoires de Du Pont, et contacte le chimiste Warren Lewis du MIT dans ce sens (cf. chapitre 3). Cependant Iréné du Pont, alors président de Du Pont, et qui a suivi les échanges entre Reese, Stine et Lewis sur l'opportunité des rayons X, s'oppose – affirmant que les retours sur investissement sont incertains – à ce que Du Pont s'investisse dans cette méthode⁷.

Deux ans plus tard, l'aval du comité exécutif au programme « fondamental » de Stine permet néanmoins à ce que les rayons X s'implantent dans les laboratoires de Du Pont. L'assimilation et le développement de cette méthode, ainsi que ses applications industrielles pour la compagnie constituent dans un premier temps le cœur du volet « physique » du programme fondamental de Stine. Un nouveau bâtiment au sein de la Station est construit pour héberger ce programme, et une salle de ce bâtiment accueille les tubes à rayons X fournis par GE, devenant de ce fait le « laboratoire des rayons X »⁸. Stine indique que le personnel du laboratoire est constitué « d'un physico-chimiste, d'un physicien et d'un jeune chimiste pour les assister généralement ». Le physico-chimiste n'est autre qu'Arthur Kenney, qui a largement contribué quelques années auparavant à introduire le thème des colloïdes au sein de Du Pont, et dont la vocation se déplace ainsi vers l'application des rayons X. Le physicien dont parle Stine est G. Harvey Cameron, qui a travaillé avec le grand physicien Robert A. Millikan (1868-1953, prix Nobel 1923) au début des années 1920 au Caltech sur les rayons cosmiques. Les dépenses de ce laboratoire sont en 1928 d'environ 10 000\$ (soit environ 10% des dépenses totales du programme fondamental), et en 1930 d'environ 15 000\$ (~6.5%)⁹.

Prenant l'exemple des autres firmes industrielles mobilisant cette méthode des rayons X pour performer sur des problèmes techniques et industriels préexistants, ce laboratoire se pense dans un premier temps comme relevant de la « recherche appliquée ». En effet, le laboratoire des rayons X trouve initialement sa justification en interagissant avec *Du Pont Rayon Co.* (qui fabrique la fibre textile dite « rayonne », et deviendra en 1936 le département de la Rayonne), le département des produits cellulosiques, et avec les équipes « appliqué » du département de Chimie responsables des pigments et de la chimie des hautes pressions.

⁶ Reese fait le récit à Stine de son intérêt vers les rayons X : Reese à Stine, 29 avril 1925, PP 16/Chemical department 1924-25

⁷ Lettre, Iréné du Pont à Stine, 1^{er} mai 1925, PP 16/Chemical department 1924-1925

⁸ Stine, rapport annuel de 1928 du département de Chimie au comité exécutif, 18 janvier 1929, CRD 16/Chemical department annual reports

⁹ « Fundamental Research expenditures, 1927-1944 », CRD 21/History fundamental research 1926-1939 ; montants donnés en dollars courants

L'ensemble des communautés scientifiques et industrielles travaillant sur les matériaux organiques comme la cellulose et les fibres textiles a pris conscience du potentiel des rayons X pour ces matériaux à partir du début des années 1920. Dans le cas de Du Pont, le laboratoire des rayons X cherche à établir la structure cristalline microscopique de la cellophane (un dérivé cellulosique servant principalement de film alimentaire transparent et étanche) et de la rayonne, une fibre textile artificielle dont Du Pont a acheté les droits d'exploitation à la compagnie française qui a développé cette fibre au cours des années 1910. Le département de la Rayonne commercialise cette fibre depuis 1920, et commercialise également la cellophane à partir de 1924. Le laboratoire de ce département industriel, situé à Buffalo dans l'état de New York, interagit avec le laboratoire des rayons X pour tenter de corrélérer l'orientation des cristaux dans ces produits avec les propriétés mécaniques d'élongation, de résistance ... de la cellophane et de la rayonne et leur apparence (le « lustre » des fibres textiles)¹⁰. En ce qui concerne la chimie des hautes pressions, le laboratoire des rayons X est mobilisé pour caractériser les catalyseurs impliqués dans les procédés à haute pression de synthèse de l'acide sulfurique. Dans la même veine méthodologique que Paul Emmett au *Fixed Nitrogen Laboratory*, les rayons X sont mobilisés pour expliquer l'action de promotion des impuretés de sulfate de fer dans les catalyseurs de platine en termes de variation de taille des cristaux de platine¹¹. Les relations entre taille de particule de platine, pattern de diffraction des catalyseurs, et activité catalytique sont systématiquement établies. Ces recherches donnent lieu à une publication de l'équipe appliquée, dans laquelle les membres du laboratoire des rayons X n'apparaissent pas en tant qu'auteurs mais sont mentionnés dans la publication¹². Le cas de l'interaction entre le laboratoire des rayons X et le département des Pigments sera détaillé au chapitre 7.

A l'été 1929 cependant, Cameron met en place un programme de recherche « fondamental » en physique, fondé sur les rayons X mais dont les orientations sont décidées conjointement avec le groupe fondamental des colloïdes. Il s'agit de calibrer la méthode de détermination de taille des particules par rayons X, en comparant les résultats obtenus sur des échantillons identiques entre cette méthode et par ultracentrifugation. Le pattern de diffraction d'une substance finement divisée consiste en un système de lignes, et l'espacement entre les lignes dépend de la structure cristalline de la substance, qui peut être reliée sous certaines conditions avec la taille des particules qui la compose. Comme Zsigmondy et Svedberg avant lui, Cameron utilise la chimie colloïdale de l'or pour préparer des échantillons de particules colloïdales d'or, assez stables pour être manipulées par rayons x et par ultracentrifugeuse¹³. De moyen pour performer sur l'amélioration des procédés et matériaux, la technique de diffraction des rayons X devient dans ce cas un objet d'étude en soi. Ce renversement entre la fin et les moyens s'accompagne du changement de statut de l'équipe du laboratoire des rayons

¹⁰ Stine, rapport annuel de 1929, 15 janvier 1930, CRD 16/Chemical department annual reports

¹¹ Stine, rapport annuel de 1928, 18 janvier 1929, *op. cit.*

¹² Guy B. TAYLOR, Georges H. KISTIAKOWSKY et John H. PERRY, « Platinum black catalysts. I: physical properties and catalytic activity », *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 34 (1930), pp. 748-752

¹³ Cameron, « Fundamental research in physics », 4 octobre 1929, CRD 21/quarterly reports on fundamental research

X, qui peut alors prétendre à être une équipe « fondamentale ». De plus, cet exemple révèle la proximité scientifique et instrumentale entre le groupe des colloïdes et le groupe de physique, une proximité qui résulte d'une même focalisation sur la taille des particules et qui rapproche les deux groupes dans bien d'autres projets de recherche. Il n'est donc pas surprenant que les thèmes de recherche du groupe des colloïdes et ses membres restants soient transférés à la section « physique » lorsque ce groupe est démembré quelques années plus tard (cf. chapitre suivant).

Les pratiques de ce « *X-ray lab* » ont dû se mouler dans les nouvelles catégories qui structurent le programme de Stine et reconfigurent la topologie de la recherche chez Du Pont. La dichotomie recherche fondamentale/recherche appliquée performe sur cette topologie et contraint les équipes à choisir leur camp. Le critère essentiel pour prétendre appartenir au « fondamental » est l'autonomie, autonomie du programme de recherche vis-à-vis des départements industriels ou des équipes « appliquées » du département de Chimie. L'initiative du sujet de recherche, ses grandes orientations et ses objectifs doivent émerger et rester du ressort de l'équipe « fondamentale ». Autonomie ne veut pas dire indépendance, et l'équipe « fondamentale » doit également pouvoir à tout moment justifier son apport aux autres équipes ou aux départements industriels, au moins dans la période de l'entre-deux guerres et en particulier pendant les pires années de la Grande Dépression, entre 1930 et 1933. La recherche fondamentale, au fond, est bâtie sur une tension permanente et sans-cesse renégociée entre utilité et autonomie. Or, en considérant les différentes phases d'assimilation et de développement des rayons X chez Du Pont, l'autonomie de l'équipe qui constitue le laboratoire associé est postérieure à son utilité à la compagnie. Dans un premier temps le laboratoire est un outil au service des départements industriels ou des autres équipes du département de Chimie. Ce n'est qu'à l'été 1929 que ses membres mettent en place un programme de recherche sur les rayons X dont ils sont les seuls – en conjonction avec d'autres équipes « fondamentales » – à décider les tenants et les aboutissants. Ce positionnement du laboratoire des rayons X sur le spectre fondamental-appliqué se reflète sur l'organigramme du département de Chimie établi par Stine en mars 1929 (cf. figure III.4).

Réification de l'instrumentation – Mise en place d'un « comité en physique »

Les succès techniques des rayons X appliqués à la cellophane, aux pigments et à la rayonne ont vraisemblablement impressionné, en plus de Reese et Stine, le directeur du laboratoire de Buffalo, Ernest B. Benger. Titulaire d'un doctorat en physico-chimie de l'université de Wisconsin, il rejoint le département de Chimie de Du Pont en 1917, puis est transféré en 1924 au département industriel de la Rayonne, dont il devient le responsable scientifique et directeur de son laboratoire nouvellement institué à Buffalo. Il revient au département de Chimie en 1928, et devient en 1930 l'assistant de Bolton, ce dernier venant de succéder à

Stine à la tête de ce département¹⁴. Les rayons X sont alors unanimement perçus par les chimistes comme un instrument ou une méthode de physiciens. Capitalisant sur son expérience positive de l'utilisation des rayons X sur la rayonne et la cellophane, Bengier cherche à généraliser cet apport de la physique à la chimie industrielle. Le poste de directeur assistant du département de Chimie qu'il occupe lui permet d'imposer ses initiatives, aussi Bengier demande fin 1930 à Cameron d'instituer un « comité en physique » au sein de son département, dont la vocation serait « de promouvoir le travail fondamental en physique et d'appliquer les appareils et connaissances physiques disponibles de manière plus performante aux problèmes de la compagnie »¹⁵. Bengier perçoit ce comité comme une interface de communication et de rencontre entre l'ensemble des équipes du département mais également parmi les équipes des laboratoires des départements industriels, lorsque ces équipes sont confrontées à un problème « de nature physique ». Ce comité est chargé de compiler les compétences spéciales de l'ensemble du personnel de la Station en physique, physico-chimie et instrumentation associée, et de diffuser la liste de ces compétences à l'ensemble des laboratoires de la compagnie, de manière à accélérer l'usage de ces compétences par les départements industriels. Initialement dirigé par Cameron, il est constitué de quatre personnes en plus de ce dernier. Deux proviennent du groupe des colloïdes (Kraemer et J.B. Miles), les deux autres sont les responsables de la recherche sur la chimie des hautes pressions (T.H. Chilton), et sur les « dispersions » (pigments et vernis) : Gordon D. Patterson (1897-1982), dont la carrière au sein de Du Pont suivra le rythme de l'immixtion de la physique et de l'instrumentation au sein de la compagnie. Par chance, le travail de ce comité a été en partie conservé, il est ainsi possible de préciser ce que ces acteurs entendent alors par « instruments et connaissances physiques », et l'état de ces compétences vers 1931 (cf. annexe C).

Cette ouverture, portée par le programme de recherche fondamentale de Stine, vers la physique et vers les instruments qui ne sont pas traditionnellement associés à la chimie comme les rayons X et le microscope, précède en réalité la mise en place de l'ambitieux programme de Stine. Kenney reconnaît que la focalisation sur les techniques optiques au sein du comité en physique fait suite à la longue collaboration avec le physicien Hermann Pfund (1878-1949) de l'université Johns Hopkins¹⁶. Pfund est consultant pour Du Pont depuis 1921, il a travaillé en particulier dans les peintures et la colorimétrie. Il a développé des méthodes pour standardiser les couleurs des peintures, et a encouragé les chimistes de Du Pont à se servir du microscope optique (cf. chapitres 6&7). Aussi l'« aspect physique » des peintures et des substances en général est un axe qui pénètre les laboratoires de Du Pont bien avant que Stine n'en fasse une priorité de la « recherche fondamentale ». Le directeur scientifique du département des Pigments a cherché depuis 1925 à embaucher un ancien étudiant de Pfund, spécialiste de microscopie sur les pigments¹⁷. En 1922, Bradshaw affirmait au directeur du département des Produits cellulosiques que « l'aspect physique du travail est extrêmement

¹⁴ H&S, p. 165

¹⁵ Mémoire, comité en physique aux responsables des équipes de recherche du département de Chimie, 7 janvier 1931, GDP 11/Research subject file physics committee

¹⁶ Kenney, « rough draft », non-daté (~1931), GDP 11/Physics committee 1930-1932

¹⁷ H. Bradshaw à Booge, 21 juin 1927, CRD 19/correspondence Bradshaw, Stine, Reese

important », et recommandait d'embaucher un physicien au sein du laboratoire de ce département industriel¹⁸. Aussi, cette ouverture vers le « côté physique » des substances est déjà largement à l'œuvre au sein des départements industriels alors que l'action volontariste du département de Chimie tente, à partir de 1930, de la promouvoir et la généraliser.

La pénétration des théories colloïdales et des docteurs formés à la chimie colloïdale parmi les départements industriels à partir du milieu des années 1920 a également contribué à la prise de conscience de l'importance de considérer les substances sous l'angle physique. C'est le cas notamment pour le département de la Rayonne, qui rencontre d'énormes problèmes pour teindre les fibres textiles qu'il commercialise. Stuart Hunter, docteur en chimie colloïdale de l'université Johns Hopkins, est embauché par ce département de Du Pont en 1927 et se focalise sur l'interaction des colorants organiques avec les fibres cellulosiques qui composent la rayonne. L'angle d'attaque qu'il préconise pour améliorer la teinture des fibres, typique de la pensée colloïdale, est cependant véritablement original pour la chimie industrielle du début du siècle :

La rayonne absorbera directement les colorants d'autant plus facilement que sa surface sera dense et saturée de petites pores microscopiques. La raison pour laquelle nos matériaux [fibres] ne se teignent pas aussi complètement que la Viscose américaine et la Bemberg américaine [deux autres types de rayonne] est que leur surface est trop grossière ; les pores sont trop larges. Toute action qui tendra à rendre la surface des filaments de rayonne plus dense et épaisse permettra une teinture plus profonde et uniforme.¹⁹

Plus tard Stuart collaborera avec le chimiste universitaire de Toronto Eli Burton, pionnier dans le développement du microscope électronique, pour mettre au point des instruments et méthodes permettant de caractériser la surface des fibres de la rayonne²⁰. Cette ouverture vers d'autres questionnements et approches sur les substances, et d'autres instruments, agite l'ensemble de la compagnie à partir des années 1920, elle est en partie portée par la diffusion du mouvement des colloïdes en son sein. Ainsi la promotion délibérée des compétences et instruments physiques opérée par le département de Chimie à partir de 1930 ne constitue pas une rupture radicale des pratiques de laboratoire de la compagnie et n'est pas endogène à ce département ; reprenant et amplifiant ce mouvement, elle est en phase avec l'évolution des laboratoires des départements industriels.

Cette approche microscopique de la rayonne et des produits cellulosiques promue par la chimie colloïdale au sein du département de la Rayonne a sans doute facilité l'appropriation quelques années plus tard des rayons X sur ces matériaux. Cependant, il semble que ce soit Kenney, davantage que Cameron, qui ait servi d'interface principale entre le laboratoire des rayons X et celui de Buffalo. Benger, à peu près au même moment où il demande à Cameron de mettre sur pied le comité en physique, regrettait que les contacts de ce dernier avec les

¹⁸ Lettre, Bradshaw à W.P. Allen, 2 novembre 1922, *Ibid.*

¹⁹ Lettre, A.S. Hunter à W. H. Bradshaw (directeur de la division « chimie » du département de la Rayonne), 25 juin 1927, DPF 2/Rayon 1927-1928

²⁰ Lettre, A.S. Hunter à E.F. Burton, 27 juin 1928, *Ibid.*

départements industriels « soient pratiquement inexistant, et qu'il [Cameron] ait, de ce fait, des difficultés considérables à décider dans quelle direction orienter ses efforts »²¹. Sans doute le manque d'interaction de Cameron avec les départements industriels ont fait partie des raisons pour lesquelles celui-ci quitte la compagnie en 1932. Kenney devient alors « l'homme fort » des rayons X pour l'ensemble de la compagnie, et le comité en physique devient une « section » de physique au sein de la Station vers laquelle ce dernier est transféré ; cette section est placée au même niveau organisationnel que les groupes de chimie organique et de chimie colloïdale, ainsi que des nombreux groupes de recherche « appliquée » sur les pigments, les explosifs, la cellulose... Patterson, qui était auparavant responsable du groupe de recherche appliquée sur les pigments, est placé à la tête de cette section nouvellement instituée²².

Les compétences de Kenney, avec le passage à la recherche « fondamentale » de 1927 et l'institution de la section « physique » quelques années plus tard, changent radicalement de nature et se concentrent sur la physique et l'instrumentation. Embauché en 1919 par le département de Chimie, il est initialement chargé d'instituer la division « *Intelligence* » du département, que l'on peut traduire approximativement par « veille scientifique et technique ». Kenney, dès lors que cette division est instituée en 1921, est responsable de la bibliothèque de la Station et de la revue de littérature et des brevets sur demande des autres chimistes de Du Pont. Tanberg résume ainsi en 1926 les fonctions de cette *Intelligence division* : « Les principales tâches [de Kenney] sont : 1) s'assurer que les chimistes de recherche reçoivent le plus rapidement possible l'information publiée qui peut être utile à leur travail, et 2) rechercher des informations de tous genres sur demande des membres [de la Station] »²³. Quelques années plus tard le rôle de Kenney au sein de la Station s'est déplacé vers l'instrumentation physique et surtout son attitude vis-à-vis des autres équipes de recherche est plus active, dans la mesure où il a souvent la charge de l'initiative pour présenter les « services » que cette instrumentation peut proposer aux autres laboratoires de Du Pont. « Aller à la reconnaissance [*to scout for*] de nouvelles applications des rayons X aux problèmes de la compagnie » fait partie des prérogatives que Kenney s'attribue alors qu'il devient la cheville ouvrière de la section physique de la Station²⁴ ; son image au sein de Du Pont devient celle d'un bienfaiteur aux rayons X, comme en témoigne la « lettre ouverte », citée en exergue à ce chapitre et écrite par ses collègues en son honneur, probablement alors qu'il quitte définitivement Du Pont en 1956, pour rejoindre la *National Science Foundation* afin de diriger les grands programmes nationaux sur l'enseignement des sciences²⁵.

Cependant, des rayons X, les compétences de Kenney s'élargissent aux méthodes spectroscopiques, à la diffraction électronique, à la microscopie optique... et à l'ensemble des méthodes considérées comme « physiques » par les chercheurs et managers de la recherche de Du Pont. Le laboratoire des rayons X devient celui « des travaux généraux en physique »,

²¹ Lettre, Benger à Bolton, 9 octobre 1930, CRD 21/fundamental research 1926-1931

²² Cf. le diagramme organisationnel de la Station, 22 novembre 1933, SCS 3/CRD organization charts

²³ Tanberg à Stine, 1^{er} décembre 1926, CRD 18/Chemical department 1917-1926

²⁴ Kenney, « General Physical Research », 23 décembre 1935, GDP 7/Project outlines 1935-1937

²⁵ Information biographique tirée de *American Men of Science* (New York : Bowker, 10^e édition, 1960)

dont l'ambition est de « faciliter l'application des principes et techniques physiques aux problèmes de la Station et plus généralement à l'ensemble de la compagnie »²⁶. La fréquentation des laboratoires des départements industriels par Kenney se fait plus assidue, et par exemple à l'été 1935, il fait la tournée des laboratoires de Du Pont, accompagné du consultant de l'université Johns Hopkins Pfund, pour superviser les développements instrumentaux dans ces laboratoires, et conseiller leurs chercheurs sur la meilleure manière d'utiliser la palette d'instruments que le laboratoire de « physique générale » héberge à la Station. Les départements industriels utilisent alors ce laboratoire, et en particulier les rayons X, d'une manière routinière pour leurs propres activités de recherche ou de production, et dès 1935 Kenney se plaint que la capacité des postes à rayons X est dépassée par la demande venant des départements industriels ou du département de Chimie. Les microscopes optiques, et l'expertise de ceux qui les manipulent à la Station, sont également très largement sollicités par l'ensemble de la compagnie pour des questions de litige sur les brevets. Sans doute sans fausse modestie, Kenney pensait que la section physique, sous la direction de Patterson, a réussi à entretenir tout au long des années 1930 « un certain degré de *leadership* dans l'application des techniques physiques [au sein de la compagnie] »²⁷.

Parallèlement à cet activisme au sein de Du Pont, Kenney déploie également ses réseaux à l'extérieur de la compagnie, dont la motivation essentielle est de rester au fait des développements instrumentaux issus des laboratoires académiques. En particulier au MIT, où il a été formé jusqu'au doctorat et où il effectue au moins deux séjours entre 1933 et 1935 : un premier séjour d'une semaine au laboratoire de spectroscopie, et un second en 1935 au même laboratoire pour des études colorimétriques. Il effectue également plusieurs séjours au département de physique de l'université Johns Hopkins – grâce à l'entremise du consultant de longue date Hermann Pfund – ainsi qu'au département de physique de l'université de Purdue (Indiana)²⁸. Le *leadership* physico-instrumental revendiqué par Kenney au sein de la compagnie dépasse en réalité ses frontières ; cette section de physique permet à Du Pont l'assimilation de toute instrumentation de pointe dès ses premiers balbutiements dans les autres laboratoires académiques ou industriels. La BET est appropriée dès 1939 et devient rapidement routinière dans les services qu'elle offre aux départements industriels ; Du Pont est également parmi les premières industries à se doter d'un microscope électronique de la RCA en 1941. Pour la spectroscopie infra-rouge, qui va profondément affecter la chimie analytique appliquée aux composés organiques dans l'après-guerre, la section de physique suit de près les laborieux développements associés à partir de milieu des années 1930 et participe à son développement à partir de 1940²⁹.

²⁶ Kenney, *General physical*, *op. cit.*

²⁷ *Ibid.* et Kenney, « X-ray work », 26 novembre 1935, GDP 7/Project outlines 1935-1937

²⁸ *Ibid.* ; Kenney, « General physical research –major experimental project n°1550 », 4 août 1933, GDP 7/Project outlines 1927-1933

²⁹ Kenney, « Activities in physics – december 1940-june 1941 », 23 juin 1941, GDP 12/ Chronological files 1940-1945 ; cf. aussi table IV.1 et figure IV.1



Figure 4.1 — Photographie des principaux acteurs de l'instrumentation chez Du Pont, vers 1945
Kenney est au premier rang, au milieu. Aughey (rayons X), au troisième rang, à droite. Nichols (ultracentrifugeuse), au deuxième rang, au milieu. J.R. Downing (spectroscopie infra-rouge), au troisième rang, à gauche. C.E. Willoughby (microscope électronique), au troisième rang, au milieu

Réductionnisme, coopération entre les groupes, et instrumentation

L'insertion des rayons X au sein de la Station en 1927 amorce une stratégie de compréhension et d'action sur les matériaux délibérément réductionniste. Selon Stine, le laboratoire des rayons X « est conçu pour l'étude de l'arrangement spatial des atomes et des molécules, dans l'objectif de corrélérer les informations ainsi obtenues avec les propriétés pratiques des matériaux examinés »³⁰. Aussi, la « recherche fondamentale », à travers l'instrumentation sophistiquée dont elle favorise la promotion et l'assimilation par l'ensemble des laboratoires de la compagnie, s'accompagne de la pénétration des concepts d'« atome » et de « molécule » dans ces laboratoires. Ces termes sont absents des rapports des chimistes de la Station antérieurs au programme de Stine, ou s'ils apparaissent dans ces rapports, ils prennent une

³⁰ Stine, rapport de 1928 au comité exécutif, *op. cit.*

autre signification, empreinte de la chimie du XIX^e siècle et antérieure à la réalité moléculaire.

Cette pénétration des concepts d'atome et de molécule est très nette en catalyse, où les termes associés commencent à apparaître dans les rapports de la Station en 1928, alors que les acteurs qui ont introduit la réalité moléculaire dans le champ de la catalyse interagissent avec le groupe « fondamental » de catalyse de Du Pont. Hugh Taylor, figure académique majeure de la catalyse aux Etats-Unis, passe une partie de l'été 1928 à la Station dans le cadre du programme fondamental de Stine. Le rapport du groupe de catalyse assimile alors immédiatement la réalité moléculaire comme vecteur d'explication de la réaction catalytique, initiée par Irving Langmuir et reprise par Taylor : « La décomposition de l'oxyde nitrique [monoxyde d'azote] à la surface des catalyseurs de platine et de platine-rhodium est visualisée de la manière suivante : deux molécules d'oxyde nitrique sont adsorbées de manière adjacente avec l'oxygène à la surface catalytique. Les atomes d'azote se combinent et s'évaporent de la surface, laissant l'oxygène dans une condition adsorbée agir comme un agent retardateur »³¹. Cette conflation entre « fondamental » et manipulation mentale ou instrumentale des atomes et des molécules est également réalisée, comme détaillé au chapitre précédent, par Langmuir à GE à peu près au même moment.

Dans le cas des pigments minéraux, ces termes sont également absents dans les rapports des chimistes de la Station de la première moitié des années 1920. La précipitation des substances minérales dans la formation des pigments se fait parfois « dans des proportions moléculaires »³², et « moléculaire » ici ne prend pas la même signification que dans le cas du rapport sur la catalyse de 1928. « Particule » est très utilisé pour décrire l'état microscopique de ces matériaux dans ces rapports ; cependant le passage à la recherche fondamentale, et singulièrement l'action du groupe des colloïdes, en cherchant systématiquement à quantifier leur taille et à corrélérer taille et propriétés, va bouleverser la signification de « particule » et opérationnaliser ce concept (cf. troisième partie). Ce nouveau mode d'appréhension des micro-mondes, introduit dans le second chapitre, pénètre dans les laboratoires industriels par le biais de la « recherche fondamentale ».

Victor Cofman, chimiste d'origine Roumaine et formé à la chimie colloïdale, fait un passage de deux ans chez Du Pont entre 1927 et 1929 avant de diriger la Société Française du Lysol à Paris. Son témoignage permet de saisir quels ambitions et questionnements animent certains des chimistes de la Station, en particulier parmi ceux qui s'identifient le plus à la recherche « fondamentale » :

En discutant des problèmes que rencontrent les chimistes de la Station – en particulier les plus jeunes d'entre eux – on est frappé par l'ambition louable d'attaquer le problème d'un point de vue fondamental. Inlassablement on peut entendre les chimistes se demander :

³¹ G.B. Taylor, « Oxidation of ammonia. Catalytic decomposition of nitric oxide at surfaces of platinum and platinum-rhodium », Experimental Station B-187-13 report, 24 août 1928, CRD 9 ; pour les rapports antérieurs en catalyse voir CRD 9/B-187 et B-186

³² Experimental Station B-189-7 report, 3 janvier 1921, CRD 10/Pigments & hi-speed rotation devices

« Pourquoi ce phénomène ? » [« *Why does this happen ?* »], ou bien « quelle est la structure de la substance » ?³³

En quelques lignes percutantes, ce mémo (en conjonction avec un autre écrit un an après) met en évidence les liens – et les tensions – qui sont en train de s'établir à la Station entre recherche « fondamentale », recherche « appliquée », réductionnisme, instrumentation et coopération entre les groupes. Cette ouverture sur le « pourquoi » du comportement des substances, qui, selon Cofman, semble chevillée au corps de certains chimistes de la Station, suscite chez ce dernier une certaine appréhension en même temps que son admiration. La recherche systématique d'explication des comportements, qui passe par la détermination de la « structure » des substances, peut en effet selon lui mener les chimistes sur « le mauvais chemin », dans la mesure où « la relation entre formule moléculaire et propriétés physiques n'est pas connue ». Il lui semble donc nécessaire, étant donné l'entreprise générale d'explication des phénomènes auxquels les substances se prêtent, et dans laquelle se sont engagés une fraction du personnel de la Station, de clarifier ce qu'ils entendent par « structure ».

Eminent chimiste des colloïdes, Cofman reprend la différence de signification que ce terme revêt entre la chimie organique et la chimie colloïdale : il y a la « structure moléculaire du chimiste organicien », « qui est une abréviation [« *a shorthand expression* »] pour les propriétés chimiques de la substance » ; il y a la « structure électronique », qui explique les propriétés optiques et les spectres d'absorption ; et enfin la « structure micellaire », qui « réunit les propriétés de viscosité, d'élasticité etc. ». Cofman met en garde contre la tentation ou l'habitude des chimistes organiciens à réduire les propriétés de la substance à leur structure moléculaire, c'est-à-dire que le lien entre structure et propriétés n'est pas immédiat dans la plupart des cas : « Un exemple, suggéré par Dr. Carothers, est le cas de la cellulose ; sa formule a été déterminée mais elle ne nous permet pas de répondre aux nombreux problèmes pratiques de l'utilisation technique de la cellulose ». Cette recherche de la structure – moléculaire, électronique ou micellaire – ne saurait constituer une fin en soi pour les chimistes de la Station, qui sont avant tout des chercheurs industriels, ayant vocation à performer, ou à s'inscrire dans une maille menant à cette performance, sur les matériaux et produits manipulés par les laboratoires et usines de Du Pont. Ces chercheurs, toujours selon Cofman, doivent veiller entre entretenir le lien entre le microscopique et le macroscopique.

Car ce dernier a bien conscience de la nature de l'institution qui l'héberge ainsi que ses collègues : la Station n'est pas un laboratoire universitaire, elle est une maille d'un ensemble industriel plus vaste, dont la vocation finale n'est pas l'avancement de la chimie mais la rétribution des actionnaires par la vente de biens. Aussi le personnel qui la peuple, lorsqu'il s'engage dans la dichotomie « formule moléculaire »/propriétés physiques, doit selon lui privilégier le second aspect. C'est pourquoi Cofman établit une distinction nette entre « science pure » et « recherche fondamentale », et pour marquer cette différence il emploie

³³ Mémorandum, Cofman à Stine, « Fundamental research in the applied research laboratory » 26 février 1929, CRD 21/Fundamental research 1926-1931

l'étonnant mélange « recherche fondamentale appliquée » (« *fundamental applied research* »), qui devrait selon lui caractériser le type de recherches mises en œuvre chez Du Pont :

Le point important en ce qui concerne la recherche fondamentale appliquée est de poser clairement le problème de telle manière à ce qu'une fois résolu, il soit applicable au sujet en question. La bonne façon de débiter une recherche fondamentale appliquée est de considérer les propriétés effectivement impliquées. [...] Les remarques ci-dessus pourraient servir d'une base de distinction entre la recherche fondamentale et pure. Chacune des deux utilisent les mêmes méthodes et nécessitent la même ingénuité. Elles diffèrent sur un seul aspect seulement ; *quand un problème en recherche fondamentale appliquée est terminé, il est immédiatement applicable en technique*, tandis que lorsqu'un problème en science pure est résolu, il peut être d'une utilité pratique ultérieure, même si sa valeur théorique est immédiate.³⁴

Cette distinction revendiquée par Cofman entre science pure et recherche fondamentale peut ainsi s'interpréter comme un rappel à l'utilité des recherches engagées à la Station ; la détermination de la « structure » des substances devrait être subordonnée, dans cette perspective, à la compréhension et la performance sur les propriétés macroscopiques des matériaux que cette détermination peut apporter. Or, donnant l'exemple de la cellulose, Cofman met en avant l'inutilité technique de la détermination de sa structure moléculaire, du moins dans un premier temps. Ce faisant, il exhibe les limites épistémologiques de la chimie organique « pure ». D'où son appel à l'immixtion avec la physique, immixtion qui permettrait de relier ces déterminations structurales aux propriétés effectives et techniquement capitales des matériaux associés :

D'un point de vue plus pratique et direct, il semble que bien des avantages pourraient découler d'une étude approfondie des propriétés élastiques (extensibilité, pliabilité, résilience etc.) et des propriétés optiques (la brillance, la transparence, les effets chromatiques) des matériaux manufacturés par la Compagnie. Pour ce faire davantage d'hommes formés à la physique (l'ancien modèle, pas le subatomique) seront nécessaires.³⁵

Ce mémo a été écrit aux responsables de la Station et du département de Chimie (Bradshaw, Stine et Tanberg) alors que Cofman rédige ses recommandations avant de quitter Du Pont. Comme on peut le constater, il y encourage la coopération entre les différents axes du programme « fondamental », et en particulier le « projet coopératif » qui est train d'être élaboré par les groupes de physique, chimie organique et chimie colloïdale sur les matériaux polymères. Ce projet coopératif, détaillé au chapitre suivant, est un miroir grossissant de la recomposition de la chimie organique et de la chimie colloïdale qui agite ces disciplines à partir de la fin des années 1920. Les traditions épistémologiques de la chimie organique et de la chimie colloïdale se confrontent sur les matériaux polymères et en sortent toutes les deux transfigurées. Elles se confrontent et coopèrent sur la « structure » de ces matériaux ; le

³⁴ *Ibid.*, les passages soulignés sont de Cofman ; passages en italique : notre emphase

³⁵ Cofman, « A few words of parting », 9 mai 1929, CRD 21/Fundamental research 1926-1931

concept et la signification de « macromolécule », qui s'implante irréversiblement à l'issue de cette recombinaison, empruntent aux deux traditions.

Un des facteurs qui catalysent cette « coopération » est l'instrumentation : « La détermination de la structure des composés organiques à partir des données spectroscopiques et obtenues par rayons X offre une base de rencontre [« *a meeting ground* »] pour les physiciens et les chimistes organiciens (Carothers, Hill, DeVore, Cameron) »³⁶. Outre la physique cependant, cette « base de rencontre » concerne également, et peut-être surtout, la chimie colloïdale et la chimie organique. De même, l'ultracentrifugeuse, à l'instar de la spectroscopie et des rayons X, agit également comme facteur instrumental déterminant pour rapprocher la chimie organique et la chimie colloïdale. Cofman néanmoins ne mentionne pas expressément l'ultracentrifugeuse, ni l'apport du groupe des colloïdes, pour le groupe de chimie organique, sans doute car au moment où il écrit ces lignes cet apport est à peine ébauché.

Ainsi, cette ouverture à la physique ne peut pas être réduite à une volonté de promouvoir les instruments de pointe et leur meilleure utilisation parmi l'ensemble des laboratoires de la compagnie. Cette emphase sur l'instrumentation manifeste et accompagne un infléchissement plus difficile à percevoir mais néanmoins déterminant pour cet épisode de la chimie industrielle : la prise de conscience que ce que « chimie » recouvre au début du XX^e siècle – à la fois comme discipline académique, comme ensemble de caractéristiques des substances et de pratiques expérimentales sur celles-ci, et comme ensemble d'instruments et méthodes d'analyse – est insuffisant pour atteindre les objectifs ambitieux de connaissance théorique et de maîtrise expérimentale et industrielle des matériaux, que l'industrie se fixe. Si le programme de Stine ne mentionne pas l'instrumentation, il s'apparente en revanche à un manifeste pour se concentrer sur le « côté physique » des substances. Ce que Stine et les chimistes de Du Pont entendent par l'aspect « physique » des substances regroupe généralement deux aspects : leur microstructure d'une part, et leurs propriétés mécaniques, thermiques, optiques... – c'est-à-dire « non-chimiques » d'autre part. L'insertion quelques années avant de la chimie colloïdale au sein des laboratoires de Du Pont a alimenté cet infléchissement vers le « côté physique ». Dans son rapport annuel de 1926, Stine affirme cette dichotomie physique/chimique en ce qui concerne la partie sur l'étude colloïdale de la cellulose : « La nature des problèmes et les caractéristiques de ce matériau nécessite une étude physique plutôt que chimique »³⁷. Il n'est pas surprenant que les chimistes des colloïdes établis au sein de Du Pont, et singulièrement le groupe des colloïdes, jouent un rôle essentiel dans l'ouverture vers la physique et vers l'instrumentation. Ce virage instrumental qui caractérise le développement historique de la chimie à partir de l'entre-deux guerres a fait l'objet de plusieurs travaux d'historiens. Peut-être ces travaux ont-ils eu trop tendance à

³⁶ *Ibid.*

³⁷ Stine, rapport du département de Chimie de 1926 au comité exécutif, 20 janvier 1927, CRD 16/annual reports 1922-1933

considérer ce virage comme endogène à la chimie analytique³⁸ ou à la chimie organique³⁹, sans assez mettre en avant le fait que cette « révolution instrumentale » est en réalité transversale à la chimie et bouleverse les rapports de celle-ci avec la physique ; cette révolution instrumentale s'inscrit dans un déploiement historique plus large d'une « révolution » de la perception des substances qui rompt significativement avec la chimie telle qu'elle se pratique jusqu'au début du vingtième siècle.

L'instrumentation est une composante essentielle de cet épisode de la Station et plus généralement de l'expérience que Du Pont entretient vis-à-vis de la « recherche fondamentale » dans l'entre-deux guerres. L'ouverture vers la physique-discipline en est une autre. Patterson, Nichols et Kenney sont membres à la fois de l'*American Chemical Society* et de l'*American Physical Society* ; Kenney est en plus membre de l'*American Optical Society*⁴⁰. Toutefois, il est sans doute abusif de parler d'« interdisciplinarité » dans ce cas, dans la mesure où ce terme renvoie à des identités disciplinaires bien établies. Il semble davantage que ces acteurs, qui portent la recherche fondamentale et l'instrumentation de pointe au sein de Du Pont, « piochent » dans les différentes approches disciplinaires et domaines de savoir pour atteindre des objectifs qui leur sont propres. Les identités disciplinaires ne sont pas immuables pour ces chimistes de Du Pont. Ayant obtenu son doctorat en 1918 dans un laboratoire de chimie du MIT, dans la discipline physico-chimie, Kenney devait probablement se concevoir sans ambiguïté comme un chimiste alors qu'il débute sa carrière chez Du Pont la même année. Au milieu des années 1930, Kenney se sent, au sein de la Station, plus proche d'un physicien que d'un chimiste (cf. section suivante). À son embauche en 1927, l'identité disciplinaire de Nichols est la chimie colloïdale, vingt ans plus tard, au sortir de la guerre, il se pense davantage comme spécialiste des polymères, à la fois chimiste et physicien : il dirige la section « physique des hauts polymères » de la Société américaine de physique et fait partie du comité directeur de la division « chimie des polymères » de la Société américaine de chimie⁴¹. Kraemer, qui a souhaité conserver son appartenance principale au domaine des colloïdes, a préféré quitter Du Pont en 1938 plutôt que changer significativement son ancrage disciplinaire (cf. chapitre 5).

Certains chercheurs de Du Pont ont opéré une conflation entre recherche fondamentale et instrumentation de pointe. Kraemer, par exemple, alors qu'il détaille à Bradshaw le programme du futur groupe des colloïdes en gestation à la Station, affirme que « les recherches dans cette lignée [utilisation de l'ultracentrifugeuse], attireraient l'attention et le respect des scientifiques 'purs' dans tout le pays, et justifieraient la prétention à la recherche fondamentale dans un laboratoire industriel »⁴². Pour Kraemer, l'ultracentrifugeuse est le vecteur instrumental du réductionnisme ; la conflation qu'il opère ici entre recherche

³⁸ Davis BAIRD, « Analytical chemistry and the 'big' scientific instrumentation revolution », *Annals of Science*, vol. 50 (1993), pp. 267-290

³⁹ Dean S. TARBELL & Ann T. TARBELL, « The instrumental revolution, 1930-1955 », in *Essays on the History of Organic Chemistry in the United States, 1875-1955*. Nashville, TN: Folio Press, 1986, pp. 335-52

⁴⁰ Informations tirées du *American Men of Science*

⁴¹ Nichols, « Biographical sketch », *op. cit.*

⁴² Lettre, Kraemer à Bradshaw, 9 mars 1927, CRD/Fundamental research 1926-1931, emphase ajoutée

fondamentale et ultracentrifugeuse est aussi une conflation avec le réductionnisme. Au-delà du cas de Kraemer, l'assimilation de la recherche fondamentale avec l'utilisation d'une instrumentation de pointe semble généralisée parmi les chimistes de Du Pont et perdurer bien après l'élan initial du programme de Stine. Dans l'immédiat après-Seconde Guerre mondiale, la « recherche fondamentale » acquiert au sein de Du Pont, comme parmi l'ensemble des communautés scientifiques américaines et leurs interlocuteurs politiques, une aura qu'elle n'a jamais atteinte auparavant, et concentre toutes les attentions.

Dès 1946 un responsable de la recherche du département de la Rayonne, Georges D. Graves, s'emploie à « disperser une partie de la brume orale qui semble se former dès que quelqu'un prononce “recherche fondamentale” »⁴³. Graves, qui a été impliqué dans les grands programmes de développement du nylon, est alors engagé dans une large réflexion sur l'apport des docteurs en chimie pour Du Pont, qui peuplent massivement les laboratoires de la compagnie, et pas seulement ceux de la Station. Il se demande en particulier comment les conserver au sein de la compagnie, et leur donner des objectifs à la hauteur de leur formation académique⁴⁴ ; cette recherche d'adéquation entre l'industrie et les chimistes les plus qualifiés passe par une clarification de ce que signifie « recherche fondamentale ». Ainsi parmi les idées reçues qu'il essaye de « disperser », figure la conflation entre recherche fondamentale et instrumentation : « Une autre erreur a été, je crois, de définir le fondamental en termes de méthodes et d'outils. La distillation moléculaire, les ultracentrifugeuses, les tubes à rayons X, les microscopes électroniques, les spectrographes de masse, les techniques micro-analytiques génèrent pour certains une atmosphère “fondamentale”. Mais [ces instruments ou techniques] devraient être utilisés pour n'importe quel problème s'ils sont pertinents, le personnel qualifié à la hauteur, et les enjeux en conséquence ». Bien sûr, il faudra davantage que la mise au point de Graves pour « disperser la brume orale » et rappeler que la recherche fondamentale ne se réduit pas à l'utilisation d'une instrumentation de pointe.

En 1948 la Station a instauré un hall d'exposition pour les nombreux visiteurs qui la fréquentent, et certainement aussi pour le personnel de Du Pont externe à la Station (Fig. 4.2). Les images exposées pour illustrer – et donc symboliser – ce qu'est la « recherche fondamentale » à la Station sont des images obtenues par microscopie électronique de fibres de rayonne, de particules de pigment et de plastiques. Les éléments symbolisés dans cette photographie – et donc dans l'exposition associée de 1948 – sont immédiats : une instrumentation sophistiquée couplée à la détermination des microstructures. Au début des années 1920 à la Station, les chimistes les plus formés académiquement n'auraient certainement pas mis en avant ces symboles pour exposer l'essence de leur activité en quelques images percutantes. Cette proximité établie avec l'instrumentation et l'étude des microstructures est véritablement spécifique à cette période de l'entre-deux guerres. Cette exposition dans l'immédiat après-guerre permet de faire saillir certaines évolutions de la recherche industrielle dans le quart de siècle précédent.

⁴³ G.D. Graves, « Fundamental Research », 7 février 1946, CRD 21/Fundamental research 1941-1950

⁴⁴ H&S, p. 371-2



Figure 4.2 — Photographie d'une des expositions à la Station - août 1948
Avec l'aimable autorisation du Hagley Museum and Library

En 1955 la division « physique » de Patterson est remaniée en une division « Physique et analytique » du département de Chimie, et voit ainsi ses compétences élargies : en plus des « recherches générales en physique », la nouvelle division a également en charge la partie analytique du travail des laboratoires, c'est-à-dire le contrôle de la qualité des matériaux et produits utilisés par les départements industriels et la détermination des caractéristiques physico-chimiques des substances. Le rapprochement opéré entre « physique » et « analytique » en 1955 apparaît comme un clin d'œil à l'épisode du démembrement du département de Chimie en 1921, alors que les départements industriels se sont réappropriés les activités de contrôle et d'analyse routinière concernant leurs produits. La tension entre recherche et contrôle, entre recherche et service pour les départements industriels, perdure en réalité après le démembrement de 1921. Favorisée par le programme de recherche fondamentale, l'instrumentation est prise dans ces jeux de tension alors qu'elle est tantôt considérée comme une fin en soi, et tantôt comme un moyen de rationaliser la production et le contrôle de la qualité pour les départements industriels.

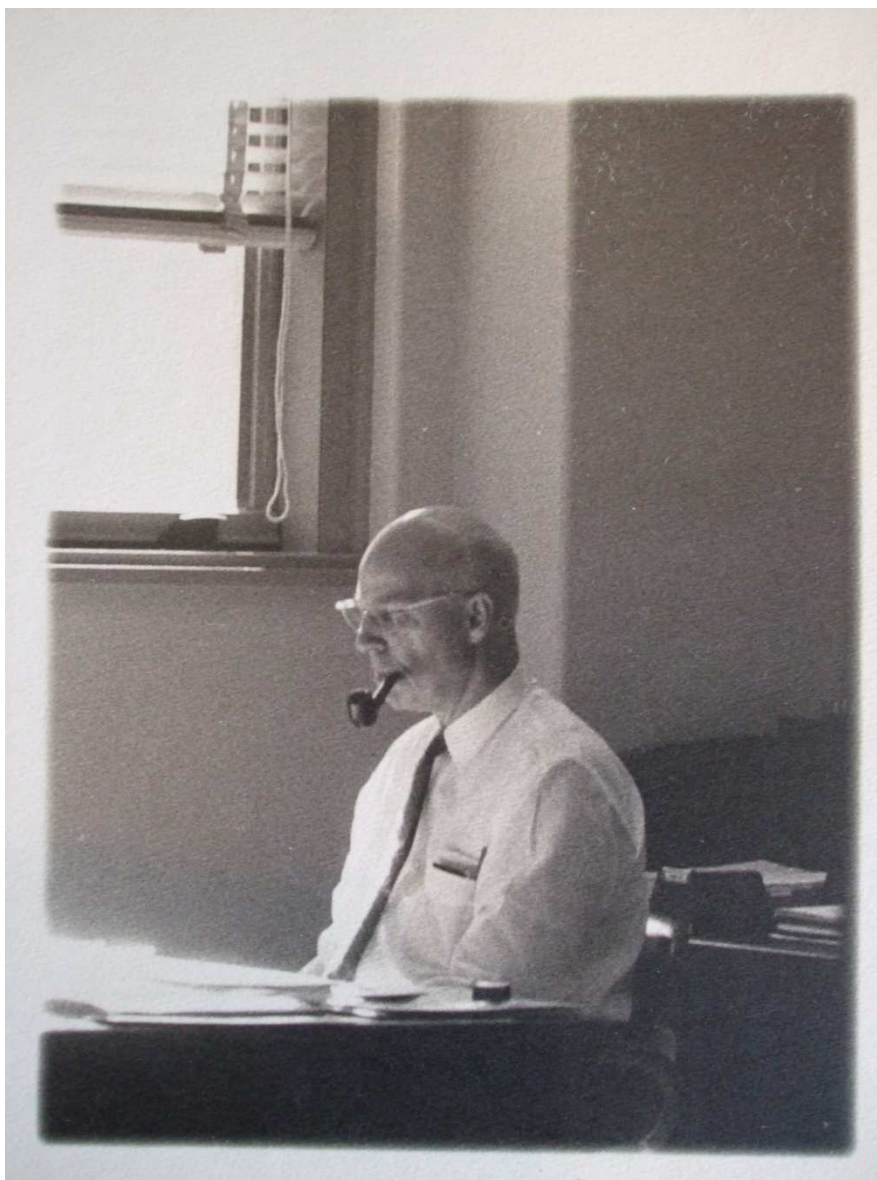


Figure 4.3 — Portrait de Gordon D. Patterson posant à son bureau, non daté (probablement peu avant sa retraite en 1962). Avec l'aimable autorisation du Hagley Museum and Library. La ressemblance avec le philosophe français Michel Foucault (1926-1984) est frappante. Pour le vingt-cinquième anniversaire de Patterson chez Du Pont en 1958, Crawford Greenewalt, devenu président de la compagnie, écrira à son attention qu'il « se souvient bien du jugement sensé que tu as toujours apporté aux problèmes qui ont ponctué ta carrière ». Ce à quoi Patterson lui répondra que « cela a toujours été un privilège de travailler avec toi, du temps où nous débattions le potentiel d'un nouveau projet de recherche, la sagesse d'investir dans un microscope moderne [...]. Ces dernières années ont été très intéressantes, avec de nouveaux outils comme la résonance magnétique [nucléaire, RMN], les spectromètres de masse, et les accélérateurs Van de Graff pour ajouter un peu de piquant » (Greenewalt à Patterson, 8 juillet 1958, et Patterson à Greenewalt, 11 juillet 1958, GDP 20/Personal Misc)

Appropriation par la physique discipline

Ce que l'on peut décrire comme une immixtion avec la physique au sein d'un environnement industriel historiquement lié à la chimie comme Du Pont reflète, au niveau scientifique national et international, une recombinaison profonde des interactions entre les deux disciplines universitaires associées. La dissémination des rayons X parmi les chimistes dépasse bien évidemment le cas particulier de Du Pont, et caractérise l'ensemble des communautés de la chimie académique, industrielle, ou dans les laboratoires gouvernementaux. L'instrumentation n'est pas le seul facteur qui a contribué à rapprocher les physiciens et les chimistes : les premiers succès de la mécanique quantique pour « expliquer » la nature des liaisons atomiques et moléculaires et des affinités entre les espèces chimiques reflètent la pénétration des physiciens sur un territoire traditionnellement réservé à la chimie. Selon l'historien de la physique Alexi Assmus : « C'est sur des problèmes d'un intérêt pour la chimie, et avec des chimistes, que les physiciens choisirent de travailler pour devenir des théoriciens quantiques. L'étude de la dynamique quantique des molécules a mis en contact les communautés américaines de chimie et de physique »⁴⁵. Ces percées théoriques et instrumentales, considérées comme exogènes à la chimie, mais bouleversant néanmoins ses concepts et ses pratiques, posent la question de la cohésion et de l'unité de la discipline chimie, et en particulier de son statut vis-à-vis de la physique. Bien entendu, la portée de ces questions dépasse les enjeux épistémologiques et scientifiques, ils sont entremêlés dans des luttes institutionnelles et de pouvoir, notamment sur le contrôle des revues et le contenu des articles qui y sont publiés, puisque la publication scientifique définit la nature et la place de toute composante ou discipline scientifique. L'industrie, de par son potentiel de carrières pour les chimistes et physiciens formés au doctorat et les fonds qu'elle débloque pour financer la recherche universitaire et l'édition des journaux scientifiques, constitue un protagoniste de poids dans ces luttes institutionnelles et ces orientations stratégiques. En particulier, l'action volontariste et pionnière du département de Chimie pour s'ouvrir radicalement à « l'aspect physique » des substances et à l'instrumentation associée va faire de Du Pont un acteur pesant sur ces orientations stratégiques.

Karl T. Compton (1887-1954), un acteur clé de ces luttes institutionnelles, éminent physicien et alors directeur du MIT, écrit en mars 1935 à Lamot du Pont, président de la compagnie éponyme, que « la Compagnie [Du Pont] est l'amie de la physique »⁴⁶. Au cours des années 1930, en même temps qu'il s'assure la participation de l'industrie chimique dans le nouveau domaine de « physique appliquée » qu'il cherche à promouvoir, Compton déploie un large corpus rhétorique qui distille la prééminence de la discipline physique sur les autres disciplines scientifiques et d'ingénierie : « Historiquement », affirme également Compton à

⁴⁵ Alexi ASSMUS, « The americanization of molecular physics », *Historical Studies in the Physical Sciences*, vol. 23 (1992), pp. 1-34, citation p. 7 ; voir également, pour l'autonomie et les recouvrements entre physique et chimie à cette période : John SERVOS, *Physical chemistry from Ostwald to Pauling. The making of a science in America*, Princeton (NJ), Princeton University Press, 1990 ; même auteur, *A disciplinary program*, op. cit. ; Mary Jo NYE, *From Chemical philosophy to theoretical chemistry : dynamics of matter and dynamics of discipline 1800-1950*, Los Angeles, University of California Press, 1993

⁴⁶ Lettre, Compton à Lamot du Pont, 20 mars 1935, PP 18/Chemical department Feb. 1932-Aug. 1938

Lammot du Pont, « la plupart des branches d'ingénierie sont des développements de la physique appliquée [...] Ces applications profitables ne sont pas apparues par chance de la science physique mère, mais sont le fruit d'une volonté consciente et efficace »⁴⁷.

Ce rapprochement entre la physique et la chimie, au cours des années 1920 et 1930, se manifeste au niveau institutionnel par la mise en place en 1931 d'un Institut Américain de Physique (*American Institute of Physics*). Cet Institut est conçu comme une « société de sociétés », c'est-à-dire qu'elle prend en charge l'édition des revues scientifiques de sociétés savantes supposées appartenir à la physique, et qui préexistent à l'Institut ; ainsi celui-ci rassemble initialement la Société Américaine de Physique, la Société d'Optique, la Société de Rhéologie, la Société d'Acoustique et l'Association des enseignants de physique. La Fondation pour la Chimie (*Chemical Foundation*) – qui finance alors l'édition de certaines revues en chimie – a milité pour la création de l'Institut de Physique, et transfère certains de ses crédits d'édition vers les journaux de physique hébergés par cet institut. La Fondation pour la chimie est le produit de la mobilisation de l'industrie chimique américaine, une fois le conflit de la Grande Guerre terminé et les Etats-Unis du côté des vainqueurs. Initialement, cette Fondation vise à s'approprier les brevets de l'industrie chimique allemande, qui domine jusqu'alors l'industrie chimique mondiale. Du Pont a joué un rôle essentiel dans la mise en place de la Fondation, et l'expertise de Bolton en particulier est déterminante pour la stratégie d'appropriation des brevets sur les colorants organiques et la légitimité juridique de cette appropriation dans la première moitié des années 1920⁴⁸. Aussi, au tournant des années 1930, lorsque le département de Chimie s'ouvre à la physique, Du Pont reste en phase avec la Fondation alors que celle-ci s'allie avec des physiciens pour peser sur l'évolution de la chimie – académique et industrielle –, et influencer sur les lignes éditoriales des journaux. Comme l'a montré l'historien John Servos, la Fondation privilégie les journaux et les acteurs qui militent pour une ouverture plus radicale de la chimie à la physique, et favorise ainsi la création de l'Institut de Physique⁴⁹. Cette imbrication de la Fondation dans les débats scientifiques et les luttes institutionnelles qui participent à la recomposition de la discipline chimie semble s'être déroulée sous l'œil attentif de Du Pont, et singulièrement avec l'accord des *leaders* du département de Chimie. Cet échange entre Kenney et Benger laisse transparaître l'empreinte du département de Chimie dans cette imbrication :

L'autre possibilité qui permet d'atteindre une audience est la publication, mais avant que nous ne donnions notre accord à une politique de publication plus large en physique [à l'Institut de physique] je pense que nous devrions considérer jusqu'à quel point la politique actuelle [de publication] est pertinente. Vous êtes certainement au courant que lorsque les fonds de la Fondation pour la Chimie dédiés aux publications des sociétés de chimie ont été retirés, ils ont été alloués aux intérêts des physiciens. L'Institut Américain de Physique a été organisé, et nous avons à présent tout un jeu de journaux qui sont au

⁴⁷ *Ibid.*

⁴⁸ Kathryn STEEN, « Patents, Patriotism, and "skilled in the art" – USA v. the Chemical Foundation, Inc., 1923-1926 », *Isis*, vol. 92 (2001), pp. 91-122

⁴⁹ John W. SERVOS, « A disciplinary program that failed : Wilder D. Bancroft and the Journal of Physical Chemistry, 1898-1933 », *Isis*, vol. 73 (1982), pp. 207-232., en particulier pp. 225-9

moins en partie financés par la Fondation pour la Chimie. [*The Physical Review, Reviews of Modern Physics, Physics, Journal of the Optical Society of America...*]⁵⁰

Parmi les revues prises en charge par l'Institut figure *Physics*, qui émerge de la Société Américaine de Physique et dont le premier numéro sort en juillet 1931. La brochure qui accompagne le lancement de la revue, et dont Nichols a gardé un exemplaire car il a été invité à être un de ses premiers contributeurs, porte l'empreinte de la rhétorique de Compton. Le postulat qui préside au lancement de cette revue est que

la physique, comme toutes les sciences, a deux aspects – un interne et un externe. L'un concerne la fascinante interaction et corrélation entre les phénomènes élémentaires sur lesquels le cadre logique de la science est construit. L'autre révèle la physique dans son rôle de science naturelle fondamentale [« *basic* »], dont les découvertes ont révolutionné l'industrie et avec elle les aspects matériels de notre civilisation.⁵¹

Cette dichotomie « interne/externe » supposée caractériser la physique permet de faire émerger une lacune dans les revues : alors que la partie « introspective » de la physique est déjà matérialisée par la *Physical Review*, il manque son équivalent pour « ses aspects plus généraux et externes » ; lacune que *Physics* se propose justement de combler : « L'ambition de *Physics* est principalement dévolue au rôle que la physique joue en tant que science fondamentale [« *basic science* »] aux autres sciences naturelles et aux techniques et industries ». Qu'est-ce donc que les éditeurs – et singulièrement Compton⁵² – entendent par cet aspect « externe » de la physique ? Il est remarquable de constater que sur les 22 articles annoncés dans cette brochure, 4 contiennent « colloïdal » dans leur titre et 8 autres relèvent de ce qui est alors considéré comme du domaine des colloïdes (caoutchouc, protéines, systèmes dispersés...), et sont écrits par des représentants éminents de ce domaine. Le domaine des colloïdes, qui émerge initialement de la chimie, est ainsi en passe d'être assimilé, à travers cette dichotomie interne/externe censée caractériser la physique, à ce que les acteurs de la reconfiguration de la chimie vis-à-vis de la physique comme Compton vont nommer « physique appliquée ». *Physics* est rebaptisé en 1937 le *Journal of Applied Physics*, en même temps que la Société de physique se dégage entièrement de la gestion du journal et que l'Institut de Physique assume seul son édition scientifique. Toutefois ce thème des colloïdes va très rapidement disparaître des colonnes du journal.

Nichols est amené à publier dans le premier volume de *Physics* par le truchement d'un symposium sur « les nouveaux outils de recherche », organisé en marge de la conférence annuelle de 1931 de la Société américaine de chimie, qui a lieu à Buffalo à l'automne. Ce symposium, hébergé par la division de chimie industrielle de la Société, est cependant organisé par un comité indépendant de celle-ci, chapeauté par Compton. Nichols est invité par

⁵⁰ Lettre, Kenney à Benger, « Conference on industrial physics », 26 novembre 1934, GDP 1/policies and procedures

⁵¹ « Announcing. Physics – a new monthly publication », JBN 3/Experimental Station quarterly reports 1930

⁵² Celui-ci a probablement rédigé la brochure d'introduction de *Physics* : le premier numéro de la revue comporte un article signé de sa main, « La valeur humaine de la physique », qui développe les arguments présentés dans cette brochure.

ce comité, qui demande à ce qu'il présente l'ultracentrifugeuse « du point de vue d'un nouvel outil pouvant être utilisé par d'autres pour résoudre leurs problèmes ». En plus de l'ultracentrifugeuse, les présentations concernent la spectroscopie Raman, les rayons X, la microanalyse des gaz, les techniques de haute pression et de haute température...⁵³. Compton vise donc essentiellement un public de chimistes industriels en organisant ce symposium, et cherche en particulier à promouvoir l'appropriation des techniques instrumentales récentes (dont une bonne partie provient de la chimie) par ces chimistes. Au cours de sa carrière, Compton a déjà eu l'occasion de promouvoir les collaborations entre physiciens et chimistes, et notamment la diffusion des instruments d'une discipline à l'autre. Il débute sa carrière académique à l'université de Princeton, et se hisse en 1929 à la tête de son département de physique. En duo avec Hugh Taylor, qui dirige le département de chimie, il milite pour la mise en place de projets de recherches communs entre les deux départements, notamment en instituant un « comité pour la recherche » transversal aux départements disciplinaires et doté d'un budget spécifique⁵⁴ ; dans une configuration qui rappelle remarquablement celle de Du Pont à peu près au même moment, les tubes à rayons X hébergés par le département de physique sont utilisés par les autres départements⁵⁵ ; Le recrutement des nouveaux professeurs pour les deux départements s'établit conjointement entre Taylor et Compton⁵⁶. Princeton devient ainsi un des premiers centres où la toute jeune mécanique quantique s'infiltré parmi les chimistes, et notamment au sein du domaine de la catalyse, prédilection de Taylor.

La carrière de Compton connaît un tournant en 1930 alors que la *MIT Corporation*, dirigée par le président de GE, lui propose de devenir le nouveau président du MIT. La MIT Corporation, sorte de conseil d'administration du MIT et qui regroupe ses principaux partenaires industriels, souhaite alors renforcer la place des sciences physiques et de la recherche « pure » au sein de l'institut de Boston, pour en faire un centre de recherche capable de rivaliser avec les grandes universités américaines ; Compton, éminent physicien et également consultant à la GE, est perçu comme l'homme idéal pour présider à cette « modernisation » du MIT : « L'âge de la vieille école technique, pensait Swope [le président de GE], est dépassé ; les nouvelles techniques nécessitent la recherche fondamentale et ses applications »⁵⁷. Dans les trois années qui suivent la prise du mandat de Compton en juillet 1930, la crise économique et le chômage s'amplifient ; « la science », vecteur de rationalisation et d'automatisation des usines, est souvent perçue dans l'opinion publique comme une cause de cet état économique et social pathologique. Ces critiques affectent fortement Compton, persuadé que la science, et singulièrement la physique, est le principal facteur qui assure le progrès industriel et plus généralement la grandeur d'une civilisation. Le virage de l'administration Roosevelt en 1933 et l'alignement de Compton sur les thèses du

⁵³ Lettre, E.H. Huntress (secrétaire du comité) à Nichols, 1^{er} mai 1931, JBN 3/Quarterly reports 1930

⁵⁴ « University research committee minutes, budgets 1924-1930 », HST 3

⁵⁵ Lettre, Compton au comité de recherche de Princeton, 13 décembre 1929, *Ibid*

⁵⁶ Lettre, Compton à J.H. Ribben (président de Princeton), 9 avril 1928, *Ibid*.

⁵⁷ Robert KARGON, Elisabeth HODES, « Karl Compton, Isaiah Bowman, and the politics of science in the Great Depression », *Isis*, vol. 76 (1985), pp. 301-18, citation p. 305 ; sur Compton, voir aussi Daniel J. KEVLES, *The physicists. The history of a scientific community in modern America*, New Yor, A.A. Knopf, 1978, chap. 17 (« The New Deal and research »)

New Deal – la planification économique et l’élargissement des coopérations publiques-privées – va ouvrir à ce dernier une latitude d’action politique très importante. Influent dans les différentes agences qui président à la planification économique et aux relations des élites scientifiques et industrielles vis-à-vis du gouvernement fédéral, Compton se démène entre 1933 et 1936 pour que la science ne soit plus perçue comme une cause du problème, mais comme un facteur essentiel pour sortir de la crise et assurer la prospérité des Etats-Unis à long terme, vecteur d’emplois et de progrès.

C’est peut être dans cette ambition, qui anime Compton, de mobilisation générale des ressources scientifiques et techniques pour les problèmes économiques du pays, que doit se comprendre sa volonté, dans ces années, de promouvoir le mouvement qu’il appelle « physique appliquée ». En décembre 1934 il organise, avec l’appui institutionnel de l’Institut de Physique et du Conseil National de la Recherche⁵⁸, une conférence de « physique industrielle », à laquelle participe Benger, en tant que représentant de Du Pont. L’apport d’une compagnie chimique à une conférence sur la physique industrielle n’est pas *a priori* évident ; mais les laboratoires de Du Pont se sont récemment ouverts à la physique et se sont mis à embaucher des physiciens. En outre, le choix de Benger – qui a promu, *via* Cameron, l’ouverture plus radicale à la physique au sein du département de Chimie – semble le plus judicieux pour représenter Du Pont. La compagnie est d’ailleurs un des généreux donateurs pour l’Institut de Physique qui co-organise la conférence. Kenney, à qui Benger a demandé son avis sur la pertinence de cette conférence, affirme que celle-ci « a comme objectif général de rendre la profession de physicien plus prestigieuse dans les positions industrielles. [...] Cet avantage pourrait à terme modifier l’industrie, qui sera moins encline à embaucher systématiquement des chimistes pour faire du travail de physiciens, et cela aidera les universités à attirer l’attention de leurs étudiants sur les possibilités de carrières industrielles pour les physiciens »⁵⁹. La profession de chimiste industriel est en effet historiquement plus établie que celle du physicien industriel. Cette profonde asymétrie entre la physique et la chimie vis-à-vis de l’industrie se renforce au cours des années 1920, alors que le laboratoire industriel se généralise. Au tournant des années 1930 en effet, les chercheurs industriels disciplinairement affiliés à la chimie sont environ dix fois plus nombreux que les chercheurs industriels physiciens⁶⁰. Moins organisés, la Grande Dépression a sans doute pesé plus durement sur les physiciens dans l’industrie que sur leurs collègues chimistes.

Aussi, quand Compton écrit à Lamot du Pont en mars 1935, ce n’est bien évidemment pas uniquement pour s’assurer de son allégeance en lui affirmant que « Du Pont est l’ami de la physique ». Il sollicite son accord pour que Benger rejoigne de manière permanente en tant que représentant de Du Pont un « Conseil en physique appliquée » au sein de l’Institut de

⁵⁸ *National Research Council*, un organe créé dans l’urgence de la Première Guerre mondiale afin de coordonner la mobilisation scientifique pour la préparation militaire des Etats-Unis. À la fin du conflit ce Conseil est maintenu et ses compétences s’élargissent vers un rôle de conseil et d’interaction avec le gouvernement fédéral en matière de politique scientifique.

⁵⁹ Kenney à Benger, *Conference on industrial physics*, *op. cit.*

⁶⁰ Arnold THACKRAY *et al.*, *Chemistry in America 1876-1976. Historical indicators*, Dordrecht, Reidel, 1985, pp. 106-123

Physique, ayant pour vocation «de faciliter l'application pratique de la physique»⁶¹. Compton conçoit ce Conseil comme un instrument de réflexion et d'orientation sur les programmes et filières des formations universitaires, l'édition de journaux, l'action des sociétés savantes et professionnelles... pour accroître la pertinence technique et industrielle de la physique. L'industrie chimique, dans cette perspective, est une niche professionnelle importante pour les physiciens, que l'Institut *via* ce Conseil se doit d'entretenir. Lamot du Pont transmet la requête de Compton à Bolton, et celui-ci lui assure que Bengier est certainement la personne la plus indiquée, et que la présence d'un représentant de Du Pont est très indiquée, car « Du Pont a été en contact avec ce mouvement [de physique appliquée] depuis quelques temps »⁶².

Conclusion

Il est possible de cerner la diffusion des instruments de pointe et leur degré d'utilisation en fonction des activités industrielles de la compagnie à partir de 1947 (Table 4.1). L'existence de telles tables de données au sein d'un milieu industriel comme Du Pont témoigne du caractère crucial revêtu par l'instrumentation pour les responsables de la recherche industrielle. L'instrumentation est réifiée par les managers de la recherche au tournant des années 1930, et ceux-ci cherchent à exploiter davantage les compétences instrumentales des chercheurs qui peuplent les laboratoires de Du Pont. A partir de 1921, Du Pont est une importante compagnie chimique organisée en départements industriels, qui se cantonnent généralement à une lignée de produits similaires, et en département auxiliaires. Le département de Chimie est le département de recherche centralisé de la compagnie, il n'est donc pas surprenant qu'il utilise le plus massivement les instruments qui étaient implantés en son sein et qu'il met à la disposition de l'ensemble de la compagnie. La plupart des départements industriels font appel pour leur propre compte à cette instrumentation, soit qu'ils aient développé leurs propres activités de recherche, soit qu'ils soient utiles pour les activités quotidiennes de contrôle de qualité des produits, comme pour les rayons X et la BET appliqués aux pigments.

⁶¹ Compton à Lamot du Pont, 20 mars 1935, PP 18/Chemical department Feb. 32-August 1938

⁶² Bolton à Lamot du Pont, 1^{er} avril 1935, PP 18/Chemical Department 1932-1938

| instrument/ département | rayons X (1927) | Taille de particule par diffusion lumière (1934) | ultracentrifugeuse (1928) | BET (1939) | spectroscopie infrarouge (1939) | Microscope électronique (1941) | microscope optique (1911) | Mesures électriques (~1926) |
|--|--------------------|--|------------------------------|---------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Chimie | 305 | 49 | 101 | 5 | 1283 | 163 | 493 | 9 |
| Ammoniac | | 7 | | 1 | 167 | 3 | 4 | |
| Ingénierie | 6 | | | | 71 | 34 | 18 | |
| Explosifs | | | | | 43 | | | |
| Fabrics & Finishes (vernis) | | | | 1 | 25 | 18 | 4 | |
| Grasselli (peintures et engrais) | 12 | 6 | 10 | 14 | 75 | 11 | | |
| Pigments | 205 | | | 42 | | 65 | 14 | |
| Plastiques | | 25 | 7 | | 81 | | 12 | |
| Rayonne (fibres textiles) | 86 | 2 | | | 132 | | 542 | |
| Electrochimie | | 9 | | | | 4 | | |
| Produits organiques (colorants) | 33 | 35 | 12 | 5 | | 8 | 40 | |

Table 4.1 — Nombre de tâches par instrument et par département de Du Pont, juin à novembre 1947 (l'année entre parenthèses indique l'année d'implantation de l'instrument chez Du Pont). Source : GDP/2 Physics section distribution 1945-1952

Certains chercheurs et managers de la recherche de Du Pont ont assimilé la « recherche fondamentale » à l'utilisation de cette instrumentation de pointe, en particulier au sortir de la Seconde Guerre mondiale, alors que l'exposition conçue au sein de la Station, pour résumer ce que « recherche fondamentale » recouvre, met en avant l'instrumentation de pointe comme le microscope électronique et la recherche de microstructures (Fig. 4.2). Ceci constitue une évolution considérable de ce que la même expression recouvre au tournant des années 1920. Toutefois, l'essentiel de cette évolution, peut-être, n'est pas là. La phrase qui accompagne ces microphotographies, placée au centre du montage, indique en effet que ces conflations semblent annexes et que l'essentiel de ce qui caractérise la recherche fondamentale, aux yeux des concepteurs de cette exposition, est ailleurs : « La recherche fondamentale de Du Pont est consacrée à la découverte de nouveaux faits scientifiques indépendamment de tout usage commercial immédiat »⁶³. Ce qui nous ramène à la dimension de l'utilité : cette vision de la recherche fondamentale est l'exact contre-pied de la subtilité introduite par Cofman entre celle-ci et la « science pure » ; elle s'aligne sur la « science pure » telle qu'introduite par ce dernier sous la dimension de « pas forcément applicable immédiatement en technique ».

⁶³ « Du Pont fundamental research is devoted to the discovery of new scientific facts without regard to immediate commercial use »

Cette distinction entre recherche fondamentale et science pure établie par Cofman sur la base de l'utilité technique était alors loin d'être marginale au département de Chimie, y compris parmi ses responsables. Pour le groupe des colloïdes, sa vision de la recherche fondamentale la mêlait sans équivoque à l'utilité technique car, en bons disciples de l'école de Svedberg, les propriétés des substances – et donc la recherche de la performance sur les matériaux associés – peuvent être réduites à la détermination et à la maîtrise des microstructures. Bolton, qui devient directeur du département de Chimie à partir de 1930, a entretenu des relations très pragmatiques vis-à-vis de la recherche fondamentale qui convergent avec celles du groupe des colloïdes. Les programmes ont été délibérément orientés vers une plus grande pertinence pour les départements industriels, une inflexion favorisée par l'installation dans la durée de la Grande Dépression de 1929⁶⁴. Refusant d'assimiler science pure et recherche fondamentale, la politique conservatrice de Bolton pour gérer le département de Chimie a mis mal à l'aise le leader du groupe de chimie organique, Wallace Carothers. Car, malgré sa décision de rejoindre Du Pont en 1927, il s'embles s'être toujours identifié à la science pure : « Qu'est-ce que la recherche fondamentale ? », se demande Carothers en 1932, « j'y ai beaucoup réfléchi, et la seule conclusion à laquelle je suis mené est que la recherche fondamentale devrait, après tout, être la recherche pure. Si elle est définie d'une autre façon, elle devient un type de recherche industrielle, et il n'y alors plus de possibilité de la différencier des autres types de recherches entreprises dans les autres laboratoires et groupes de la Compagnie. [...] Si elle est la recherche pure, son ambition principale doit être de produire des résultats scientifiques, et tout ce qui en ressort d'utilité pratique doit être considéré comme un produit dérivé accidentel »⁶⁵.

Dans cette perspective, il est surprenant que la figure de Carothers ait atteint le statut de mythe dans l'après-guerre, un modèle d'élite pour la recherche académique comme pour la recherche industrielle ; il personnifie le mariage heureux de la « science pure » et de l'industrie, censé caractériser cette période de l'histoire industrielle américaine et mondiale. En témoigne la place accordée à Carothers – jusqu'à nos jours – au *Smithsonian Institute* de Washington, l'un des plus prestigieux muséums de science des États-Unis (cf. fig. 4.4) ; une exposition lancée en 1988, et en partie financée par Du Pont⁶⁶. Chez Du Pont, un laboratoire de la Station qui porte son nom est inauguré en 1946 (cf. fig. 4.5) ; en 1952, le directeur du département de Chimie, dans un discours prononcé devant l'association internationale des formateurs en milieu professionnel⁶⁷, aligne la recherche fondamentale sur la science pure, et présente Carothers comme un héros⁶⁸.

⁶⁴ H&S, pp. 238-48

⁶⁵ Carothers, « Fundamental research in organic chemistry at the Experimental Station », 5 juillet 1932, pp. 9-12, CRD 21/Fundamental Research 1932-1934

⁶⁶ David J. Rhees, « Publicité institutionnelle, relations publiques et expositions. Le cas de Du Pont », in Brigitte Schroeder-Gudehus (ed.), *La société industrielle et ses musées. Demande sociale et choix politiques 1890-1990*, Paris, Archives Contemporaines, 1992, pp. 192-208

⁶⁷ IAWP, International Association of Workforce Professionals

⁶⁸ Cole Coolidge, « Organization of Du Pont Research », Speech before the Educators Conference, 23 juin 1952, GDP 1/Papers and addresses 1933

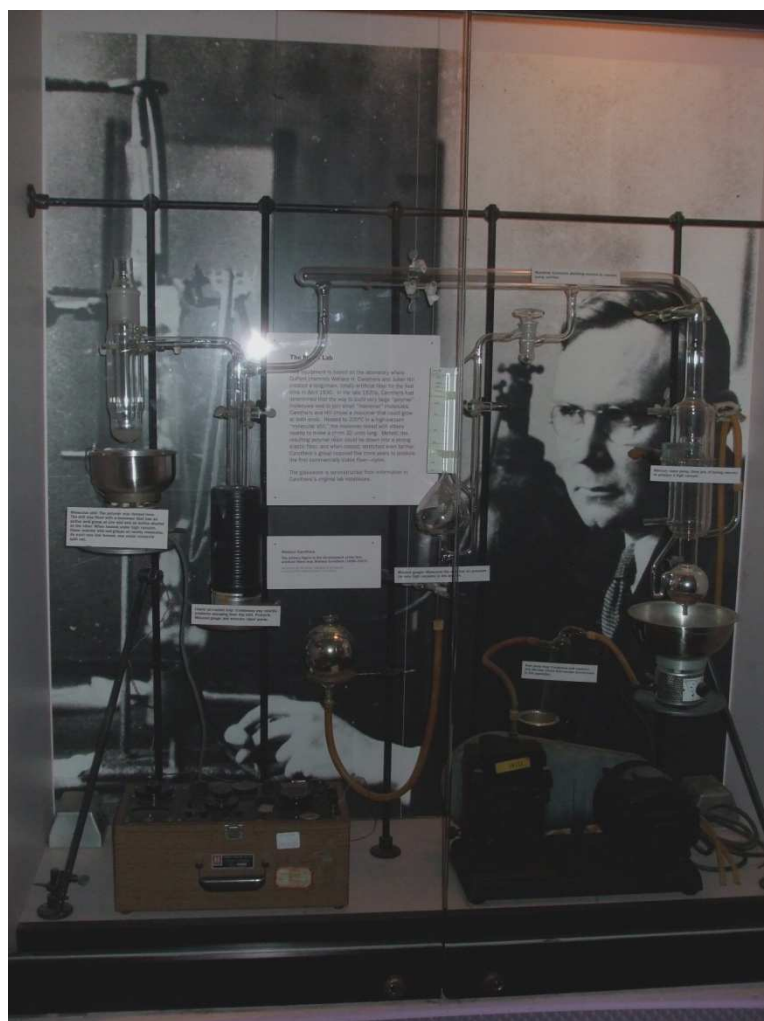


Figure 4.4 — Encart du *Smithsonian Institute* (Washington D.C.) dédié à Carothers et à son laboratoire chez Du Pont dans les années 1930
Avec l'aimable autorisation du Smithsonian Institute



Figure 4.5 — Inauguration par Bolton du laboratoire dédié à Carothers au sein de la Station, en septembre 1946
Avec l'aimable autorisation du Hagley Museum and Library

Chapitre 5. MATURITE ET DEMEMBREMENT DU GROUPE DES COLLOÏDES DE DU PONT – 1927-1945

Le recrutement de Kraemer en mars 1927, et celui de Nichols quelques mois plus tard au sein du département de Chimie, sur une base permanente, institue ce qui est rapidement connu comme le « groupe des colloïdes » parmi l'ensemble de la compagnie, et dont ces deux chimistes formés à l'école de Svedberg constituent les piliers. Pendant près d'une décennie, les chercheurs qui vont travailler sous la direction de Kraemer vont se penser et s'affirmer comme tels, et être également reconnus comme tels par les autres équipes du département de Chimie mais également par d'autres départements industriels comme les pigments et les fibres textiles. Au plus fort de son activité vers 1935, ce groupe est constitué d'une dizaine de personnes. Il est démantelé en 1938 avec le départ de Kraemer pour la *Biochemical Research Foundation* de Philadelphie, et disparaît alors des organigrammes. La trajectoire du groupe des colloïdes de Du Pont reste alors en phase avec celle du mouvement plus général des colloïdes aux Etats-Unis, dont la cohésion se décompose à partir du milieu des années 1930 et se reconstitue vers la chimie des surfaces, la biochimie, les polymères... Du Pont, encore une fois, suit son temps scientifique : l'érosion du groupe des colloïdes accompagne celle du domaine disciplinaire associé.

Au sein de Du Pont, le groupe des colloïdes s'inscrit à l'intersection d'une double partition : fondamental/appliqué et organique/colloïdal. Il se pense comme « fondamental », tout en se différenciant également du « groupe de chimie organique », dirigé par Carothers jusqu'en 1937. L'expertise des deux groupes se recouvre autour de certains matériaux cruciaux pour Du Pont, essentiellement les matériaux polymères, et en particulier les fibres textiles naturelles ou synthétiques. Aussi, même si chaque groupe a ses préférences en terme de matériaux et de produits – les colorants organiques et les matériaux polymères pour Carothers et les pigments minéraux et la cellulose pour Kraemer –, la mise en place de ces deux groupes ne découle pas uniquement d'une stricte répartition du travail « fondamental » selon les produits phares de Du Pont. Lorsque les deux groupes « coopèrent » sur le terrain des polymères, la vision des substances et les problématiques qui orientent le groupe des colloïdes diffèrent, dans un premier temps, radicalement de celles du groupe de chimie organique. Cette coopération, analysée dans une section de ce chapitre, va bouleverser la compréhension des fibres textiles et fonder les bases de ce qui deviendra dans l'après-guerre la « science » des polymères, en même temps qu'elle permet à l'industrie d'améliorer ses produits et procédés de production.

Ainsi, le terme de « groupe » ne désigne pas seulement une distinction formelle entre différentes équipes de travail, il reflète également des différences d'approche et de « questions

qui comptent » pour avancer dans la compréhension des substances et matériaux. Un manifeste de Kraemer en prise avec le développement du néoprène – le « caoutchouc artificiel » – résume bien ce qui anime ce groupe, et assure sa cohésion : « Puisque les propriétés mécaniques de ces matériaux [néoprène], à l’instar de tous les hauts polymères, sont largement contrôlées par les tailles et les formes de leurs molécules, toute information sur ces derniers points permet un développement plus *rationnel* des produits semblables au caoutchouc »¹. On reconnaît ici l’empreinte de Svedberg, celui-ci ayant façonné Kraemer et Nichols alors qu’ils étaient encore en phase *postgraduate* de leur études à l’université du Wisconsin. À travers le groupe des colloïdes, l’approche réductionniste de Svedberg trouve en effet un terrain d’expression fertile au sein de Du Pont. L’ultracentrifugeuse, manifestation de cette approche, débarque chez Du Pont en même temps que le groupe des colloïdes, et incline progressivement plusieurs équipes qui lui étaient auparavant étrangères à se poser la question qui lui est associée : quelle est la taille des particules/le poids moléculaire des substances que nous manipulons ? Inlassablement, le groupe des colloïdes cherche à influencer les autres chercheurs de Du Pont et contribue à diffuser le leitmotiv *particle-size* parmi les chimistes et ingénieurs de Du Pont.

Si les frontières du groupe des colloïdes sont poreuses au sein de la compagnie – en tant que groupe inséré dans un laboratoire industriel on s’attend évidemment à ce qu’elles le soient – elles le sont également à l’extérieur de la compagnie, ce qui est déjà plus remarquable. Ce groupe s’insère en effet dans un réseau scientifique et technique qui dépasse largement les frontières de Du Pont. L’analyse de son évolution doit prendre en compte des facteurs exogènes à la compagnie. Car les contacts entre Nichols et Kraemer à Wilmington et Svedberg à Uppsala, et entre Kraemer et ce qui deviendra la *Biochemical Research Foundation*, restent continus tout au long de la décennie 1930. Aussi, il peut être pertinent d’appréhender ce groupe des colloïdes comme une composante de l’« école de recherche » de Svedberg, et un acteur clé de l’environnement académique de Philadelphie en biochimie. Cette composante a été occultée jusqu’à présent par les historiens qui se sont penchés sur Svedberg et ses réseaux. L’historiographie s’est en effet concentrée sur les liens entre le laboratoire d’Uppsala et les Instituts et la Fondation Rockefeller². Cette Fondation Rockefeller a constitué un soutien matériel et moral déterminant pour les succès du laboratoire de physico-chimie d’Uppsala, dirigé par Svedberg. Ce laboratoire reçoit de la Fondation à partir de 1928 un soutien financier qui lui permet de développer ses ultracentrifugeuses et promouvoir la circulation des chimistes entre la Suède et les États-Unis. Selon Lily Kay, cette connexion Rockefeller-Uppsala, couplée à l’ambition de la Fondation Rockefeller de se positionner en acteur international majeur de la recherche biomédicale, explique en partie le choix de Svedberg de se spécialiser dans l’étude des protéines à partir de

¹ Mémoire, Kraemer à C.H. Greenewalt, 2 février 1937, JBN 6/Rubber and neoprene papers of Kraemer, emphase ajoutée

² Lily E. KAY, *The Molecular Vision of Life : Caltech, the Rockefeller Foundation, and the Rise of the New Biology*, Oxford, Oxford University Press, 1996 ; Boelie ELZEN, « The failure of a successful artifact. The Svedberg ultracentrifuge », in Svante LINQVIST (ed.), *Center on the Periphery. Historical Aspects of 20th-Century Swedish Physics*, Watson Publishing International, 1993, pp. 347-377

la fin des années 1920. Cependant Du Pont, en grande partie parce qu'elle est la seule institution en Amérique du Nord à détenir une ultracentrifugeuse de type Svedberg jusqu'en 1937, a contribué à la maturation de son école de recherche. Dans l'après-guerre Svedberg est le prototype du chercheur académique, « fondamental », défendant l'indépendance de la recherche scientifique vis-à-vis des intérêts industriels ou politiques³. Dans l'entre-deux guerres cependant, la recherche « fondamentale » a permis de rapprocher les laboratoires universitaires et industriels, et singulièrement le laboratoire de physico-chimie d'Uppsala, de la Station.

Le groupe des colloïdes comme une composante de l'école de recherche de Svedberg

Le concept d'« école de recherche » (*research school*) a déjà largement prouvé son utilité et sa portée pour l'historiographie des sciences⁴. Une des principales caractéristiques mises en avant pour délimiter ces écoles de recherches est le rôle de transmission des connaissances tacites qu'elles permettent⁵. Dans cette perspective l'école de Svedberg s'implante dans les laboratoires de Du Pont fin 1927 alors que Nichols revient d'Uppsala et construit, sur la base de ses recherches et pratiques d'ultracentrifugation avec Svedberg, une ultracentrifugeuse au sein de la Station. James Burton Nichols (couramment appelé « Burt » par ses collègues) a d'abord étudié à la prestigieuse université de Cornell entre 1919 et 1922. Il s'initie à la recherche avec Bancroft, grande figure des colloïdes aux Etats-Unis, et rédige un mémoire sur la « nitrocellulose et le camphre »⁶. Il rejoint ensuite en février 1923 l'université de Wisconsin, alors réputée pour son enseignement de chimie colloïdale et s'embarque avec Svedberg, fraîchement débarqué d'Uppsala, dans la réalisation d'une ultracentrifugeuse. Souhaitant continuer à travailler avec Svedberg à Uppsala, il obtient une bourse (un *fellowship*) de la Fondation Américano-Scandinave qui lui permet de passer deux ans dans le laboratoire de Svedberg, entre 1925 et 1927. Au cours de ces deux ans il participe à l'amélioration du prototype de Wisconsin de 1923, et Svedberg le charge également d'étudier l'albumine, une protéine contenue dans le blanc des œufs. Il s'agit plus précisément de déterminer le « poids moléculaire » de ces protéines par ultracentrifugation. À Uppsala il se lie avec les membres éminents de l'école de recherche de Svedberg, en gestation, et notamment avec le futur prix Nobel de chimie Arne Tiselius (1902-1971). Ce dernier fera office, pour Nichols et sa jeune femme Eleanor qui l'a rejoint, « de guide et protecteur durant les premiers mois [à Uppsala] »⁷. Depuis Uppsala il s'enquiert des postes auxquels il pourrait prétendre une fois rentré aux États-Unis. Début 1927 il écrit à Kraemer, avec lequel il est resté lié depuis leurs études communes à Wisconsin, pour s'enquérir des opportunités

³ Sven WILDMALM, « The Svedberg and the boundary between science and industry : laboratory practice, policy, and media images », *History and Technology*, vol. 20 (2004), pp. 1-27

⁴ Cf. le numéro spécial de *Osiris* (« Research Schools : Historical Reappraisals », *Osiris*, 2nd Series, vol. 8 (1993) et en particulier J.W. SERVOS, « Research Schools and their Histories », pp. 2-15)

⁵ Kathryn M. OLESKO, « Tacit knowledge and school formation », *Ibid.*, pp. 16-29

⁶ Nichols, « biographical sketch », 25 août 1978, JBN 7/ultracentrifuge and its use

⁷ *Ibid.*

professionnelles. Kraemer, toujours en poste à l'université de Wisconsin, mais en passe d'être embauché par Du Pont pour son programme de recherche « fondamental », y voit l'occasion d'y développer un ambitieux programme de chimie colloïdale centré sur l'ultracentrifugeuse et persuade Nichols que « les opportunités de recherche seront meilleures à Wilmington [Du Pont] qu'à Swarthmore », une université de Pennsylvanie qui a également fait une proposition à Nichols⁸. Certain qu'une position industrielle lui permettant de continuer ses recherches avec une ultracentrifugeuse l'attend chez Du Pont, Nichols rentre aux États-Unis en novembre 1927 et s'attèle immédiatement à la construction de l'instrument au sein de la Station.

Ce faisant, et bien que séparés d'un océan, Nichols et Svedberg restent en contact épistolaire soutenu jusqu'au déclenchement du conflit mondial de 1939, et même un peu après. L'installation des ultracentrifugeuses – il y en aura deux autres d'ici 1935 – a perpétué entre ceux-ci les contacts qui s'étaient établis à Uppsala. Au stock initial de savoirs tacites sur les détails pratiques de l'ultracentrifugation apporté par Nichols chez Du Pont, s'ajoutent des savoirs plus formels sur les plans des ultracentrifugeuses, leur manipulation, le choix des composants, les astuces diverses... qui circulent dans leur correspondance, et, jusqu'à un certain point, la justifie. En 1934, Svedberg écrit à Nichols que « les plans de nos deux laboratoires à ultracentrifugeuse à haute vitesse seront envoyés à Elmer [Kraemer] dans quelques jours. Vous serez alors en mesure de décider de la meilleure façon d'organiser votre laboratoire »⁹. Les échanges et conseils, d'ailleurs, ont lieu dans les deux sens, et alors que Svedberg aménage ses laboratoires d'ultracentrifugeuses à haute vitesse en 1934, Kraemer conseille également ce dernier presque en « temps réel » à partir de son expérience avec les ultracentrifugeuses de Du Pont¹⁰.

Cependant cette intense circulation d'informations s'accompagne également d'une circulation des membres de cette école de Svedberg, ce qui renouvelle le stock d'informations tacites. Alfred J. Stamm, chimiste employé au Laboratoire des Produits Forestiers situé à Madison dans le Wisconsin, a reçu un *fellowship* de la fondation Rockefeller, ce qui lui a permis de passer quelques temps dans le laboratoire d'Uppsala. Il vient à la Station au cours de l'année 1929, ce qui lui permet de commenter ses résultats sur la détermination des poids moléculaires et, sans doute, de donner quelques précisions sur les nouvelles centrifugeuses de type Siemens que Svedberg est en train d'expérimenter à Uppsala¹¹. Svedberg lui-même s'est rendu au moins une fois à la Station. Alors qu'il est invité à l'exposition universelle de Chicago de juin 1933 (*Chicago World's Fair*), Nichols en profite pour demander à Svedberg de venir rendre visite aux laboratoires de Du Pont à l'été. Il s'y rendra effectivement en juillet 1933¹². Les enjeux de cette visite sont assez importants, puisqu'il s'agit, par l'honneur de sa présence et sa reconnaissance, d'obtenir les crédits pour élaborer à la Station un modèle d'ultracentrifugeuse à haute vitesse que Svedberg vient récemment de mettre au point. Cet

⁸ Lettre, Kraemer à Bradshaw, 17 mai 1927, CRD 19/ Correspondence Bradshaw, Reese, Stine

⁹ Lettre, Svedberg à Nichols, 10 mars 1934 ; Cf. les dossiers JBN 6/Svedberg correspondance 1928-1931 & 1932-1941

¹⁰ Lettre, Svedberg à Kraemer, 18 mai 1934, *Ibid.*

¹¹ Lettre, Nichols à Svedberg, 16 novembre 1929, *Ibid.*

¹² Lettre, W.D. Lansing à Svedberg, 13 juillet 1933, *Ibid.*

épisode sera détaillé par la suite, car il nécessite de croiser d'autres fils et histoires. L'installation de cette nouvelle ultracentrifugeuse s'accompagne courant 1935 de la venue d'un autre chimiste américain, qui a passé quelques temps à Uppsala, C.C. Watson, afin qu'il apporte à la Station les savoirs, notamment tacites, nécessaires à son installation. Selon Nichols, Watson « a fait un travail splendide pour monter la centrifugeuse et superviser l'installation », aussi ne manque-t-il pas de remercier Svedberg « pour l'attention qu'il a mis à le [Watson] former »¹³. Également, Nichols espère que Svedberg, qui est invité prochainement à donner des cours dans le Massachussetts, pourra venir à la Station afin qu'il inspecte « l'installation de la nouvelle centrifugeuse, notre [avec Eleanor] nouvelle maison, et notre deuxième petit garçon »¹⁴.

Les connaissances tacites et plus formelles qui circulent au sein de cette école de recherche ne se restreignent évidemment pas aux ultracentrifugeuses. Pour cette école, le développement de ces instruments n'est pas une fin en soi ; ce qui anime Svedberg, Nichols et Kraemer alors qu'ils s'acharnent à améliorer ces instruments tout au long de leur carrière, c'est la mesure précise des micro-mondes, leur quantification, en partie parce qu'ils sont persuadés que c'est l'angle d'attaque le plus « rationnel », le plus « scientifique » pour comprendre et performer sur la matière, morte comme vivante¹⁵. Aussi les connaissances qui circulent au sein de cette école concernent également la détermination et l'interprétation des « poids moléculaires » ou des « tailles de particules ». L'échange, ici, se fait encore dans les deux sens et Nichols, au moins pendant quelques temps, continue à faire des expériences qui semblent davantage être destinées à Svedberg qu'à Du Pont. Continuant ses travaux sur l'albumine une fois en poste chez Du Pont, Nichols envoie à Svedberg ses résultats sur la diffusion de l'albumine dont ce dernier dira que « les valeurs que tu fournis se marient très bien avec nos propres déterminations sur d'autres protéines »¹⁶. Plus tard, Kraemer en particulier échangera et discutera fréquemment avec Svedberg sur leurs résultats *scientifiques*, par exemple en discutant les interprétations de Staudinger sur le lien entre poids moléculaire et viscosité (cf. section suivante).

Exprimer la relation Uppsala-Wilmington par le biais d'une « école de recherche » permet de marquer la relative symétrie qui y préside au niveau scientifique et instrumental, en tout cas peut-être davantage que le terme plus vague de « réseau ». Car il faut ici se méfier de toute interprétation « diffusionniste », à sens unique, de la relation Uppsala-Du Pont, qui est souvent considérée comme caractéristique de la relation université-industrie. Les idées, les conseils, les connaissances tacites et formelles, les hommes aussi, circulent dans les deux sens. Si les sources consultées ne permettent pas d'affirmer positivement que le personnel de Du Pont a également fréquemment visité le laboratoire d'Uppsala, au moins Svedberg en a plusieurs fois exprimé le désir¹⁷. Sans doute a-t-il estimé que leur venue pouvait également lui

¹³ Lettre, Nichols à Svedberg, 13 décembre 1935, *Ibid.*

¹⁴ *Ibid.*

¹⁵ Les adjectifs « rationnel » et « scientifique » pour décrire l'approche préconisée par le groupe des colloïdes reviennent souvent sous la plume de Kraemer et Nichols ; cf. section suivante et chapitre 7

¹⁶ Lettre, Svedberg à Nichols, 28 octobre 1929, *Ibid.*

¹⁷ Par exemple, Svedberg à Nichols, 10 mars 1934

être bénéfique. Le groupe des colloïdes a contribué au développement scientifique et technique de l'ultracentrifugation, tant au niveau de l'amélioration des ultracentrifugeuses que de l'interprétation et l'analyse des informations et mesures qui en découlent. Une bonne part de ces contributions est endogène au groupe des colloïdes, ou parfois en « coopération » avec le groupe de chimie organique. Le futur directeur du département de Chimie, le physico-chimiste Paul L. Salzberg, à l'occasion d'une revue des améliorations instrumentales provenant de ce département, résume en 1945 l'apport du département de Chimie pour les techniques d'ultracentrifugation à partir de 1930 :

Des améliorations majeures dans la conception de la cellule [de sédimentation] de l'ultracentrifugeuse, ainsi que dans la méthode de calcul des poids moléculaires à partir des données associées, proviennent du département de Chimie. La méthode de calcul a été publiée et reste largement utilisée à présent dans d'autres laboratoires. En outre, un sélecteur mécanique de cellule, permettant l'observation de plusieurs échantillons lors d'un seul essai, a multiplié par quatre la capacité de l'équipement.¹⁸

Dans cette perspective, l'historien John Servos rappelle que ces écoles de recherche partagent bien plus que des connaissances tacites ou formelles en offrant à ces membres « un guide [pour] les 'problèmes-structure' de leur discipline »¹⁹. En effet, même si l'ultracentrifugeuse constitue le lien matériel et instrumental qui rapproche le groupe des colloïdes d'Uppsala, ce groupe partage avec Svedberg et ses autres disciples à Uppsala plus qu'un instrument et des connaissances sur sa manipulation et ses possibles améliorations. Ils partagent une même appréhension de la chimie colloïdale ; dans le cas du groupe des colloïdes, un des enjeux de son école de recherche associée est de démontrer sa pertinence au sein d'un environnement industriel. Ainsi, l'originalité de cette école de recherche, vis-à-vis de la plupart des études de cas qui documentent ces écoles, est peut-être qu'elle se déploie également au sein d'un laboratoire industriel. Cette composante de l'école de Svedberg n'a pas les attributs d'enseignement d'une école de recherche dont l'ensemble des laboratoires sont hébergés dans des institutions académiques²⁰. Michael Dennis a argumenté, dans cette veine, que la césure primordiale qui caractérise l'émergence de la recherche industrielle aux Etats-Unis, est davantage à rechercher dans la décorrélation entre recherche et enseignement qu'entre « science pure » et « science appliquée »²¹.

¹⁸ Memorandum, Salzberg à Bolton, 2 février 1945, SCS 4/Instrumentation

¹⁹ SERVOS, *Research schools*, *op. cit.* p. 14

²⁰ Même si Kraemer donne des cours à l'université du Delaware à partir de 1940, le laboratoire de Du Pont n'héberge évidemment pas d'étudiants de l'université ; la proximité entre recherche et enseignement universitaire, qui caractérise les laboratoires académiques, est dans le cas de Du Pont inexistante.

²¹ Michael A. DENNIS, « Accounting for research : new histories of corporate laboratories and the social history of American science », *Social Studies of Science*, vol. 17 (1987), pp. 479-518

Recherche biomédicale chez Du Pont et l'extension du réseau de Svedberg

L'accent mis par Servos sur le rôle de guide théorique, méthodologique et instrumental que jouent les écoles de recherche est essentiel pour comprendre la maturation de l'école de Svedberg, en particulier dans l'adversité, lorsque les critiques envers cette école s'expriment. Au milieu des années 1930, les membres de cette école sont qualifiés par certains biochimistes, sans doute avec une teinte d'ironie, comme les « *U.C. boys* » (U.C. pour *ultracentrifuge*). Relançant les anciens et plus récents débats inter et intra-disciplinaires entre chimie organique et chimie colloïdale sur la pertinence du concept de « molécule » appliqué aux colloïdes, et sur l'existence et la nature des macromolécules, le biochimiste de l'université de Wisconsin Karl P. Link critique en 1937 l'utilisation que Svedberg fait du concept de « molécule » à travers ses ultracentrifugeuses :

Les *U.C. boys*, contrairement au chimiste organicien, ont-ils défini les « molécules » qu'ils mesurent de telle manière à ce que leurs collègues, spécialistes comme non-spécialistes, dont on peut espérer qu'ils essaient de leur venir en aide, sachent de quoi ils parlent ? Les *U.C. boys* ne se sont-ils pas appropriés un terme (molécule) qui a une connotation définie, précise et opérationnelle dans les laboratoires de chimie du monde entier, et la façon dont ils l'utilisent ne mène-t-elle pas à l'absurdité et à la confusion plutôt qu'à la clarté ?²²

Mais cette critique sur la terminologie révèle des doutes plus profonds sur la validité scientifique des expériences d'ultracentrifugation et des interprétations sur la nature des protéines qui en découlent. Constatant des régularités dans les données résultant de la centrifugation de divers échantillons de protéines, Svedberg a postulé au début des années 1930 que toutes les protéines sont constituées de petits segments dont le poids moléculaire est de 35 000. En 1936, le directeur de la section biochimie agricole de l'université du Minnesota, s'adresse au directeur de la *Biochemical Research Foundation* de Philadelphie, Ellice McDonald, pour exprimer ses réticences face à cette vision des protéines :

Je ne peux pas me faire à l'idée que les protéines diffèrent l'une de l'autre par des unités d'environ 34 000. Ça n'a aucun sens, et j'ai toujours regretté que le seul endroit où les résultats de Svedberg peuvent être testés est son laboratoire, qui est sous sa direction et utilise ses techniques. Je serais enchanté si l'appareil pouvait être à disposition ailleurs, de telle manière à ce que certains de ses résultats puissent être vérifiés indépendamment [...].²³

McDonald est alors en mesure de dupliquer les expériences de Svedberg : il vient d'obtenir l'autorisation d'utiliser les ultracentrifugeuses de Du Pont pour les recherches propres à la Fondation qu'il dirige. Kraemer, qui est également consultant à cette Fondation depuis plusieurs années, a joué un rôle essentiel pour obtenir cette autorisation. McDonald, en effet, connaît bien Kraemer, et lui transmet les critiques qu'il a reçues sur les résultats scientifiques

²² Cité par KAY, *The molecular vision of life*, op. cit. p. 114

²³ Lettre, R.A.Gortner à Ellice McDonald, 13 février 1936, JBN 6/Sedimentation equipment uc

de Svedberg. En tant que membre de son école de recherche, Kraemer pouvait-il avoir une autre attitude que de conseiller à McDonald « de dire au Professeur Gortner [le détracteur de Svedberg] : ‘croyez-le ou pas !’ » ?²⁴ Les contacts de McDonald avec un membre éminent de la famille du Pont de Nemours, mais également avec les laboratoires de Du Pont par l’intermédiaire de Kraemer, vont assurer à la Fondation qu’il dirige le privilège d’accès à ses ultracentrifugeuses ; pour Kraemer, ces contacts assureront une porte de sortie alors qu’il quittera Du Pont en 1938.

McDonald est une vieille connaissance de la famille du Pont de Nemours, puisque selon Adam Wishart il était le médecin personnel de la famille à la fin des années 1920²⁵. Il est nécessaire, à ce point, d’aborder pour un temps ce que l’histoire de l’industrie chimique a de plus sombre, histoire qui est aussi celle de Du Pont. Depuis 1917 la firme commercialise des colorants organiques, en particulier des amines aromatiques comme l’aniline. Alors que le lien entre cancer de la prostate et exposition à ces amines est établi depuis le début des années 1920 en Allemagne sur des bases épidémiologiques robustes, Du Pont demeure, jusqu’au milieu des années 1930, particulièrement réticent à admettre l’exposition à ces produits comme cause des tumeurs voire des cancers de la prostate qui ont touché ses ouvriers²⁶. McDonald, initialement formé en tant que médecin et qui s’est orienté vers la recherche en médecine, est directeur du *Cancer Research Laboratories*, un laboratoire institué en 1927 et hébergé par la faculté de médecine de l’université de Pennsylvanie. Ce laboratoire est financé en partie par Iréné du Pont, ancien président de Du Pont entre 1919 et 1926, et vice-président du conseil d’administration depuis. Bien que spécialiste, donc, de la recherche sur le cancer, McDonald niera jusqu’en 1932 que l’exposition aux amines aromatiques puisse être la cause de l’épidémie de tumeurs de la prostate qui sévit parmi les ouvriers des usines de colorants depuis quelques années. Cette prise de position ne semble pas être exceptionnelle pour l’époque, puisque selon Wishart le corps médical américain dans sa majorité doute alors que les produits de l’industrie chimique puissent être une cause du cancer. Les réticences de McDonald, néanmoins, et de Du Pont en général, à implanter des mesures d’hygiène industrielle drastiques pour limiter l’exposition des ouvriers aux substances carcinogènes, n’ont pas empêché certains de ses dirigeants à encourager les recherches sur le cancer, y compris matériellement. En plus du *Cancer Research Laboratories* financé par Iréné du Pont, le président de Du Pont de 1915 à 1919 et membre du conseil d’administration jusqu’en 1940, Pierre S. du Pont, promeut au sein de la compagnie tout au long des années 1930 les traitements au plomb colloïdal en coopération avec le Jefferson Hospital, le plus grand centre hospitalier universitaire de Philadelphie. Le groupe des colloïdes, doté de l’atout des ultracentrifugeuses, a su exploiter cette bienveillance « d’en haut » vers la recherche biomédicale pour s’affirmer comme un acteur incontournable dans l’environnement

²⁴ Lettre, Kraemer à McDonald, 20 février 1936, *Ibid.*

²⁵ Adam WISHART, *One in three. A son’s journey into the history and science of cancer*, New York, Grove Press, 2007, pp. 65-70

²⁶ *Ibid.*, voir aussi David MICHAELS, *Doubt is their product. How industry’s assault on science threatens your health*, Oxford, Oxford University Press, 2008, pp. 19-25 ; H&S pp. 558-566

académique biomédical de Philadelphie ; ce faisant, il a contribué à accroître encore la portée des réseaux de Svedberg.

La « méthode scientifique » que McDonald préconise pour le traitement du cancer, et le dédain pour la méthode d'« essai et erreur » qui a selon lui caractérisé jusque là la recherche sur le cancer²⁷, ont sans doute concouru à la lenteur avec laquelle Du Pont a implanté des mesures d'hygiène industrielle plus drastiques pour réduire la morbidité parmi ses ouvriers. Cette méthode scientifique en revanche, ouverte à la chimie colloïdale, lui a permis de se faire de Kraemer, puis de ses ultracentrifugeuses chez Du Pont, des alliés dans ses recherches sur le cancer. McDonald met l'accent sur l'étude de la maladie « d'un point de vue chimique », et cherche à comparer systématiquement les protéines sanguines des sujets sains de ceux qui ont développé des tumeurs ou cancers. Pour ce faire, il s'entoure de chimistes, et notamment de Kraemer, qu'il embauche comme consultant dès l'institution de son laboratoire en 1927²⁸. En poste chez Du Pont, Kraemer passe environ une matinée toutes les deux semaines au laboratoire de McDonald. Ce transfuge de Kraemer, de la chimie vers la recherche sur le cancer, n'est pas exceptionnel. Le mouvement des colloïdes de l'entre-deux guerres porte en lui-même cette ouverture puisque ses principaux représentants affirment que la chimie colloïdale est mieux à même de comprendre les lois du vivant – et la compréhension des maladies – que la chimie « classique », affirmations qui ont souvent été critiquées et ont contribué à déconsidérer la chimie colloïdale par la suite²⁹. Ainsi retrouve-t-on au tournant des années 1930 des spécialistes des colloïdes en charge de la préparation des sérums, médicaments et autres substances biologiquement actives.

Aussi, lorsque Pierre S. du Pont se lie avec un médecin de la clinique sur les tumeurs de l'hôpital Jefferson à la fin des années 1920 autour d'un traitement anticancéreux à base de plomb colloïdal, il semble alors naturel que le groupe des colloïdes soit le vecteur de l'engagement que Pierre du Pont met dans ce traitement. Fin 1930 un jeune chimiste spécialiste des colloïdes, Carl E. Willoughby, est recruté au sein du groupe des colloïdes et travaillera de manière continue avec le médecin de l'hôpital Jefferson jusqu'en 1934. Willoughby est en charge de la préparation des ampoules de plomb colloïdal qu'il délivre à l'hôpital et qui sont données comme traitement aux patients. Fin 1931, un laboratoire d'analyse chimique est installé à la clinique sur les tumeurs, installation à laquelle Willoughby apporte son expertise. Il s'agit en particulier de méthodes de détection de traces de plomb dans les excréments des patients soumis au traitement anticancéreux. Les échantillons de plomb colloïdal sont également analysés par ultracentrifugeuse avec l'aide de Nichols³⁰. Entre 1928 et 1941, 400 cas de cancer ont reçu le traitement au plomb colloïdal par

²⁷ E. McDONALD, « Cancer research and the scientific method », *Science*, vol. 74 (17 juillet 1931), pp. 55-60

²⁸ Cf. biographie de Kraemer écrite par Nichols : « E.O. Kraemer », 8 novembre 1945, JBN 6/ultracentrifuge 1930-1945

²⁹ Andrew EDE, *The Rise and Decline of Colloid Science in America 1900-1935. The Neglected Dimension*, Burlington (VT), Ashgate, 2007, chap. 8

³⁰ « Quarterly report of the colloid group, january – march 1931 ; october-december 1934 », 14 avril 1931 ; JBN 4/Kraemer quarterly research reports

le biais de la coopération Du Pont-Hôpital Jefferson³¹. Les recherches sur le plomb colloïdal et la préparation des doses et analyse des échantillons ne sont plus hébergées par le groupe des colloïdes à partir de la fin de l'année 1934. Sans doute ces recherches sont-elles hébergées par la suite par le nouveau laboratoire de recherche médicale et toxicologique récemment instauré au sein de Du Pont. Le *Haskell Laboratory*, institué courant 1934 suite à l'épidémie des tumeurs de la prostate parmi les ouvriers exposés aux colorants organiques, a pour vocation de tester les effets biologiques des produits issus des usines de Du Pont, et des substances manipulées par les ouvriers qui y travaillent³².

C'est peut-être par le biais de ces activités sur le plomb colloïdal, et des liens avec le milieu de la recherche médicale universitaire de Philadelphie qui en découlent, que le groupe des colloïdes rencontre la biochimiste Florence Siebert, rencontre qui aura un impact important sur la trajectoire du groupe. Spécialiste de la recherche sur la tuberculose, Florence B. Siebert (1897-1991) est arrivée à Philadelphie en 1932, et travaille au *Henry Phipps Institute* de l'université de Pennsylvanie à améliorer les tests pour diagnostiquer la tuberculose. Auparavant, Siebert avait montré que les substances actives, permettant le diagnostic de la tuberculose, sont des protéines émises par le bacille tuberculeux appelées « tuberculines ». La recherche sur le diagnostic s'oriente alors, pour Siebert à l'université de Pennsylvanie, vers les moyens de purifier et d'isoler la tuberculine. L'ultrafiltration et la cristallisation sont alors des moyens courants pour isoler ces substances actives, cependant Siebert va également se tourner vers l'ultracentrifugation comme méthode de séparation des protéines³³. Celle-ci rencontre à l'été 1933 le groupe des colloïdes de Du Pont, ce qui l'introduira dans l'école de Svedberg. L'introduction de Siebert au sein de cette école sera bénéfique pour elle-même et le traitement de la tuberculose, comme elle sera bénéfique pour le groupe des colloïdes et la recherche industrielle chez Du Pont.

Au même moment en effet, Kraemer et Nichols aspirent à s'équiper d'une ultracentrifugeuse à haute vitesse que Svedberg commence à mettre au point fin 1932, et dont il ne manque pas de la leur décrire avec emphase. Siebert, et l'association américaine de la tuberculose à travers elle, joueront le rôle de catalyseur dans cette appropriation. Dans une lettre adressée début 1934 à Svedberg qui relate cet épisode, Nichols affirme que « notre visite à Miss Siebert de Philadelphie durant votre séjour à Wilmington a probablement été un des principaux facteurs qui ont permis d'obtenir l'ultracentrifugeuse [à haute vitesse] »³⁴. Svedberg est effectivement venu aux Etats-Unis au printemps 1933 à l'occasion de l'exposition universelle de Chicago, et en juillet il visite le groupe des colloïdes à Wilmington. Au cours de l'été, Svedberg, Nichols et Kraemer rencontrent Siebert à Philadelphie pour exposer la pertinence de l'ultracentrifugation pour la séparation des protéines, et donc pour ses propres recherches sur la tuberculose. « Je me rappelle très bien »,

³¹ SCS 1/Cancer research

³² H&S, pp. 560-6

³³ Ariel HOLLINGSHEAD, « Florence Barbara Siebert (1897-1991) ». In *Women in Chemistry and Physics, A Bibliographic Sourcebook*; Louise S. GRINSTEIN, Rose K. ROSE, et Miriam H. RAFAILOVICH (eds.), Greenwood Press: Westport, Connecticut, 1993, pp. 527-529

³⁴ Lettre, Nichols à Svedberg, 15 février 1934, JBN 6/Svedberg correspondance 1932-1941

écrit Svedberg à Nichols à propos de cette entrevue, « lorsque nous étions tous assis dans son [Siebert] bureau, alors que toi et Elmer [Kraemer] essayiez de lui présenter les pratiques laborieuses de l'ultracentrifugeuse »³⁵. Peu après cette entrevue Siebert s'est rendue à la Station et Nichols lui a présenté les ultracentrifugeuses de son laboratoire, et certainement aussi les perspectives offertes pour la séparation des protéines par les ultracentrifugeuses à haute vitesse que Svedberg est en train de concevoir. En novembre de la même année le président de l'Association américaine de la tuberculose (devenue par la suite Association américaine du poumon), association qui finance les recherches de Siebert depuis le début de sa carrière, vient à Wilmington donner un discours auquel Stine a assisté. Présentant « en termes élogieux l'attitude que l'industrie entretient vis-à-vis de la recherche académique, dont la relation entre Du Pont et Miss Siebert est un exemple », le président de cette association est invité par Stine à venir visiter les laboratoires de Du Pont et en particulier ses ultracentrifugeuses. Encore une fois, Nichols expose à ses invités les perspectives offertes par les nouvelles centrifugeuses de Svedberg, tant pour la recherche biomédicale que pour Du Pont³⁶. Stine conseille alors à Kraemer de faire une demande officielle pour construire une telle ultracentrifugeuse à la Station.

Kraemer, cependant, a jugé plus sage de ne pas mettre en avant la recherche biomédicale lorsqu'il expose à Tanberg, en décembre, ses arguments pour justifier la présence d'une nouvelle (et coûteuse) ultracentrifugeuse dans les laboratoires de la Station. Au contraire, il présente l'ultracentrifugeuse à haute vitesse comme indispensable pour les activités industrielles de Du Pont, et en particulier pour son large programme sur les fibres textiles et les polymères. Les succès obtenus sur les pigments minéraux sont mis en avant pour rappeler l'apport des deux ultracentrifugeuses de la Station, et les études de Svedberg sur les protéines pour rappeler l'intérêt des ultracentrifugeuses à haute vitesse :

Au vu des intérêts vitaux de notre Compagnie sur les divers matériaux à haut poids moléculaire, et étant donné également l'apport effectif des nouvelles méthodes d'ultracentrifugation démontré par les brillantes recherches du Professeur Svedberg sur une classe de ces matériaux (les protéines), nous considérons que l'extension de notre recherche sur les colloïdes dans ce champ [ultracentrifugation à haute vitesse] serait un développement logique de l'ensemble de notre programme fondamental et promet des résultats encore plus importants et remarquables que ceux obtenus pour les pigments.³⁷

Cette demande est accordée au début de l'année suivante ; la construction et la mise en service de l'appareil mettront plus d'un an à être réalisées. En l'état des sources, il est peu probable que Siebert ait engagé d'importantes recherches sur la tuberculine avec le groupe des colloïdes et leur nouvelle ultracentrifugeuse. Néanmoins Siebert se rendra à Uppsala dans le laboratoire de Svedberg au cours des années 1937-1938. Dotée d'un *fellowship* pour étudier les techniques d'ultracentrifugation des protéines avec Svedberg, elle rapportera à son retour

³⁵ Svedberg à Nichols, 10 mars 1934, *Ibid.*

³⁶ *Ibid.*

³⁷ Memorandum, Kraemer à Tanberg, « High-speed ultracentrifuge », 6 décembre 1933, JBN 7/uc equipment 1934

l'expertise nécessaire pour manipuler ces instruments et en entamera la construction à son institut de recherche sur la tuberculose de l'université de Pennsylvanie. En revanche, il est un autre chercheur engagé dans la recherche biomédicale qui va parvenir à profiter directement de la nouvelle ultracentrifugeuse à la Station : McDonald. Ce dernier est en passe d'opérer un changement institutionnel majeur pour ses *Cancer Research Laboratories*. En décembre 1934, Kraemer délivre une conférence à l'Institut Benjamin Franklin de Philadelphie, « le comportement colloïdal des molécules géantes », dans lequel il présente les possibilités offertes par les nouvelles centrifugeuses de Svedberg³⁸. Cette intervention de Kraemer au *Franklin Institute* prélude à la délocalisation fin 1935 des laboratoires de McDonald vers cet institut « de promotion des arts et des sciences » nommé en l'honneur de Benjamin Franklin ; au passage ces laboratoires sont renommés « Biochemical Research Foundation », et deviennent une composante du Franklin Institute. A peu près au même moment, McDonald, convoitant la nouvelle centrifugeuse de Du Pont, écrit à son mécène Iréné du Pont pour une requête extraordinaire :

Dr. E.O. Kraemer me dit que cette machine [la nouvelle ultracentrifugeuse] n'est pas tout le temps utilisée pour les investigations de la Station, et il suggère que nous demandions qu'un homme s'ajoute à l'équipe de la Station pour étudier nos problèmes de protéines sanguines sous sa [Kraemer] direction. [...] C'est le seul appareil de ce genre à l'extérieur de l'Europe et il serait, par conséquent, extrêmement bénéfique pour nous si nous pouvions nous « inviter » pour son application aux problèmes biologiques sans aucune perturbation pour son utilisation aux problèmes de la Station.³⁹

Le changement institutionnel opéré par McDonald est ainsi une occasion pour lui de se rapprocher de l'école de recherche de Svedberg, et singulièrement des ultracentrifugeuses de la Station. Comme il l'explique à son mécène, McDonald a d'abord cherché un membre de cette école pour venir travailler chez Du Pont, sous la direction de Kraemer, mais sur des problématiques de la Biochemical Research Foundation. McDonald a en effet pensé à un chimiste Anglais qui a travaillé avec Svedberg à Uppsala, A.S. McFarlane ; cependant ce dernier a préféré rentrer à son laboratoire de Cambridge, pour y installer une ultracentrifugeuse avec l'aide de la Rockefeller Foundation.

Constatant les antécédents de l'utilisation des laboratoires de Du Pont pour des recherches biomédicales s'inscrivant dans le tissu universitaire et académique régional – avec l'aval de l'ancien président Pierre S. du Pont –, les managers du département de Chimie accèdent à la demande de McDonald⁴⁰. Un chimiste de la Biochemical Research Foundation, E.B. Sanigar, vient régulièrement à la Station manipuler sur les ultracentrifugeuses et travailler avec Kraemer sur les protéines sanguines. La porosité entre la Biochemical Research Foundation et la Station est alors maximale. Le groupe des colloïdes a su profiter du monopole de l'ultracentrifugeuse en Amérique du Nord pour assurer son ancrage à la fois au sein de Du Pont et parmi l'environnement académique régional de Philadelphie. L'argument

³⁸ *The Franklin Institute News*, décembre 1934, p. 187 ; JBN 6/ultracentrifuge 1938-9

³⁹ Lettre, McDonald à Iréné du Pont, 14 septembre 1935, JBN 6/sedimentation equipment ultracentrifuge

⁴⁰ Mémoire, Bradshaw à Bolton, 17 septembre 1935, *Ibid.*

de Kraemer pour obtenir le partage de la nouvelle ultracentrifugeuse – elle n’est pas utilisée tout le temps pour les activités de Du Pont – contraste avec le constat avancé quelques années plus tôt pour obtenir une autre ultracentrifugeuse fin 1929 : selon Nichols en effet l’unique ultracentrifugeuse de la Station ne suffit plus à remplir toutes les demandes⁴¹. Cet épisode sur l’opportunité d’une ultracentrifugeuse à haute vitesse dans un environnement industriel, et les justifications qui y président, reflète la tension inéluctable qui agite la recherche industrielle lorsqu’elle se considère sur un pied d’égalité avec la recherche académique, ce que marque l’adjectif « fondamental » dans ce cas. La trajectoire de Kraemer, ses choix scientifiques et institutionnels, s’aligneront sur les choix de son mentor Svedberg, c’est-à-dire un infléchissement vers les sciences du vivant et en particulier l’étude des protéines. Néanmoins, alors qu’il est en poste chez Du Pont, il lui est délicat de justifier ses activités de recherche dans ce domaine, la compagnie étant alors avant tout une compagnie chimique⁴². La protection de Pierre S. du Pont va lui permettre de continuer ses excursions dans le domaine des sciences de la vie, et même de rapprocher encore le laboratoire de McDonald de ceux Du Pont, par le biais de la nouvelle ultracentrifugeuse.

En juillet 1938, Kraemer se rend pour une durée indéterminée à Uppsala. Il représente non pas Du Pont, qu’il vient de quitter définitivement, mais la Biochemical Research Foundation. Quelques mois plus tard il écrit une longue lettre à Nichols dans laquelle il expose les changements en Suède en général, et au laboratoire de Svedberg en particulier, depuis leur long séjour à Uppsala il y a près de 10 ans⁴³. Mais le déclenchement du conflit à la fin de l’été 1939 l’oblige à rentrer aux États-Unis. Il ne semble pas avoir quitté de Du Pont, et la Station en particulier, en mauvais termes avec ses managers. En tous cas, alors en poste à Fondation de recherche en biochimie, Kraemer continue ses expériences sur les ultracentrifugeuses de la Station : « Elmer [Kraemer] et Sanigar ont leur appareil de diffusion qui fonctionne actuellement dans notre salle d’ultracentrifugation », raconte Nichols à Svedberg en avril 1941, « et font également des essais sur ultracentrifugeuses assez fréquemment »⁴⁴. Les relations entre la Fondation de recherche en biochimie de Philadelphie, où Kraemer vient d’obtenir une position, et la Station de Wilmington sont tellement étroites, en dépit ou à cause du transfuge de Kraemer, que le directeur du Franklin Institute se demande, alors qu’il cherche à doter la fondation de nouveaux locaux, « si la localisation [des nouveaux locaux] dans les environs immédiats des laboratoires de Du Pont ne serait pas avantageux »⁴⁵.

Les sources consultées ne permettent pas de s’exprimer définitivement sur les raisons qui ont poussé Kraemer à quitter Du Pont début 1938. Ni, d’ailleurs, sur celles qui l’ont

⁴¹ Mémorandum, Nichols à W.H. Sweetman, « Reasons for acquiring an additional ultracentrifuge unit », 11 novembre 1929, JBN 5/uc data 1935-6

⁴² À partir des années 1960 cependant, Du Pont se repositionne stratégiquement sur les sciences du vivant (H&S, chapitre 20)

⁴³ Kraemer à Nichols, 10 septembre 1938, JBN 6/Svedberg correspondance 1932-1941

⁴⁴ Nichols à Svedberg, 18 avril 1941, *Ibid.*

⁴⁵ Lettre, W.F.G. Swann [directeur Franklin Institute] à McDonald, 14 octobre 1939, APS, William F.G. Swann papers, Ms. Collection B. Sw1, Series I/McDonald, Ellice folder 2

poussé à quitter en 1927 l'université de Wisconsin pour rejoindre Du Pont. Peut-être, sachant être épaulé par Nichols, la perspective d'y construire une ultracentrifugeuse et d'y élaborer un ambitieux programme en conséquence, capable de le rapprocher instrumentalement et donc aussi scientifiquement de son mentor Svedberg à Uppsala. Kraemer savait certainement que les perspectives d'obtenir une ultracentrifugeuse à l'université du Wisconsin resteraient pour plusieurs années très limitées. Pendant la période 1927-1938, l'ambition de Kraemer de rester au plus près des recherches de son mentor Svedberg a dû composer avec les pressions issues de son ancrage institutionnel dans l'industrie chimique. La « recherche fondamentale » dont s'enorgueillit alors l'industrie n'est pas la « science pure », et les chercheurs industriels qui s'attribuent cette étiquette n'ont pas les mains entièrement libres pour élaborer leurs programmes de recherche. Pendant la Grande Dépression, en et particulier jusqu'à, ceux-ci doivent justifier leur apport à la compagnie. L'éloignement de Kraemer de Du Pont reflète son attachement principal à l'école de recherche de Svedberg plutôt qu'à une compagnie en particulier. Grâce à un contexte favorable au cours de la période 1927-1938 – le monopole de l'ultracentrifugeuse, la bienveillance des « glorieux anciens » dirigeants de Du Pont vis-à-vis de la recherche biomédicale, une véritable demande de l'environnement académique vis-à-vis de la chimie colloïdale et des ultracentrifugeuses – Kraemer a pu concilier sa vocation et son ambition personnelle avec sa position industrielle.

Comparer la trajectoire de Kraemer à celle de Nichols permet de saisir, par contraste, ce que Kraemer a cherché à éviter alors qu'il quitte Du Pont en 1938. Nichols, en effet, a passé toute sa carrière chez Du Pont ; son attachement à la chimie colloïdale et à l'école de recherche de Svedberg s'est dilué alors que sa position de chercheur industriel s'est renforcée. Son rapport à l'ultracentrifugeuse s'est aligné sur les intérêts industriels que Du Pont pouvait attendre de ces instruments : des intérêts en termes de développements techniques et de propriété intellectuelle, qui excluent les intérêts plus nébuleux du prestige et des liens renforcés avec l'univers académique. Au cours de la guerre et davantage encore dans l'immédiat après-guerre, l'ultracentrifugeuse trouve sa justification dans la caractérisation des polymères, dans le cadre des marchés prometteurs qui s'ouvrent sur les fibres textiles artificielles. Alors que les ultracentrifugeuses commencent à se diffuser dans les autres laboratoires industriels et académiques, l'argument du monopole de Du Pont sur cet instrument pour accueillir des recherches proches de celles de Svedberg, ou plus généralement celles qui semblent à Kraemer plus pertinentes scientifiquement, ne tient plus. La commercialisation des ultracentrifugeuses brise le lien privilégié entre Uppsala et Wilmington, et oblige les chercheurs du groupe des colloïdes à choisir leur appartenance principale. Les trajectoires différentes de Nichols et Kraemer traduisent des choix d'appartenance divergents.



Figure 5.1 — Photographie de Nichols en 1947
Avec l'aimable autorisation du Hagley Museum and Library



Figure 5.2 — Photographie de l'équipe féminine de baseball de Du Pont, non datée (certainement courant des années 1930), Nichols est l'entraîneur de l'équipe en bas à gauche (« *Trainer* »), avec l'aimable autorisation du Hagley Museum and Library

Un leitmotiv : « *particle-size* »

Les interactions du groupe des colloïdes à l'extérieur des frontières de Du Pont étant retracées, il nous faut à présent comprendre son écologie au sein de l'environnement industriel de la compagnie. La durée de vie de ce groupe – sur les quatre groupes de recherche « fondamentale » que Stine institue en 1928, seuls le groupe des colloïdes et celui de chimie organique dépasseront les dix ans – témoigne d'une adaptation relativement réussie à cet environnement. Si les interactions tissées à l'extérieur de la compagnie ont davantage assuré son prestige scientifique plutôt que son ancrage industriel, le succès dans la durée du groupe des colloïdes est avant tout à rechercher dans sa capacité à se rendre progressivement indispensable aux activités industrielles de Du Pont. L'histoire du groupe des colloïdes endogène à la compagnie permet de penser que les ambitions et les hypothèses qui ont accompagné le lancement de la « recherche fondamentale » ne sont peut-être pas irréalistes ou irréalisables. Le postulat qui accompagne ce programme est en effet que recherche scientifique modelée sur les standards académiques et recherche scientifique et technique orientée par les objectifs industriels peuvent et doivent se recouvrir davantage et en bénéficier mutuellement ; la recherche fondamentale, telle que cette expression est comprise chez Du Pont dans l'entre-deux guerres, suppose la convergence de la science et de l'industrie dans une interaction « gagnant-gagnant ».

L'approche réductionniste du groupe des colloïdes, qui fonde son identité épistémologique, a effectivement permis ce recouvrement entre science et technique soutenu dans la « recherche fondamentale », assurant ainsi la pérennité de ce groupe au sein de l'environnement industriel de Du Pont. « Ces dernières années », affirme Nichols vers 1928, « la détermination précise de la taille des particules dans les matériaux colloïdaux a été reconnue comme *fondamentale* pour le contrôle et l'amélioration des produits dans l'industrie des colorants, des peintures, du caoutchouc ... »⁴⁶. Aussi le groupe des colloïdes, et Nichols en particulier, conçoit l'articulation de ce groupe vis-à-vis de la compagnie qui l'héberge comme naturellement idoine à ce recouvrement science/technique incarné par la recherche fondamentale. Car ce qui est scientifiquement intéressant pour ce groupe – la quantification des microstructures – est également techniquement et industriellement pertinent, puisque les microstructures déterminent « fondamentalement » le comportement des substances et matériaux. Le recouvrement entre science et technique se traduit, pour ce groupe, par l'ambition de lier les connaissances sur les micro-mondes avec les propriétés macroscopiques essentielles à leur mise en œuvre industrielle.

Elmer Kraemer et le réductionnisme microstructural en chimie

Comme abordé ci-dessus, Kraemer s'est davantage considéré avant tout comme un membre de l'école de recherche de Svedberg plutôt que comme un chimiste de Du Pont, ce qui lui a fait ressentir la tension inéluctable au recouvrement entre science et technique avec davantage

⁴⁶ Nichols, "Polymerization and particle size", manuscrit non-daté (vers 1928), JBN 4/Misc papers #2, emphase ajoutée

d'acuité que pour Nichols. En 1932, alors que la crise économique s'intensifie, la pression sur les groupes « fondamentaux » du département de Chimie pour justifier leur utilité s'accroît, et les responsables du département demandent des comptes aux leaders des groupes. Répondant à la requête de Tanberg de clarifier « la relation du groupe fondamental des colloïdes aux activités industrielles de la compagnie », Kraemer exprime cette tension en rappelant que « plus la recherche fondamentale est liée aux intérêts immédiats de l'organisation, plus la probabilité que les résultats aient une valeur monétaire démontrable est importante ; d'un autre côté il y a alors peu de chance que les résultats aient un caractère révolutionnaire »⁴⁷. Organisationnellement, ce groupe s'inscrit dans une partition « fondamental/appliqué », et les objectifs et les attentes qu'il soulève sont moins immédiats que pour un groupe « appliqué », dédié à la maîtrise d'un produit ou d'un procédé circonscrit. Dans les notes manuscrites qui rassemblent ses réflexions alors qu'il s'apprête à quitter Du Pont en 1938, Kraemer estime que le chercheur fondamental « a un ressenti général moins confortable que celui du chimiste appliqué [« *applied chemist* »]. [Ce dernier] a l'impression qu'il travaille directement vers un but spécifique et bien défini. Nous [les chercheurs « fondamentaux »] ressentons l'obligation de travailler d'une façon différente, et cependant d'atteindre également des résultats pratiques aussi rapidement et sûrement que le chimiste appliqué »⁴⁸.

En tant que leader du groupe des colloïdes, Kraemer est le champion de son articulation au sein de la compagnie à travers la posture et la justification réductionniste. Nichols dira de lui qu'il a « aidé matériellement à la transformation de la chimie colloïdale d'une science qualitative à une science quantitative »⁴⁹. Cette posture réductionniste permet à Kraemer de concilier ses ambitions scientifiques personnelles – la reconnaissance au sein de l'école de Svedberg – et les impératifs industriels auquel le groupe qu'il dirige doit se plier. Celui-ci cherche à démontrer la portée de cette posture aux équipes de recherche susceptibles de se l'approprier et de penser « taille de particule », principalement celles impliquées dans les pigments minéraux et les fibres textiles. Ce faisant, il contribue à opérationnaliser l'approche réductionniste de son mentor Svedberg. L'ultracentrifugeuse est le principal vecteur instrumental de cette opérationnalisation, et Kraemer compte bien capitaliser sur le monopole dont jouit Du Pont sur cet instrument tout au long des années 1930 : « afin de profiter le plus possible de la position unique de la Compagnie – puisqu'il n'y a toujours pas d'ultracentrifugeuses hormis celles du Professeur Svedberg en Suède [et celles à la Station] – des efforts ont été déployés pour intéresser les équipes sur les pigments dans la recherche sur la taille des particules »⁵⁰. Cet effort de lobbying auprès des équipes de recherche « appliquées » ou hébergées par les départements industriels, visant à promouvoir l'approche microstructurale quantitative – et l'utilisation de l'ultracentrifugeuse –, dépasse le cadre des pigments et touche également les matériaux organiques comme les fibres textiles. Comme

⁴⁷ Mémoire, Kraemer à Tanberg, « The relationship of the fundamental research in colloids to the industrial activities of the company », 17 août 1932, JBN 4/Quarterly reports colloid group

⁴⁸ Kraemer, notes manuscrites probablement écrites vers 1938, *Ibid.*

⁴⁹ Nichols & Sanigar, « Dr. E.O. Kraemer », manuscrit non-daté, (vers 1943), JBN 6/UC June 1930 – Nov. 1945

⁵⁰ Kraemer à Tanberg, 17 août 1932, *op. cit.*

nous le verrons, le « poids moléculaire » devient alors l'équivalent de la « taille de particule » en tant que paramètre explicatif général des propriétés des substances.

De quatre ans l'aîné de Nichols, Elmer Otto Kraemer rencontre Svedberg avant ce dernier, dès 1921, alors que l'école de recherche associée est encore en gestation et la renommée du « maître » encore limitée. Néanmoins l'attrait du laboratoire de physico-chimie d'Uppsala est suffisamment important outre-Atlantique pour décider un jeune chimiste Américain, passionné par la chimie colloïdale, à venir étudier en son sein au début des années 1920. Parmi les premiers américains à s'intéresser et à se dédier à la chimie colloïdale, Kraemer va contribuer à propager ce domaine aux Etats-Unis ; avant de rejoindre Du Pont en 1927, il participe à l'institutionnalisation du domaine de recherche et d'enseignement associé à l'université du Wisconsin. Né en 1898 dans une petite ville de l'état du Wisconsin, il commence ses études à l'université d'état, située dans la capitale Madison en 1914, et obtient une licence de chimie en 1918. Continuant ses études et s'initiant à la recherche au département de chimie de l'université, il s'intéresse de plus près à la physico-chimie, une spécialité qui commence à peine à être enseignée à Madison, au contact de la première génération de chimistes américains qui ont étudié la physico-chimie en Allemagne au tournant du siècle et l'ont importée aux États-Unis. Au sortir de la Première Guerre mondiale, la chimie colloïdale ne fait pas encore l'objet de filières spécifiques, ni même de cours autonomes dans les cursus universitaires de chimie. Kraemer cependant, à travers son initiation à la physico-chimie, découvre et se passionne pour ce domaine de chimie encore marginal aux Etats-Unis ; probablement captivé par la lecture des travaux de Svedberg à Uppsala, il postule à une bourse de la Fondation Américano-Scandinave (*American Scandinavian Foundation*) afin de rejoindre Uppsala en 1921 et en particulier son laboratoire de physico-chimie⁵¹.

Détenteur de la première chaire de physico-chimie à l'université d'Uppsala depuis 1912, Svedberg dirige alors le laboratoire où s'installe Kraemer ; les thématiques du laboratoire sont alors entièrement orientées sur la production des particules colloïdales et la mesure précise de leur taille (cf. chapitre 2). Au contact de ces thématiques, Kraemer se forme au moule « *particle-size* » et s'initie aux pratiques d'ultramicroscopie et en particulier au couplage des appareils photographiques et caméras sur l'ultramicroscope (*kino-ultramicroscope*). Après un bref passage à Berlin à l'institut impérial Kaiser Wilhelm de physico-chimie sous la direction de Herbert Freundlich (1880-1941), il retourne à Wisconsin en 1923, ce qui lui permet de continuer à travailler avec Svedberg, alors professeur invité à Madison. Il obtient son doctorat en 1924 en co-direction avec Svedberg et Louis Kahlenberg qui a étudié avec Wilhelm Ostwald à Leipzig avant d'enseigner la physico-chimie à Madison. *Fellow* (c'est-à-dire boursier) du Conseil National de la Recherche, il s'oriente ensuite sur l'étude microstructurale de la gélatine. Le Conseil National de la Recherche (*National*

⁵¹ Pour la biographie de Kraemer, voir Nichols & Sanigar, « Dr. E.O. Kraemer », *op. cit.* ; pour l'enseignement de la physico-chimie à Madison, voir SERVOS, *Physical-Chemistry from Ostwald to Pauling*, *op. cit.*, p. 372 fn. 115 ; la diffusion de la chimie colloïdale comme filière d'enseignement parmi les universités américaines est abordée dans EDE, *Rise and Decline of Colloid Science in North-America*, *op. cit.* pp. 78-82

Research Council), organe d'interface entre l'univers de la recherche et le gouvernement fédéral, cherche alors à promouvoir la chimie colloïdale. Ces recherches sur la gélatine lui donnent l'occasion de participer et de présenter ses travaux aux symposiums nationaux sur les colloïdes à partir de 1924. Reconnu au niveau national dans le domaine de la chimie colloïdale alors en phase de maturation aux Etats-Unis, Kraemer est nommé professeur assistant en 1925 au département de chimie de l'université de Wisconsin pour enseigner la chimie colloïdale. Mais c'est aussi probablement à l'occasion de ces symposiums qu'il rencontre un responsable du département de Chimie de Du Pont, la compagnie commençant à concevoir certains de ses produits phares comme « colloïdaux » (cf. chapitre 3). Dans l'exposé de son programme « fondamental » début 1927 au comité exécutif, Stine mentionne la participation du département de Chimie à ces symposiums ; un participant au symposium de 1923 se souvient que « même si ce symposium a eu lieu sur un campus universitaire, il constituait un mélange heureux de science académique et industrielle »⁵². Aussi peu de temps après sa nomination à l'université de Wisconsin en 1925, Kraemer est engagé comme consultant chez Du Pont, et en 1927 il quitte définitivement Madison pour rejoindre Du Pont et y fonder le « groupe des colloïdes » du programme de Stine au sein du département de Chimie.

Bien que devenu chercheur industriel, Kraemer est resté engagé dans une activité éditoriale et de publication conséquente. C'est vers lui que Hugh Taylor se tourne lorsqu'il travaille sur une somme en physico-chimie (*Treatise of Physical Chemistry*) afin d'écrire le chapitre sur les colloïdes, somme qui sera éditée au cours des années 1930. C'est vers lui également que se tourne le Conseil National de la Recherche pour réaliser la section colloïdes des *Annual Survey of American Chemistry* pour les années 1931 et 1932. Dès le début des années 1930 Kraemer est une référence incontournable dans la chimie colloïdale américaine. Sa plume est fluide et prolixe, ses vues larges et souvent percutantes ; la longueur de sa correspondance interne détonne parmi les écrits qui s'échangent habituellement entre ses collègues de Du Pont, qui vont généralement à l'économie. Lorsque le groupe des colloïdes s'engage dans le « *crash program* » sur le nylon à partir du milieu des années 1930, Kraemer écrit longuement au responsable de ce programme pour le département de Chimie, Crawford Greenewalt, afin de lui exposer les stratégies scientifiques les plus prometteuses pour le développement des fibres textiles synthétiques, et l'état d'avancement du groupe des colloïdes dans ce programme. En phase avec l'évolution récente du département de Chimie privilégiant l'« aspect physique » des substances et la discipline associée (cf. chapitre précédent), Kraemer considère que la maîtrise des fibres synthétiques ne pourra se réaliser qu'à travers une refonte en profondeur des pratiques du chimiste et de la compréhension des substances qui encadre généralement celles-ci :

Le chimiste a tendance à supposer que les propriétés d'un matériau à une température et une pression données sont déterminées uniquement par sa nature et composition

⁵² Lloyd H. REYERSON, « Early History of the National Colloid Symposium », in Milton KERKER (ed.), *Proceedings of the International Conference on Colloids and Surfaces*, New York, Academic Press, 1976, p. xxxv

chimique. Bien que ceci soit généralement correct pour les gaz et les liquides simples, très fréquemment cela n'est pas vrai pour les solides. Le métallurgiste a depuis longtemps pris en considération ce fait pour contrôler les propriétés mécaniques des matériaux à structure métallique par un traitement thermique et mécanique approprié, n'affectant pas la composition chimique. Il est bien connu que ces traitements exercent leur influence en affectant la *structure physique* [« *physical structure* »], c'est-à-dire, *la taille, le nombre, la forme et l'arrangement des cristaux et des composantes non-cristallines du métal*. Les solides organiques, en particulier les matériaux à haut poids moléculaire, dénotent un degré de dépendance similaire, peut-être même encore plus marqué, des propriétés physiques et mécaniques vis-à-vis de la structure physique.⁵³

Kraemer met ici en mots la rupture introduite par la chimie colloïdale comme mode d'appréhension des substances, en opposition particulièrement à la chimie organique, qui domine la chimie académique jusqu'au début du XX^e siècle. Il rappelle simplement que la façon dont les parties s'organisent est parfois aussi importante, pour le comportement de la substance constituée de ces parties, que leur nature en termes d'éléments chimiques. Ceci nous paraît aller de soi mais a en réalité constitué un point aveugle, un impensé de la chimie organique du XIX^e siècle. En privilégiant la détermination de la « structure physique » – plutôt que la composition chimique – comme ambition scientifique du programme sur les fibres synthétiques, ce virage microstructural s'inscrit consciemment dans les priorités de recherche de Kraemer et se manifeste délibérément dans son action au sein de la compagnie. Inlassablement ses mémos déclinent ces idées en s'adaptant à son interlocuteur, en ajoutant que cette approche fondée sur la structure physique est une des étapes clés pour un développement « rationnel » des procédés (cf. section suivante).

Également au cours des lignes exposées ci-dessus, Kraemer rappelle que la métallurgie a été un secteur pionnier dans l'appréhension des microstructures. Comme introduit dans le chapitre 1, le rôle de la chimie académique est dans un premier temps mineur – voir nul – dans le tournant « microstructural » qui gagne en profondeur la métallurgie à partir de la fin du XIX^e siècle. Les pionniers de l'examen microscopique des alliages ne sont pas des chimistes universitaires réputés, mais des praticiens de la métallurgie voire parfois des savants initialement exogènes aux élites industrielles et académiques, animés par leur seule curiosité comme Henry Clifton Sorby (1826-1908). La référence à la métallurgie – dans un mémo destiné à un responsable d'un programme sur le nylon ! – témoigne de l'ouverture de Kraemer aux autres domaines industriels, et surtout de sa capacité à saisir et à exprimer la rupture qui a bouleversé la métallurgie au cours des quelques décennies qui précèdent et que Kraemer perçoit comme en phase de gagner la chimie *mainstream*. Passionné par l'histoire de la chimie, Kraemer a collectionné les ouvrages du XIX^e siècle, voire antérieurs, qui ont eu trait aux substances colloïdales avant que le mot ne fût inventé. Faraday a été pour lui une figure particulièrement marquante, et il a ainsi donné un deuxième prénom à un de ses fils en son honneur, Herbert Faraday (Kraemer). C'est sans doute ce réel intérêt pour l'histoire de sa

⁵³ Mémorandum, Kraemer à Greenewalt, « Influence of orientation and crystallinity on the physical properties of fibers, films and plastics », 12 décembre 1934, emphase ajoutée, JBN 1/Cellulose research

discipline, au-delà du superficiel et des idées toutes faites véhiculées dans les introductions des manuels, qui lui a permis de saisir l'ampleur de la rupture dans laquelle la chimie colloïdale s'est trouvée engagée vis-à-vis de la chimie du XIX^e siècle.

Avec le recul des décennies qui s'offre à l'historien, il est facile de constater que celui-ci a fait plus que saisir cette évolution de la chimie dans ses rapports aux micro-mondes. Toute prise de conscience d'une évolution profonde d'un domaine qui détermine son appartenance professionnelle s'accompagne inéluctablement d'un jugement et d'une prise de position vis-à-vis de celle-ci. Les acteurs peuvent mobiliser leur pouvoir au sein des institutions ou leur influence parmi la communauté scientifique large pour appuyer et propager cette évolution, ou émettre certaines réserves et tenter d'en infléchir la trajectoire, voire parfois s'y opposer frontalement. Comme le notera Nichols déjà au sortir de la guerre (cf. citation ci-dessus), Kraemer est un ardent promoteur de cette évolution en mettant l'emphase sur la quantification dans la recherche en chimie colloïdale, ce qui l'a opposé indirectement à une figure comme Bancroft. Car le mouvement que nous décrivons ici du « réductionnisme microstructural » est sans doute congruent, voire identique, avec ce que l'historien John Servos, alors qu'il analyse la marginalisation scientifique de Bancroft au cours des années 1920, décrit comme le « triomphe de la tradition physicaliste »⁵⁴. Servos en effet replace les luttes de personnes et institutionnelles sur le contrôle du *Journal of Physical Chemistry*, édité depuis 1898 par Bancroft, dans le contexte d'opinions divergentes sur la nature de la chimie et son autonomie vis-à-vis de la physique (cf. chapitre précédent). Deux « traditions » seraient en gestation dans le courant de la physico-chimie depuis son institutionnalisation dans les deux dernières décennies du XIX^e siècle en Allemagne : la physicaliste, encline à s'ouvrir radicalement à la physique et à se concevoir comme « entre-deux » entre la physique et la chimie ; et la tradition d'obédience chimique, qui concevrait la physico-chimie comme une composante endogène à la chimie, et qui d'une façon générale perçoit la chimie et la physique comme deux disciplines dont l'évolution sont indépendantes l'une de l'autre. Dans cette acception, le putsch visant à retirer Bancroft de contrôle du *Journal of Physical Chemistry* en 1932, et la naissance du *Journal of Chemical Physics* peu après, s'interprète comme l'avènement de la tradition physicaliste⁵⁵.

Ce n'est donc peut-être pas un hasard si Kraemer est éditeur assistant de ce dernier journal alors qu'il paraît en 1933. Se focalisant sur la « structure physique » et délaissant la composition chimique comme paramètre explicatif principal, Kraemer est sans aucun doute à rattacher à la branche physicaliste du cadre interprétatif de Servos. L'ouverture radicale de la chimie à la physique, prônée par les acteurs du putsch sur le *Journal of Physical Chemistry*, ou les grands chimistes américains qui l'ont approuvé (Lewis, Noyes, Pauling...), se retrouve

⁵⁴ J.W. SERVOS, « A disciplinary program that failed : Wilder D. Bancroft and the Journal of Physical Chemistry, 1898-1933 », *Isis*, vol. 73 (1982), pp. 207-232

⁵⁵ Alors que Kraemer a conscience du virage que la chimie est en train de prendre, cela semble dans l'action rester inaperçu par un acteur comme Kenney. Selon lui le lancement du *Journal of Chemical Physics* qui vient compléter le *Journal of Physical Chemistry* – lancement qui traduit des évolutions scientifiques profondes – lui semble « totalement superflu et refléter une manœuvre politique » (Kenney à Bengner, « Conference on industrial physics », 26 novembre 1934, GDP 1/policies and procedures)

également dans le groupe des colloïdes. Dès 1929 par exemple, un physicien vient compléter les rangs du groupe : John B. Miles Jr., formé au département de physique de Princeton et spécialiste des matériaux diélectriques. Comme abordé au chapitre précédent, physique et instrumentation de pointe sont alors, aux yeux de ces acteurs, inextricablement mêlées. Aussi la nécessité de quantifier les phénomènes et microstructures revendiquée par Kraemer et à laquelle Bancroft s'est toujours opposé, est également caractéristique de cette tradition physicaliste. Victor Cofman, chimiste spécialiste des colloïdes embauché par Du Pont peu avant Kraemer, se rapproche ici de la position de Bancroft : sommé par Bradshaw de commenter le programme proposé par Kraemer pour le groupe des colloïdes en gestation, Cofman reconnaît que ce programme recouvre le sien, ce qui n'est pas en soi problématique, car « il est bon qu'un problème soit attaqué à partir d'angles différents » :

Dr. Kraemer, selon moi, aime à travailler avec des appareils quelque peu compliqués ou conçus spécifiquement, ainsi que tirer ses conclusions à partir d'un grand nombre de données précisément déterminées. Ma préférence est de mener quelques expériences simples afin de prouver ou d'infirmer une hypothèse. [...] Pour ce faire, les expériences sont dans un premier temps qualitatives ou semi-quantitatives et l'appareillage requis est généralement très simple. Ces deux méthodes – la méthode analytique [celle de Kraemer] et la méthode synthétique [Cofman] – ne s'excluent pas mutuellement, et il n'y a pas de raison de ne pas les poursuivre en parallèle.⁵⁶

L'analyse fine des échanges qui ont lieu au sein du groupe des colloïdes permet d'affirmer d'une part que le réductionnisme microstructural ne se confond pas nécessairement avec l'approche quantitative et instrumentale préconisée par Kraemer, et d'autre part que les apprentissages ou influences entre physiciens et chimistes ont lieu dans les deux sens. L'ouverture que la chimie réalise envers la physique dans l'entre-deux guerres est également une ouverture de la physique à la chimie, même si cet aspect a été moins étudié. Car Kraemer performe sur la pensée des membres de son équipe, et en particulier celle du physicien Miles. L'influence de Kraemer sur Miles est manifeste dans l'élaboration d'un programme « fondamental » de recherche sur la plasticité, co-élaboré par le groupe des colloïdes et la compagnie Arlington au cours des années 1930. Cette compagnie a été achetée par Du Pont en 1915 et produit du celluloïd, un film plastique composé de nitrate de cellulose et de camphre, souvent considéré comme la première matière plastique artificielle. Arlington devient formellement le département industriel des Plastiques en 1936.

En mars 1931, le comité en physique du département de Chimie – dont Miles, en tant que physicien, est membre – s'est réuni avec des représentants de la compagnie Arlington afin de « discuter d'une façon générale d'un programme pour l'étude fondamentale des propriétés physiques des plastiques »⁵⁷. L'étude de la plasticité, *via* les propriétés physiques, concernent la résistance et le comportement du celluloïd soumis aux contraintes mécaniques de torsion, d'élongation... ainsi qu'aux contraintes thermiques et en particulier les propriétés

⁵⁶ Mémorandum, Cofman à Bradshaw, 21 mai 1927, CRD 21/Fundamental Research 1926-1931

⁵⁷ Mémorandum, Miles à Kraemer, « Proposed study of mechanical properties of organo-solides », 29 avril 1931, GDP 11/Physics committee 1930-1932

d'inflammabilité et de température de fusion qui sont techniquement et commercialement essentielles. Miles cependant ne précise à aucun moment ce qui fait que l'étude qu'il propose sur la plasticité est « fondamentale » dans sa nature, ce qui la différencie d'une étude « appliquée ». Peut-être la focalisation sur les propriétés physiques et mécaniques des matériaux plastiques, plutôt que sur les propriétés chimiques, est-elle suffisante à ses yeux pour justifier le prestigieux adjectif « fondamental ». Quelques mois plus tard, Kraemer répond à cette proposition dans un mémorandum destiné à l'ensemble du groupe des colloïdes, qui s'attache à clarifier ce que « fondamental », pour une étude sur la plasticité, signifie selon lui ; signification plus précise que la conflation opérée par Miles entre fondamental et propriétés physiques et mécaniques⁵⁸.

Ainsi, pour aborder la plasticité selon Kraemer, le « fondamental » se décline selon deux questionnements majeurs, clairement séparables mais interdépendants. Il y a d'une part l'« agencement » (« *agency* ») entre les différents paramètres expérimentaux et du *process* tels que la composition, la température, la pression... et les propriétés de plasticité du matériau étudié. Le critère permettant de distinguer les études fondamentales du reste est que la compréhension de cet *agency* entre les paramètres et la plasticité doit s'exprimer à travers « un traitement mathématique rigoureux », c'est-à-dire la détermination aussi univoque que possible des propriétés et paramètres étudiés, leur quantification, et l'élaboration de systèmes d'équations pour décrire leur interdépendance. Ce traitement mathématique de la plasticité précède le second questionnement qui concerne « l'interprétation moléculaire du phénomène de plasticité ». C'est ce second aspect du « fondamental », selon la compréhension que Kraemer donne à cet adjectif, qui relève pleinement du réductionnisme microstructural :

Dans le second problème, toute technique impliquant la structure fine de la matière, de même que les données quantitatives relatives à la plasticité, peuvent être mobilisées pour élaborer des inférences à propos de la structure fine des plastiques, ainsi que des constructions ou des modèles visant à illustrer *comment les propriétés moléculaires engendrent la macroplasticité*. [...] Le premier problème relève de la macromécanique, le second de la micromécanique. Le premier est tout à fait concevable sans aucune connaissance de la structure ultramicroscopique des corps « plastiques ».⁵⁹

La relation entre ces deux acceptions de ce qui constitue le fondamental selon Kraemer pour la recherche sur les matériaux plastiques est organique : l'approche « macromécanique » fournit une base descriptive que l'approche « micromécanique » cherche à interpréter. Le réductionnisme – ici la recherche systématique d'inférences entre structure ultramicroscopique et « macroplasticité » – est un mode d'explication du comportement des matériaux, son moteur est la causalité. Il vise à expliquer le macro par la mobilisation des micro-mondes. Il se distingue en cela de l'approche « macromécanique », dont le moteur est

⁵⁸ Mémorandum, Kraemer for file, « Fundamental study of plasticity and plasticizers », 4 août 1931, CRD 21/Fundamental research 1926-1931

⁵⁹ *Ibid.*, emphase ajoutée

descriptif, phénoménologique⁶⁰. Néanmoins cette interprétation moléculaire ne peut s'épanouir que lorsque l'approche phénoménologique s'inscrit dans une démarche quantitative, mathématisable. La détermination précise des microstructures n'est techniquement efficace qu'à partir du moment où ce que les chimistes ou chercheurs « appliqués » entendent par « propriétés » est quantifiable et quantifié. D'où la demande persistante du groupe des colloïdes vis-à-vis de leurs interlocuteurs spécialistes d'un matériau ou d'un procédé spécifique d'« objectiver » les propriétés que ceux-ci estiment essentielles pour le produit ou le procédé, ce qui sera détaillé pour le cas des pigments aux chapitres suivants. L'ambitieuse quête industrielle de maîtrise technique et de standardisation des produits et des procédés fait converger réductionnisme microstructural et objectivation, mathématisation des phénomènes. Les préférences de Kraemer vont à la seconde approche, et lorsque les grands programmes sur les polymères sont initiés au milieu des années 1930, entre-temps Miles s'est aligné sur cette problématique et sur cette conception du « fondamental ». « L'étude qui m'attire le plus », affirme Miles après avoir rencontré divers responsables du département de Chimie et de la Rayonne en charge du développement des fibres textiles, « est la très large et ambitieuse recherche visant à établir les relations entre les propriétés mécaniques des solides aux longues chaînes polymériques [dont les fibres textiles] et leur structure submicroscopique incluant le degré de polymérisation, l'orientation et la cristallinité »⁶¹. Ces considérations sont absentes du programme que ce dernier a ébauché début 1931.

⁶⁰ Ces deux approches structurent l'appropriation d'un problème scientifique dans bien d'autres domaines. Une étude détaillée de leur imbrication historique dans le cas de la piézoélectricité a été réalisée par Shaul KATZIR, « From explanation to description : molecular and phenomenological theories of piezoelectricity », *Historical Studies of Physical Sciences*, vol. 34 (2000), pp. 69-94 ; comme l'indique le titre de l'étude, la chronologie entre approche descriptive et interprétative, par rapport à celle de Kraemer sur la plasticité, est renversée dans ce cas.

⁶¹ Mémoire, Miles à Kraemer, Bengert et Bradshaw, « Fundamental research on the mechanical properties of linear polymers », 21 août 1934, CRD 21/Fundamental Research 1932-1934



Figure 5.3 — Portrait de Elmer O. Kraemer

Source : notice wikipédia de Kraemer, consultée le 30 mars 2010. Tragiquement, Kraemer est décédé d'une hémorragie cérébrale en septembre 1943, à l'âge de 45 ans

Le réductionnisme comme vecteur de « rationalisation » – des pigments aux fibres textiles

L'entre-deux guerres est une période de forte croissance industrielle et économique des fibres textiles artificielles comme la viscose, que Du Pont commercialise à partir de 1921 et que ses ingénieurs et agents marketing et commerciaux nomment « rayonne » (*rayon*) en 1924. La viscose est un dérivé de la cellulose ; extraite d'essences végétales, la cellulose est dissoute dans des solvants puissants, la solution visqueuse obtenue est extrudée à travers une filière avant d'être coagulée pour obtenir le filament de viscose. L'usine qui fabrique la rayonne est construite à Buffalo dans l'état de New York, et le principal laboratoire de Du Pont sur les fibres textiles est également implanté à proximité de l'usine en 1924. Au cours des années 1920, la rayonne devient progressivement perçue par les consommateurs – sous l'action d'un marketing efficace des compagnies comme Du Pont – comme une « soie artificielle », et son essor industriel au cours de cette période traduit la mutation de ses usages. Avant la Grande Guerre, la viscose – inventée et commercialisée au cours des années 1880 – s'insère dans des marchés minuscules comme substitut à la soie ou au coton pour quelques pièces de confection mineures comme les rubans. Progressivement, au sortir de la Grande Guerre, la conjonction de nouveaux critères de mode, des goûts des grands couturiers envers les fibres artificielles, et de facteurs techniques permettant de maîtriser le lustre de ces fibres, va faire de la rayonne

une fibre courante pour les robes et autres textiles de grande consommation. En 1908 la production mondiale de viscose (alors limitée à la France, l'Allemagne et l'Angleterre) est de 4000 tonnes. En 1919, tandis que les premières usines apparaissent aux États-Unis, ce chiffre s'élève à 11 000 tonnes. Dix ans plus tard la production mondiale est de 197 000 tonnes. La production mondiale des fibres artificielles dépasse celle de la laine à partir de 1933⁶². Quelques années plus tard le nylon, première fibre textile synthétique⁶³ commercialisée à partir de 1939, va faire la fortune de Du Pont dans l'après-guerre, et se poser en modèle de recherche et développement visant à marier croissance industrielle à long terme et recherche fondamentale.

Le nylon est effectivement un produit du programme de chimie organique « fondamental » de Carothers. L'horizon des recherches du groupe de Carothers est initialement la controverse qui anime la chimie organique académique sur l'existence et la nature des « macromolécules » ; l'ambition est d'étudier les réactions de polymérisation, c'est-à-dire la formation des longues chaînes moléculaires, et d'essayer de synthétiser un polymère le plus large possible. En 1930 un membre du groupe de Carothers extrait de ses tubes à essai contenant un polymère fondu (issu de la polymérisation entre un acide carboxylique et un dialcool) une pâte visqueuse pouvant être étirée, et solidifiée en fibre lorsque refroidie. Sous la pression de Bolton et le positionnement stratégique de Du Pont dans le secteur des fibres textiles, la découverte de nouvelles fibres synthétiques – c'est-à-dire non-cellulosiques – potentiellement utilisables dans les textiles, va rapidement constituer les objectifs du groupe de Carothers. Le nylon, polymère de diacide carboxylique et de diamine, est découvert en 1934 et semble à même de remplir les critères techniques et esthétiques en vue d'une utilisation commerciale comme fibre textile. Très rapidement un « *crash program* » est amorcé entre le département de Chimie et le département de la Rayonne afin de mettre sur le marché les fibres nylon le plus rapidement possible. Comme abordé par la suite, ce programme mobilise une grande partie des ressources du département de Chimie, dont le groupe des colloïdes, ainsi que celles du département de la Rayonne. Les premiers « bas nylon » sont commercialisés en 1940, et l'immense succès commercial des fibres synthétiques va marginaliser au cours des années 1950 les fibres de viscose⁶⁴.

⁶² Ludwig F. HABER, *The Chemical Industry 1900-1930*, London, Oxford University Press, 1971, p. 5 ; voir aussi H.&S. pp. 161-165

⁶³ Techniquement, les chimistes et ingénieurs ont différencié les fibres textiles « naturelles » (la soie, le coton, la laine...) des fibres « artificielles » (ou « *man-made* »), principalement la viscose... qui sont des dérivées de la cellulose. La fabrication des fibres artificielles requiert des procédés chimiques élaborés pour transformer la matière première cellulosique en fibre, à l'inverse des fibres naturelles. L'invention du nylon a généré la catégorie de fibre « synthétique », car celles-ci s'affranchissent de la cellulose comme matière première principale, étant fabriquées, comme le décrit parfois leur slogan publicitaire, « uniquement à partir de charbon, d'air et d'eau ».

⁶⁴ H&S aborde en détail l'ensemble des étapes de l'invention et du développement du nylon chez Du Pont, et les liens avec le département de la Rayonne dans de nombreux chapitres, ce qui rend difficile toute vision globale et lecture synthétique de cet épisode. Voir les chapitres 8, 9, 12, 13 et 18. Par contraste le récit de NDIAYE, *Du nylon et des bombes*, *op. cit.*, est plus condensé et permet une lecture plus globale, voir le chapitre 3 : « De l'ammoniac au nylon : techniques et carrières »

L'invention du nylon a très vite atteint le statut de mythe parmi les acteurs de Du Pont, qui ont attribué à l'évènement la dimension d'une nouvelle ère dans l'histoire de la chimie industrielle. Carothers a été placé au cœur du récit fondateur qui a associé recherche fondamentale et innovation radicale dans un lien causal aussi solide que du béton. Ces récits fondateurs se sont diffusés également dans l'historiographie, et certains historiens de l'économie en particulier, reprenant le récit du nylon et de Carothers, ont eu tendance à appréhender les fibres textiles artificielles et synthétiques comme des phases distinctes de l'expansion de l'industrie chimique⁶⁵. En regardant de plus près l'histoire des fibres textiles au sein de Du Pont cependant, le développement des fibres synthétiques et artificielles semble avoir procédé de la même phase qui débute à la fin des années 1920. Techniquement et organisationnellement, le recouvrement entre la rayonne et le nylon est important, et cette dernière fibre n'aurait pas été un succès industriel et commercial aussi rapide et aussi massif sans les grands programmes sur les fibres artificielles initiés par Du Pont au cours des années 1920, ou sans l'expertise développée au sein de la compagnie sur la chimie des hautes pressions. La découverte de nouvelles fibres textiles n'est absolument pas une priorité initiale du programme de Carothers ; l'invention du nylon relève, comme le décrit un concept à la mode de nos jours, de la « sérendipité », ce qui est manifeste dans le récit que Carothers en fait quelques années plus tard, parfaitement exprimé dans sa citation exposée en conclusion du chapitre précédent. Au tournant des années 1930, les responsables du département de Chimie et de la Rayonne comptent sur d'autres sources que la « recherche fondamentale » pour assurer l'innovation radicale.

Car parallèlement à l'inflexion du programme de Stine de 1927, le département de la Rayonne repense au même moment ses stratégies de recherche et se dote de son propre programme pour assurer de nouveaux débouchés aux dérivés de la cellulose, voire le développement de fibres radicalement nouvelles ; programme que Bengert, alors directeur de la division technique du département, nomme recherche « pionnière » (« *pioneering research* »). Hale Charch, qui instaure le laboratoire de « recherche pionnière » au sein de cette division en 1928 et jouera un rôle majeur dans le développement du nylon, conçoit cette recherche pionnière comme « n'importe quel type de travail expérimental ou de recherche orienté par le développement d'un type radicalement nouveau de cellophane ou d'un cellophane ordinaire par un procédé radicalement nouveau »⁶⁶. Ainsi, au début des années 1930, Charch concevait son laboratoire comme le lieu idoine à la recherche et à la découverte de nouvelles fibres, et en particulier des fibres non-cellulosiques, mais le directeur du département de la Rayonne s'est opposé à ce que de telles recherches soient menées en son sein⁶⁷. Ce qui laissera la latitude au département de Chimie de développer les nouvelles fibres synthétiques, non-cellulosiques, dans une division du travail qui commence en 1934 entre ce département et celui de la Rayonne. Aux yeux de ces deux acteurs cependant, il n'est pas du

⁶⁵ Vivien WALSH, « Invention and innovation in the chemical industry : demand-pull or discovery-push ? », *Research Policy*, vol. 13 (1984), pp. 211-234 ; Basil ACHILLADELIS *et. al.*, « The dynamics of technological innovation : the case of the chemical industry », *Research Policy*, vol. 19 (1990), pp. 1-34

⁶⁶ Cité par Bengert à J.E. Hatt, 18 juillet 1928, DPF 2/Rayon, 1927-1928

⁶⁷ H&S, p. 181-2

tout évident, au tournant des années 1930, que le département de Chimie, et en particulier son programme fondamental, soit le moteur des innovations dans le secteur des fibres, tant du point de vue des nouvelles fibres que des procédés de fabrication. Mais cette absence de lien évident et exclusif entre recherche fondamentale et innovation radicale n'a pas empêché les deux départements de tisser des liens organiques. Les deux approches délimitées par Kraemer – micromécanique et macromécanique – pour « rationaliser » l'étude des dérivés de la cellulose, et plus tard des matériaux polymères synthétiques, trouvent progressivement leur place au sein de la stratégie ambitieuse et tout azimut de développement et de commercialisation des fibres textiles artificielles que Du Pont met en œuvre au tournant des années 1930, ambitionnant rien moins que se positionner en leader mondial de ces fibres textiles.

La décennie des années 1930 voit le renforcement des tendances en gestation à la production et à la consommation à grande échelle des produits manufacturés destinés au grand public comme les cosmétiques, les produits pharmaceutiques, l'équipement électroménager, l'automobile... et, bien évidemment, les textiles. C'est au cours de cette période que l'expression « société de consommation » commence à décrire adéquatement les réalités sociales. Le contexte est favorable à la diffusion massive du nylon, comme l'exprime l'historien Pap Ndiaye dans son étude sur Du Pont : « le concept de consommation de masse [est placé] au centre de la pensée économique »⁶⁸. Le consommateur et ses préférences, ses déceptions et ses modes de séduction deviennent des paramètres essentiels au succès des filières industrielles qui ciblent ces marchés « de masse ». « La science, la conception [des produits] et la culture populaire commencent à fusionner », affirme Susannah Handley dans son étude sur le nylon et les mouvements de mode⁶⁹. En plaçant la consommation de masse au centre de la pensée économique, le consommateur acquiert une ébauche de souveraineté pour statuer sur ce qui constitue un « bon » et un « mauvais » produit.

Le développement des fibres textiles artificielles et synthétiques porte la marque du consommateur dans la trajectoire technique de ces produits. Car les ingénieurs et les chimistes de Du Pont n'ont pas ou plus la légitimité exclusive pour statuer sur la qualité des produits qu'ils vendent ; une bonne fibre est une fibre qui se vend bien, quoi qu'en pensent ces ingénieurs sur sa qualité « intrinsèque ». Aussi les concepteurs des fibres du département de la Rayonne, au cours des années 1930, travaillent en permanence avec les responsables des ventes pour sonder la disposition des consommateurs vis-à-vis des fibres commercialisées. A.S. Stuart, chimiste spécialiste des colloïdes et embauché au laboratoire du département de la Rayonne en 1928, affirme qu'une « conscience textile » est à promouvoir au sein du laboratoire car cette conscience permettra de « de reconnaître les propriétés désirables dans les fibres textiles existantes afin d'être en position de spécifier intelligemment ces propriétés

⁶⁸ NDIAYE, *Du nylon et des bombes*, op. cit., p. 190

⁶⁹ « *Science, design and popular culture began to merge* », S. HANDLEY, *Nylon : the story of a fashion revolution*, Baltimore (MD), Johns Hopkins University Press, 1999, p. 62

qui devraient être intégrées dans les nouveaux développements textiles »⁷⁰. Une des façons de faire émerger cette « *textile consciousness* » est de mieux rester au fait des goûts des consommateurs :

Alors que nous avons appris beaucoup à l'école de l'expérience pratique, une compréhension fondamentale [« *basic* »] des limites et des succès de la rayonne et des autres filaments textiles dans les diverses opérations associées n'a pas été acquise. L'année précédente, notre service de vente a collecté des informations essentielles pour cerner les atouts spécifiques et les faiblesses patentes des nombreuses déclinaisons de rayonne que nous commercialisons au sein de différentes constructions et fabriques diverses. Ces informations devraient être corrélées et attribuées avec les propriétés physiques que les fibres utilisées actuellement, et celles encore à développer, possèdent. C'est grâce à cet effort que nous pourrions comprendre ce qui est nécessaire [propriétés des fibres] et ce que nous devrions chercher à atteindre. L'ère de la focalisation sur la qualité arrive à grands pas⁷¹.

Cette nouvelle ère de la qualité nécessite bien évidemment d'autres structures que la seule interface Du Pont-clients, et les laboratoires gouvernementaux comme le Bureau des Normes (*Bureau of Standards*), celui du ministère de l'économie agricole (*U.S. Dpt. of Agricultural Economics*) sont des relais puissants entre les fabricants de fibres et le grand public consommateur. Selon Stuart, ces laboratoires gouvernementaux « sont en train d'éduquer rapidement les consommateurs à exiger la qualité de leurs divers achats textiles ». En conséquence, les tests de ces laboratoires s'alignent sur les propriétés des fibres qui paraissent essentielles au regard de l'usage qu'en ont les consommateurs. Le laboratoire du département de la Rayonne – le *Pioneering Research Lab* – s'adapte alors au rôle accru de ces nouveaux interlocuteurs gouvernementaux et à leur inclinaison vers la satisfaction du grand public consommateur. La vocation des laboratoires du département de la Rayonne est ainsi bouleversée par cet avènement de la consommation de masse des fibres textiles : de l'assimilation des procédés de production de la viscose et de la recherche de nouvelles fibres, le *Pioneering Research Lab* doit à présent également classer les propriétés physiques des fibres et systématiser les tests comparatifs afin de pouvoir interpréter les préférences des consommateurs en des termes qui font sens techniquement et scientifiquement. Cette classification des propriétés et rationalisation des tests de qualité sont aussi un moyen d'arbitrer entre les conflits qui surgissent inévitablement sur la qualité d'un produit, et de s'assurer « que des revendications exagérées ne seront pas émises et que le rejet de produits finis de confection ne sera pas indûment attribué à la fibre »⁷².

Cette reconfiguration entre les producteurs de fibre, les laboratoires gouvernementaux et les consommateurs s'accompagne d'une nouvelle division du travail entre les laboratoires du département de la Chimie et ceux du département de la Rayonne. Des liens organiques se tissent alors entre la « recherche fondamentale » et le *Pioneering Research Lab*. Pour le

⁷⁰ Memorandum, A.S. Hunter, « The basic study of textile fibers », 4 mai 1934, DPF 4/Pioneering fiber study 1934

⁷¹ *Ibid.*

⁷² *Ibid.*

groupe de chimie organique le modèle linéaire de l'innovation a peut-être quelque utilité : le groupe de Carothers fournit de nouvelles fibres synthétiques que le Pioneering Lab cherche à développer. Pour le groupe des colloïdes en revanche ce modèle linéaire est totalement inadapté pour décrire la réalité des interactions entre « recherche fondamentale » et recherche « appliquée ». Le groupe des colloïdes est en effet mobilisé pour établir cette classification des propriétés physiques. L'approche « macromécanique » quantitative de Kraemer semble aux responsables du département de la Rayonne à même de répondre au besoin d'objectiver les propriétés des fibres, sous la pression de cette nouvelle « ère de la qualité » et de l'importance accrue du jugement du consommateur dans cette ère. En avril 1934 Kraemer et Miles rencontrent les principaux responsables techniques du département de la Rayonne ainsi que les responsables du département de Chimie comme Bengner et Hamilton. Il est alors décidé que le groupe des colloïdes se concentre dans un premier temps sur les propriétés d'élasticité des fibres de rayonne, et en particulier le traitement mathématique de l'élasticité⁷³. Quelques mois plus tard, Charch, qui a monté auparavant le laboratoire Pioneering et la stratégie associée sur les fibres textiles, reconnaît auprès de Miles que l'approche de son laboratoire pour statuer sur la qualité des fibres a eu tendance à être « trop arbitraire » jusqu'à présent⁷⁴. En conséquence le groupe des colloïdes améliore son insertion parmi les départements industriels, ce que reflètent les statistiques de Bolton. En 1934 les projets qui occupent ce groupe sont financés à 11% seulement par les départements industriels, le reste étant un financement sur fonds propres approprié par le département de Chimie pour la recherche fondamentale. En 1935 cependant ce ratio passe à 44%⁷⁵.

Cette attention sur les propriétés physiques est bien évidemment en adéquation avec l'évolution du département de Chimie depuis quelques années. Evolution qui s'inscrit également dans les préférences du groupe des colloïdes à étudier les propriétés physiques plutôt que chimiques des substances. Les ambitions de Kraemer à interpréter les propriétés mécaniques des substances à partir de l'état de leur microstructure se recouvrent avec celles de Hunter à objectiver les propriétés des fibres et à établir des tests permettant de comparer les performances des fibres entre elles. Ces ambitions se recouvrent mais ne se confondent pas. Kraemer cherche à lier les propriétés physiques avec ce qu'il appelle la « structure physique », c'est-à-dire la microstructure, car il est persuadé que c'est l'approche à long terme la plus efficace pour la maîtrise technique des dérivés de la cellulose comme des caoutchoucs artificiels ou des fibres synthétiques. En revanche, comprendre comment la structure physique influe sur les propriétés physiques et mécaniques n'est pas un objectif direct du Pioneering Research Lab. Des deux approches de Kraemer pour définir l'étude « fondamentale » des matériaux plastiques comme les fibres textiles – micromécanique et macromécanique –, le Pioneering Research Lab semble n'être directement intéressé que par la seconde. Miles, peu

⁷³ Mémorandum, Miles à Kraemer, « New Fibers – discussion April 10 and 11 with Messrs. Bradshaw and Hunter », 13 avril 1934, DPF 4/Pioneering Fiber Study 1934

⁷⁴ Cité par H&S, p. 259

⁷⁵ L.G. Wise and N.G. Fisher, « History, activities, and accomplishments of fundamental research in the Chemical department of the Du Pont Company 1926-1939 inclusive », 14 août 1940, p. 15, CRD 21/History fundamental research 1926-1939

après la rencontre avec les responsables technique du département de la Rayonne, estime que ces derniers montrent peu d'intérêt pour l'approche réductionniste, micromécanique :

Bien que nous pensions que le programme de Dr. Hunter tel que présenté est une partie nécessaire d'un programme général sur les nouvelles fibres, nous croyons que d'autres aspects doivent être considérés pour le succès de ce programme. Viendra un moment où il sera nécessaire de décider quel type ou types spécifique de fibres sont les plus prometteurs pour une attaque expérimentale ciblée. Pour déterminer l'attaque la plus prometteuse d'autres informations que la taille des marchés, les propriétés désirées et la traduction technique de ces propriétés sont nécessaires. [...] Nous avons aussi besoin de balises théoriques qui relient ces propriétés avec les structures microscopiques et submicroscopiques. [...] Se limiter aux mesures des propriétés des échantillons représentatifs serait sous-exploiter tous les guides que nous pourrions obtenir pour statuer sur la prochaine étape.⁷⁶

La recherche de ces balises théoriques visant à relier propriétés et structure microscopique et submicroscopique est précisément ce qui a animé le groupe des colloïdes depuis quelques années sur la cellulose et les matériaux organiques, et sur les pigments minéraux depuis un peu plus longtemps encore. Au moment où un grand programme sur les fibres synthétiques se met en place courant 1934 et réunissant le département de Chimie et celui de la Rayonne, le groupe des colloïdes a déjà tissé des liens étroits avec les autres équipes « fondamentales » et « appliquées » de ces départements ; la cellulose est le point commun entre ces équipes.

Le groupe des colloïdes a su capitaliser sur ses succès sur les pigments minéraux lorsqu'il s'est tourné de manière ambitieuse vers l'étude des matériaux organiques comme les dérivés de la cellulose par ultracentrifugeuse début 1932. A cette date les succès du groupe des colloïdes sur les pigments à travers cette technique commencent à être reconnus par l'ensemble du département de Chimie, ainsi que par le département industriel des Pigments ; Stine en particulier estime dès son rapport de 1929 que le travail de Nichols sur les relations taille de particules-propriétés optiques a jeté « une fondation pour contrôler et améliorer les pigments d'une façon rationnelle »⁷⁷. Le programme de recherche des colloïdes comporte des intérêts communs avec les autres équipes en prise sur les pigments, qui convergent vers la « rationalisation » et l'affranchissement des « méthodes empiriques » de ces équipes (cf. chapitre 7). Mais la méthodologie réductionniste du groupe des colloïdes ne se limite pas aux pigments minéraux ; la conviction que le comportement des substances est « fondamentalement » déterminé par son état microstructural transcende les grandes lignes de produits de Du Pont : c'est une conviction générale qui s'applique à l'ensemble des matériaux.

Ainsi, Nichols est très rapidement convaincu que les succès obtenus sur les pigments seront facilement reproductibles sur les matériaux organiques comme les dérivés de la

⁷⁶ Miles à Kraemer, 17 avril 1934, *op. cit.*

⁷⁷ Stine au Comité Exécutif, rapport du département de Chimie de 1929, 15 janvier 1930, CRD 16/Annual reports 1922-1929

cellulose et le caoutchouc. Sans doute ne s'attendait-il pas à ce que la route du réductionnisme soit beaucoup plus ardue dans ce cas que pour les pigments minéraux. Mi-1931 il plaide pour une large mobilisation du groupe des colloïdes sur la cellulose, modelée sur les programmes sur les pigments, c'est-à-dire en plaçant l'ultracentrifugeuse au cœur instrumental des recherches⁷⁸. L'expression générique « taille de particule » est rapidement remplacée par « poids moléculaire » (« *molecular weight* »), même si initialement les deux expressions sont utilisées de manière interchangeable. Début 1932 William D. Lansing (1902-1937) rejoint le groupe des colloïdes spécifiquement pour déterminer le poids moléculaire des échantillons de cellulose manipulés par le département de la Rayonne en utilisant l'ultracentrifugeuse. Rapidement une triangulaire s'établit entre le groupe des colloïdes, le groupe de F.C. Hahn qui se restreint à la chimie cellulosique à la Station, et la division technique du département de la Rayonne. Le groupe de Hahn étudie les relations de dégradation de la cellulose au cours des différents procédés impliqués dans son utilisation industrielle et notamment dans les fibres textiles, et s'attache à corrélérer ces dégradations avec les propriétés physiques. Armé de l'ultracentrifugeuse, le groupe des colloïdes cherche à mesurer cette dégradation en analysant le poids moléculaire de substances cellulosiques dégradées, ce qui donne une idée de leur décomposition. Le Pioneering Lab fournit les échantillons des dérivés de la cellulose à chaque étape du procédé de production des diverses fibres⁷⁹.

Au début des années 1930 la caractérisation des matériaux à haut poids moléculaire comme la cellulose est encore une gageure scientifique et l'ultracentrifugeuse en est encore à ses premiers balbutiements. L'objectif de cette triangulaire de déterminer le poids moléculaire des matériaux pris dans les diverses étapes du procédé de production de la rayonne, de corrélérer ces informations microstructurales avec les propriétés physiques des substances, et d'utiliser l'ensemble de ces informations pour performer sur les procédés et améliorer les fibres de rayonne... peut apparaître comme une ambition démesurée. Cet ambitieux objectif n'apparaît démesuré que rétrospectivement, alors que pour l'historien il est facile de constater que cette réalisation s'étale dans une temporalité beaucoup plus longue que celle initialement prévue par ces acteurs, et nécessite la mobilisation de ressources scientifiques qui dépassent même les capacités d'un groupe industriel aussi large que Du Pont. Au cours de cette période et de cette triangulaire se mêlent inextricablement les interrogations scientifiques qui animent alors la chimie organique et colloïdale (nature des macromolécules, lien entre viscosité et poids moléculaire ?) et d'ordre pratique sur l'amélioration des procédés et produits.

Dans l'immédiat cependant cette interaction entre Hahn, Kraemer, et le laboratoire du département de la Rayonne, marque une évolution importante dans l'histoire de la chimie industrielle. Pour la première fois sans doute l'influence de la « structure physique » au sens de Kraemer est *consciemment* surveillée lorsque les procédés de production sont optimisés,

⁷⁸ Mémorandum, Nichols à Kraemer, « Ultracentrifuge study of cellulose derivatives with special reference to viscose », 14 août 1931, JBN 7/Visine EOK 1929-1961

⁷⁹ Lettre, Kraemer à G.P. Hoff, 1er décembre 1930, DPF 2/Rayon 1927-1928 ; Mémorandum, Lansing à Kraemer, « The ultracentrifuge and cellulose research », 15 avril 1932, JBN 1/Cellulose research ; Lettre, F.C. Hahn à V.L. Bohson, « Fundamental research and work related to cellulose acetate and acele », 29 août 1933, *Ibid.*, Kraemer, « Quarterly reports of the colloid group, 1932-1935 », JBN 4/Quarterly reports

par exemple dans le cas de la production de la rayonne utilisée comme cordon dans les pneus. C'est en tout cas le récit qu'en fait Kraemer à Greenewalt en 1934 :

Même après des années de travaux sur les facteurs contrôlant la structure physique, la plupart du temps il est vrai sans aucune appréciation de l'importance de la structure physique, il était [encore] possible, dans un temps limité, de développer une nouvelle rayonne d'une résistance exceptionnelle sans aucune modification chimique du procédé – simplement en contrôlant les facteurs mécaniques influençant la structure physique du produit⁸⁰.

Cette méthodologie réductionniste d'amélioration des produits se diffuse sporadiquement parmi la compagnie. Par exemple le groupe des colloïdes travaille avec Carothers sur le néoprène pour tenter de corréler taille de particule de latex et résistance à l'élongation de l'échantillon de néoprène considéré. Ou encore il travaille avec le laboratoire de Buffalo pour corréler taille de particule des pigments de titane et activité « délustrante » de ces pigments insérés dans la rayonne⁸¹. Il est difficile d'appréhender l'apport technique relatif de cette approche réductionniste. Sans doute le groupe des colloïdes est davantage caractérisé – dans ce qu'il considère comme « fondamental », ce qui exclut ses activités de consulting et les projets de recherche financés par les départements industriels⁸² – par l'interprétation des phénomènes que par une action d'aide technique immédiate aux départements industriels, mis à part le département sur les Pigments. Dans un premier temps au moins, il est clair que les échanges vont majoritairement du département de la Rayonne vers le groupe des colloïdes, et non l'inverse. Ce groupe cherche à comprendre ce qui se passe « au niveau moléculaire » lors des diverses étapes de production de la rayonne. Son apport est sans doute plus immédiat à ce département alors qu'en 1934 il apparaît essentiel à ses managers de rationaliser les propriétés et les tests de qualité des fibres qu'il commercialise, c'est-à-dire les définir adéquatement et les quantifier. Mais les intérêts du Pioneering Lab ne se recouvrent que partiellement avec les intérêts scientifiques du groupe des colloïdes : mener les approches macromécanique et micromécanique de front dans l'étude des matériaux organiques comme les fibres et le caoutchouc. Comme le laisse entendre Miles, l'approche micromécanique n'a pas été encouragée par le département de la Rayonne au cours des années 1930.

Ainsi il n'est pas étonnant qu'un responsable du département de la Rayonne sur la mise en œuvre du projet sur le nylon à partir de 1934, George P. Hoff, minimise, alors que le nylon vient d'être lancé commercialement en 1940, l'apport technique et industriel de la recherche fondamentale sur la polymérisation issue des groupes de Carothers et de Kraemer. « Mais cette information n'était [jusqu'à ce que Carothers trouve les bonnes fibres de nylon et

⁸⁰ Kraemer à Greenewalt, 12 décembre 1934, *op. cit.*

⁸¹ Kraemer à Tanberg, 17 août 1932, *op. cit.*

⁸² L'apport du groupe des colloïdes au Pioneering Lab semble avoir été plus déterminant et immédiat dans leur étude de la coagulation et de la « régénération » de la viscose, c'est-à-dire la solidification du filament de cellulose. Dans cette étude ils se sont attachés à relier les variations dans les conditions de filage et de « régénération » de la viscose avec les propriétés de la fibre en fin de procédé : memorandum, T.L. Williams à Kraemer, « Program for coagulation and regeneration studies », 9 mai 1934 ; Kraemer à W.H. Bradshaw, « High-speed spinning of rayon », 3 juillet 1936, JBN 7/ Visine – EOK 1929-1961

polyamides], et tout à fait proprement, que d'un intérêt strictement académique ; c'était intéressant seulement pour les chimistes qui voulaient en savoir plus sur la façon dont la matière s'agrège à partir des blocs moléculaires minuscules »⁸³. Avant d'être enrôlé dans le projet sur le nylon, Hoff avait travaillé huit ans au département de la Rayonne sur les procédés de production de la rayonne. A partir de 1934 il sert d'intermédiaire entre le département de Chimie et celui de la Rayonne pour le développement des fibres synthétiques⁸⁴. Néanmoins les documents conservés du groupe des colloïdes et du Pioneering Lab indiquent que les interactions entre ce groupe et Hoff ont été mineures, ce qui laisse à penser que ce dernier s'est principalement consacré au groupe de Carothers. Sans doute son rôle était de sélectionner les fibres découvertes par le groupe de Carothers les plus prometteuses, et de les importer au Pioneering Lab. Ce qui expliquerait qu'il n'ait pas saisi l'ampleur scientifique et technique des programmes de recherche dans lesquels sont engagés le groupe de Carothers et de Kraemer en « coopération », visant à corrélérer microstructure des polymères avec leurs macropropriétés sur une base quantitative. Ces programmes de recherche sont tout, sauf « d'un intérêt strictement académique ».

L'affirmation de Hoff sur le caractère strictement académique, dans un premier temps, des recherches sur « les blocs moléculaires minuscules » est à la fois vraie et fausse. Elle est fausse car comme abordé ci-dessus le groupe des colloïdes conçoit ses recherches sur les macromolécules ou les particules, en particulier à travers l'ultracentrifugeuse, d'emblée comme auxiliaire à l'amélioration des produits et procédés en cours dans les départements industriels. Les exemples du néoprène et de la rayonne utilisée comme cordon dans les pneus suggèrent un apport technique tangible de cette mise en rapport des performances des matériaux avec leur microstructure. Mais ces mises en rapport restent ponctuelles et dans le cas des fibres synthétiques la tâche s'est avérée beaucoup plus ardue que pour les pigments minéraux. La caractérisation des polymères, en effet, n'est pas devenue un outil pour la recherche « appliquée » sur les fibres synthétiques aussi rapidement que la caractérisation des pigments l'a été pour les peintures. Les archives du Pioneering Lab ne suggèrent pas une assimilation routinière des méthodes de caractérisation des poids moléculaires des polymères au cours des années 1930.

Au début des années 1950 cependant, Greenewalt, qui a joué un rôle important au sein du département de Chimie sur le développement du nylon et auprès de qui Kraemer expose régulièrement l'avancement du groupe des colloïdes sur les matériaux organiques, reconnaît l'apport du réductionnisme sur les polymères. Entre-temps son ascension au sein de la compagnie – en partie grâce à son positionnement stratégique pendant la participation de Du Pont au projet Manhattan – a été fulgurante : Greenewalt devient président de Du Pont en 1948. En décembre 1952, à l'occasion du vingt-cinquième anniversaire de Nichols au sein de Du Pont, Greenewalt envoie personnellement à celui-ci quelques lignes affectueuses en souvenir de leur coopération sur le nylon :

⁸³ G.P. Hoff, « Some facts about nylon », conférence donnée au Franklin Institute de Philadelphie, 6 novembre 1940, JBN 5/nylon

⁸⁴ H&S, p. 261

Je me souviens très bien, avec une certaine nostalgie, de notre association il y a longtemps à la Station Expérimentale, alors que tu essayais de me faire comprendre, sans beaucoup de succès peut-être, les mystères de l'ultracentrifugeuse et les différentes manières de caractériser la taille des polymères. Je n'ai peut-être pas été un étudiant très intelligent, mais je me souviens toujours d'une bonne partie de tes cours. J'ai toujours été très impressionné par les nombreuses contributions que tu as apportées, avec tes associés, aux connaissances fondamentales [*basic*] sur les pigments et autres petites particules. Je suis sûr que ces connaissances se sont tissées avec [*have woven itself into*] les accomplissements en recherche appliquée dans ces domaines. Pour ceci, une grande part du mérite te revient⁸⁵.

Ce tissage des connaissances sur la nature microscopique des polymères avec les recherches appliquées sur les caoutchoucs artificiels et les fibres textiles synthétiques démarre avec l'ambitieux programme « fondamental » de Stine qui consacre la polymérisation comme thème de recherche stratégique pour Du Pont. Lorsque ce programme est ébauché en 1927 entre les managers de Du Pont, et les leaders des axes chimie organique et chimie colloïdale, les théories de Staudinger sur les macromolécules constituent une balise théorique et méthodologique primordiale pour définir les orientations de recherche de ces deux groupes. Une division du travail s'établit entre ces deux groupes pour étudier la polymérisation, qui s'inscrit dans l'histoire plus longue de la démarcation de la chimie colloïdale vis-à-vis de la chimie organique : le groupe de chimie organique est tourné vers la synthèse des polymères, et l'étude des mécanismes de polymérisation. Le groupe des colloïdes s'attache à caractériser ces polymères, c'est-à-dire à définir et mesurer leur état microstructural ; il s'attache aussi à comprendre l'agencement entre état microstructural et propriétés physiques et mécaniques des polymères.

L'historien Yasu Furukawa retrace en détail l'émergence de la controverse sur les macromolécules et le travail de Carothers au sein de Du Pont ainsi que celui de Staudinger en Allemagne. Globalement, cet auteur interprète le succès scientifique du concept de macromolécule au tournant des années 1930 comme la victoire de la « tradition » de la chimie organique sur la « vieille tradition physicaliste » qu'incarne alors la chimie colloïdale. Aussi le récit qu'il fait des travaux sur les polymères au sein de Du Pont n'accorde pas beaucoup de place au groupe des colloïdes, et tend à reléguer ce dernier dans un état de subordination et de passivité vis-à-vis du groupe de Carothers⁸⁶. L'examen approfondi des archives qui nous sont parvenues du groupe des colloïdes montre cependant que celui-ci a joué un rôle très actif dans l'émergence de cette « science » des polymères. Chez Du Pont, ces deux traditions de chimie organique et chimie colloïdale ne se conçoivent pas en affrontement l'une par rapport à

⁸⁵ Lettre, Greenewalt à Nichols, 30 décembre 1952, JBN 4/Miscellaneous 1928-1966

⁸⁶ Yasu FURUKAWA, *Inventing polymer science. Staudinger, Carothers, and the emergence of macromolecular science*, Philadelphia, University of Pennsylvania Press, 1998, pp. 128-9, 196-7 ; Cette occultation du rôle actif de la chimie colloïdale dans l'émergence d'une « science » des polymères est également caractéristique de l'étude de L.M. PRITYKIN (« The role of concepts of structure in the development of physical-chemistry of polymers », *Isis*, vol. 72 (1981), pp. 446-456)

l'autre ; au contraire, poussées par des intérêts convergents, elles collaborent intensément, au moins sur le terrain des polymères.

Particle size et molecular weight : un programme de recherche « coopératif » sur les polymères

Comme abordé au chapitre 1, la chimie organique au cours du XIX^e siècle s'est désintéressée des substances colloïdales, car il lui était difficile voire impossible de les purifier afin de leur attribuer une composition « moléculaire » définie. L'entreprise dans laquelle s'est lancé Staudinger, et à laquelle ses collègues chimistes organiciens se sont dans un premier temps vigoureusement opposés, est de prouver que pour une partie des colloïdes organiques, le concept de « molécule » est toujours adéquat pour appréhender leur complexité et rendre compte de leurs propriétés. La complexité des substances colloïdales amène toutefois Staudinger à formuler l'hypothèse que les molécules qui constituent celles-ci sont gigantesques, c'est pourquoi celui-ci propose en 1922 le terme de « macromolécule » comme concept général pour appréhender ces substances. Les chimistes organiciens résistent à Staudinger car ils sont persuadés que ces grandes molécules n'existent pas, et que les matériaux polymères sont microscopiquement constitués de l'agrégation de molécules simples en « particules » colloïdales.

Le calcul du poids moléculaire des substances comme le caoutchouc, l'amidon et la cellulose devient alors un enjeu scientifique primordial : si ce poids moléculaire est nettement supérieur au poids moléculaire des substances habituellement décrites par la chimie organique – qui est de quelques centaines au plus – alors cela signifie que les molécules qui les constituent sont composées d'un grand nombre d'atomes, et donc que l'interprétation « macromoléculaire » de Staudinger est plus adéquate que l'interprétation classique de la chimie organique qui n'y voit que des agrégats colloïdaux. Staudinger s'est ainsi familiarisé avec les théories colloïdales, et a en particulier absorbé son a priori réductionniste. Car un des angles d'attaque pour prouver l'existence des macromolécules consiste à montrer qu'il existe des relations simples entre la viscosité d'une substance et son poids moléculaire.

Armé de l'ultracentrifugeuse, la détermination de ces relations va constituer un questionnement de recherche important pour le groupe des colloïdes au cours des années 1930, et Staudinger suit les recherches qui ont lieu chez Du Pont, celles de Carothers comme celles du groupe de Kraemer⁸⁷. En 1927 cependant, lorsque que Carothers est approché par Du Pont – c'est-à-dire Bradshaw – pour rejoindre son programme « fondamental » en gestation et en particulier travailler sur la polymérisation, Carothers est déjà familier des travaux et des idées de Staudinger, qu'il affirme avoir suivi récemment⁸⁸. Cette ouverture favorable de Staudinger à la chimie colloïdale est ainsi reprise par Carothers, comme il l'exprime à Bradshaw :

⁸⁷ Allen IVEY, Jr., « Letters : more on Staudinger », *Chemical and Engineering News*, vol. 31 (23 novembre 1953), pp. 2860-2

⁸⁸ Lettres, Carothers à Bradshaw, 9 novembre 1927 et Carothers à Tanberg, 20 novembre 1927, CRD 18/Correspondence Carothers, Tanberg, Bradshaw 1927

Alors que vous étiez à Cambridge cet été vous m'avez parlé de votre intérêt pour la polymérisation. J'ai conscience de l'importance commerciale de ce sujet, car le caoutchouc, la cellulose et ses dérivés, les résines et les gommes, les protéines peuvent être considérées comme des ~~substances~~ molécules larges ou polymérisées. On en sait très peu en termes de structure sur cette classe de substances. Aucune de ces substances ne se prête facilement aux outils classiques du chimiste organicien, et sans doute les contributions les plus importantes dans ce domaine seront le fait d'experts en chimie colloïdale. Du point de vue de la chimie organique un des premiers problèmes est de déterminer quelle est la taille de ces molécules [...] ⁸⁹.

Sans doute Bradshaw a informé Carothers alors qu'ils se rencontrent à l'été 1927 de l'ambition de Stine de monter également un groupe en chimie colloïdale, ce qui est un argument supplémentaire vis-à-vis de Carothers pour rejoindre Du Pont, étant donné que celui-ci, influencé par la lecture de Staudinger, est convaincu de la complémentarité scientifique des deux approches. Effectivement dès 1928, c'est-à-dire presque immédiatement après le lancement du programme « fondamental », le groupe des colloïdes et de chimie organique initie un programme commun d'étude sur la polymérisation. Pour débiter ce programme, Nichols et Carothers écrivent l'un et l'autre un papier visant à un « effort coopératif rassemblant plusieurs aspects de la polymérisation » ⁹⁰.

Dans cet effort coopératif, Carothers définit les polymères comme « des substances dont les molécules contiennent une unité structurale récurrente », et les représente de la façon suivante : -R-R-R-R-R-R-R-R- etc. -R-, « unité structurale », est ici un radical bivalent, une molécule au poids moléculaire faible, liée à son radical bivalent voisin par des « valences primaires ». Ces unités structurales ou radicaux bivalents se soudent donc, par le biais de valences chimiques de la même nature que celle qui relie les atomes dans les molécules simples, en des molécules « mères » (« *parent molecule* »), longues chaînes constituées de la répétition d'un motif identique ou unité structurale. Cette unité structurale, pour reprendre l'expression de Carothers, « n'a pas d'existence indépendante ». Carothers signifie ici que la petite molécule ne se trouve pas à l'état libre dans les substances polymériques ; les molécules mères en revanche, assemblage de ces petites molécules, ont une existence indépendante au sein de ces substances, de la même manière que dans du vin, par exemple, les molécules d'alcool ont une existence indépendante parmi la foule d'autres molécules responsables du goût et de la couleur du vin et du solvant aqueux qui les contient.

Pratiquement, l'ambition de Carothers est de partir de ces unités structurales et de les assembler afin de réaliser des polymères synthétiques, par « polymérisation ». Il s'agit, comme il l'affirme à Tanberg en 1927 alors qu'il propose un programme de recherches pour

⁸⁹ Carothers à Bradshaw, *Ibid.* Remarquablement, « substance » a été barré et remplacé par « molécule » en écriture manuscrite comme indiqué dans la citation. Sans doute est-ce Carothers qui a effectué cette modification manuscrite.

⁹⁰ Nichols, « Researches on polymerization II. Molecular kinetic methods for the study of polymerization », 19 février 1929 & Carothers, « Researches on Polymerization I. Introduction in the general theory of condensation polymers », 24 janvier 1929, JBN 5/polymerization, 1929

le futur programme « fondamental » de Du Pont, « de synthétiser de grandes molécules »⁹¹. Comme radicaux bivalents, Carothers utilise des dialcools et des acides dicarboxyliques, des molécules dont les deux extrémités sont réactives, contrairement aux alcools et aux acides carboxyliques simples dont une seule extrémité est réactive. L'alcool réagit avec l'acide carboxylique en une réaction dite d'estérification, et fin 1929 le groupe de chimie organique parvient à obtenir de longues chaînes d'ester dont le poids moléculaire atteint 6 000. Atteignant un seuil autour de cette grandeur cependant, le groupe réalise que l'eau, sous-produit de la réaction d'estérification, est un frein à la polymérisation car elle induit l'hydrolyse (l'inactivation) des groupes réactifs des radicaux bivalents ou des extrémités des chaînes polymères. Par le biais de la « distillation moléculaire », (« *molecular still* »), le groupe de chimie organique parvient à extraire les molécules d'eau du milieu réactionnel, et obtient des molécules géantes dont le poids moléculaire dépasse les 12 000. En 1930 un membre du groupe de Carothers extrait de ses tubes à essai contenant un polymère fondu une pâte visqueuse pouvant être étirée, signe de la présence de molécules géantes en son sein⁹².

Bien que Carothers ait affirmé en 1927 que la détermination de la taille de ces molécules est essentielle à l'avancement de la chimie organique sur les substances associées, dans un premier temps c'est le groupe des colloïdes qui s'approprie ces problématiques. Cette appropriation semble naturelle aux deux parties, dans la mesure où le groupe des colloïdes dispose des savoirs théoriques et expérimentaux, ainsi que des instruments, pour progresser vers cette détermination. Car Nichols rappelle, dans ce papier coopératif, qu'« en pratique, les méthodes classiques [points de congélation, point d'ébullition] n'ont qu'une application limitée pour les substances dont le poids moléculaire dépasse le millier », et que l'ultracentrifugeuse et les méthodes par diffusion sont les seules à même de donner des résultats fiables. Nichols cependant utilise indifféremment « poids moléculaire » et « taille de particule » pour exprimer les grandeurs des entités microscopiques, ce qui traduit une vision des substances associées différente de Carothers. L'examen des dérivés de la cellulose et autres colloïdes organiques aux rayons X a occupé le laboratoire de Kenney depuis sa mise en place en 1927. Travaillant avec ce dernier, Nichols remarque que ces substances exhibent des patrons de diffraction spécifiques, ce qui témoigne de la présence de structures cristallines en leur sein. Aussi Nichols, plutôt que de s'approprier les termes « molécule mère » et « unité structurale » de Carothers, préfère employer « cristallites » pour qualifier les entités microscopiques qui engendrent les patterns de diffraction des rayons X spécifiques. Selon Nichols, le « poids moléculaire » de ces cristallites est équivalent à leur « taille ». Contrairement à Carothers cependant, la forme du cristallite est un facteur également primordial à ses yeux.

L'étude des colloïdes organiques par rayons X se répand alors également en Europe, et en particulier au conglomérat industriel IG Farben, résultant de la fusion en 1926 des plus grandes firmes de l'industrie chimique allemande. Deux chimistes employés par IG Farben pour la recherche sur les fibres textiles artificielles, Hermann Mark (1895-1992) et Kurt

⁹¹ Carothers à Tanberg, 20 novembre 1927, *op. cit.*

⁹² H&S, pp.232-50

Meyer (1883-1952), examinent à partir de 1927 les dérivés de la cellulose à l'aide des rayons X. Les spots de diffraction sont interprétés comme la présence de fines unités cristallines qu'ils qualifient de « micelles », contribuant à donner un nouvel élan, sur des nouvelles bases instrumentales et expérimentales, au concept élaboré par Nägeli à la fin du XIX^e siècle. Ces micelles sont constituées de l'agrégat de longues chaînes moléculaires ; Mark et Meyer avancent qu'une micelle de cellulose est constituée de 30 à 50 unités de glucose (C₆H₁₀O₆)⁹³. En 1928, ces chimistes d'IG Farben viennent à peine de publier leurs travaux sur la structure de la cellulose, et « micelle » est encore qualifié de « cristallite » par Nichols, tandis que Carothers, qui cite déjà les travaux de Meyer, utilise « unité structurale » pour désigner ce que Nichols et Meyer appellent « cellule élémentaire », en l'occurrence le glucose dans le cas de la cellulose.

Mais ce qui lie Nichols et ces chimistes d'IG Farben plus sûrement encore que le vocabulaire, c'est la conviction que les propriétés colloïdales sont déterminées non par la cellule élémentaire de la chaîne moléculaire, mais par la structure micellaire de la cellulose, la taille et la forme de ces micelles ou de ces cristallites :

Les trois principaux facteurs gouvernant les propriétés d'une substance polymérisée ou agrégée sont la taille, la forme et la structure de la particule élémentaire. Les propriétés les plus intéressantes sont l'élasticité, la viscosité, la solubilité, l'action colorante, la stabilité à la lumière et à la chaleur, la résistance électrique et à l'eau etc. [...] Puisque la plupart de ces propriétés dépendent du cristallite autant sinon plus que de la cellule élémentaire, il semble que la prochaine étape dans notre discussion du sujet général de la « polymérisation » devrait être l'étude du cristallite ou de l'unité cinétique moléculaire.⁹⁴

Le programme de recherche que Nichols envisage est orienté sur la détermination de l'unité cinétique, celle qui a une « existence indépendante » selon les termes de Carothers. Il importe peu aux chimistes des colloïdes comme Nichols, au fond, que ces unités cinétiques qu'ils manipulent soient des « molécules » ou des « micelles ». L'essentiel pour ceux-ci est de déterminer leur taille et leur forme, car ils sont persuadés que de ces paramètres découlent les propriétés de la substance qu'ils étudient. Mais cette prémisse est également partagée par Staudinger alors qu'il s'acharne à relier les propriétés de viscosité à la structure des colloïdes organiques, à ceci près que celui-ci ne veut pas entendre parler de l'expression « taille de particule ». Cherchant à re-légitimer les concepts de base de la chimie organique sur le territoire des colloïdes, Staudinger ne reconnaît que l'expression « poids moléculaire ». C'est en se confrontant avec les résultats expérimentaux et les concepts développés par Staudinger que le groupe des colloïdes, alors qu'il travaille sur les dérivés de la cellulose, en vient à préférer également l'expression « poids moléculaire » plutôt que « taille de particule » pour qualifier la microstructure de ces matériaux organiques.

En positionnant les fibres textiles artificielles au cœur de sa stratégie de croissance à partir de la fin des années 1920, Du Pont a contraint ses laboratoires à opérer un vaste remaniement de

⁹³ FURUKAWA, *Inventing polymer science, op. cit.*, pp. 76-81

⁹⁴ Nichols, *Researches on polymerisation II, op.cit.*

ses thématiques ; le département de Chimie s'est recentré sur la cellulose et ses dérivés, et le groupe des colloïdes en particulier en a fait un axe de travail majeur. En passe d'être embauché par Du Pont de manière permanente, Kraemer a axé son programme sur l'étude de la cellulose, notamment la préparation des émulsions de cellulose et l'étude des phénomènes d'adsorption et de gonflement des dérivés de la cellulose dans ses solvants⁹⁵. A partir de 1930 cependant, le « comportement colloïdal de la nitrocellulose » fait l'objet d'une ligne budgétaire spécifique, et absorbe les trois-quarts des dépenses du groupe⁹⁶. Un chimiste du groupe, R.G. Sears, y est affecté de manière permanente et le groupe des colloïdes se concentre sur l'étude des propriétés de viscosité des solutions cellulosiques, et des liens entre viscosité de la cellulose solvatée et propriétés de la fibre extrudée⁹⁷. Peu de temps auparavant, probablement dès 1928, Kraemer et Nichols ont commencé à citer les travaux de Staudinger sur la détermination de la viscosité des substances polymérisées. Le lien entre caractéristiques moléculaires (poids moléculaire et forme de molécule) et viscosité, auquel travaille Staudinger, permet d'interpréter les propriétés rhéologiques des substances – c'est-à-dire la façon dont elles s'écoulent – sur une base explicative nouvelle, potentiellement quantifiable et plus « scientifique ». Aussi il n'est probablement pas fortuit qu'une Société de Rhéologie s'institue en 1929, dont Kraemer en est un de ses premiers vice-présidents tandis que A.S. Hunter, du département de la Rayonne, son secrétaire. Sears et Kraemer publient, dans le *Journal of Rheology* nouvellement édité, les apports théoriques de leurs recherches sur la nitrocellulose dans lesquels ils commentent les résultats de Staudinger⁹⁸, tandis que Nichols cite Staudinger dans son papier sur la polymérisation de 1928.

Rapidement donc, l'étude des propriétés colloïdales de la nitrocellulose ouvre à un questionnement plus large sur le rapport entre viscosité et caractéristiques microstructurales ; le groupe des colloïdes, et singulièrement Kraemer, met au premier plan de ses recherches la validation expérimentale des modèles de viscosité de Staudinger. L'ultracentrifugeuse apparaît alors idoine pour tester l'affirmation que, pour les longues molécules allongées, il existe une relation linéaire entre poids moléculaire et viscosité. Se rendant compte que cette relation linéaire est approximative, et restreinte à une petite frange des substances polymérisées, Kraemer estime que ces tentatives théoriques issues des chimistes allemands sont précipitées. « Les efforts de Mark, Staudinger et bien d'autres pour estimer les poids moléculaires, la solvation, la taille et la forme des molécules à partir de la viscosité sont entrepris sans réelle base théorique » écrit Kraemer en juillet 1930 à Lars Onsager, alors au

⁹⁵ Lettre, Kraemer à Bradshaw, 9 mars 1927, CRD 21/Fundamental Research 1926-1931

⁹⁶ Les dépenses « fondamentales » du groupe des colloïdes, c'est-à-dire celles effectuées sur fonds propres, s'élèvent en 1930 à 42 000\$ (dollars courants). Le projet « *colloidal behavior of nitrocellulose* » est actif de 1930 à 1932, et coûte 29 000\$ en 1930 : « Fundamental research expenditures – years 1927-1944 », in Wise and Fisher, *History*, *op. cit.*

⁹⁷ Kraemer, « Quarterly summary reports –colloid group », Janvier-avril 1930 et avril-juillet 1930, JBN 4/Quarterly reports colloid group

⁹⁸ KRAEMER et R.V. WILLIAMSON, « Internal friction and the structure of 'solvated' colloids », *Journal of Rheology*, vol. 1 (1929), pp. 76-92 ; KRAEMER et SEARS, « The viscosity of dilute liophylic suspensions », *Ibid.*, vol. 1, n°3 (avril 1930), pp. 231-239 ; –, « Viscosity and adsorption in colloidal solutions », *Ibid.*, vol. 2 (1931), pp. 292-306

département de chimie de l'université de Brown dans le Rhode Island⁹⁹. Ce n'est bien évidemment pas pour se plaindre que Kraemer écrit à Lars Onsager (1903-1976), futur prix Nobel de chimie en 1968, mais pour lui proposer de travailler sur un traitement rigoureux de l'influence de la forme des molécules ou des particules dans les équations de viscosité. Les équations élaborées au début du siècle par Albert Einstein relient effectivement taille de particule et viscosité, mais sont restreintes au cas des particules sphériques. Pour les particules filiformes, et en particulier pour ce que Staudinger appelle les macromolécules, l'équation d'Einstein n'est plus valable.

Vers 1932, le groupe des colloïdes s'approprie le terme de Staudinger, « macromolécules », qui commence à apparaître dans les documents internes et très rapidement dans les publications¹⁰⁰. Néanmoins l'appropriation textuelle du terme de Staudinger n'est pas exactement simultanée avec l'appropriation de la théorie associée, affirmant que les dérivés de la cellulose ou d'autres substances polymérisées, naturelles ou de synthèse, sont en réalité des « dispersions moléculaires » pour utiliser le jargon de la chimie colloïdale. L'idée que ces substances sont constituées de longues chaînes moléculaires plutôt que de « micelles » ou de « particules colloïdales » a déjà fait son chemin parmi le groupe des colloïdes alors que le terme de macromolécules commence à être approprié par celui-ci. Ce n'est pas le « triomphe » de la théorie macromoléculaire au milieu des années 1930 qui a « provoqué un changement de la définition et de l'étendue des colloïdes pour les chimistes des colloïdes »¹⁰¹. Ce n'est pas non plus Carothers qui introduit le groupe des colloïdes aux théories de Staudinger ; le groupe des colloïdes est scientifiquement plus proche de Staudinger que ne l'est celui de chimie organique, malgré l'apparente proximité disciplinaire entre Carothers et Staudinger. En outre l'appropriation du point de vue de Staudinger par le groupe des colloïdes ne résulte pas uniquement d'un froid examen de critères scientifiques et de la validation d'expériences *ad hoc*. L'intégration du groupe des colloïdes dans un environnement industriel qui commercialise à grande échelle des fibres textiles artificielles semble avoir significativement affecté sa vision des dérivés de la cellulose. Concevoir ces substances comme des longues molécules semble mieux « marcher » techniquement :

L'idée essayée il y a quelques années que la cellulose est un polymère linéaire, écrit Kraemer en 1933, a bien aidé à clarifier l'interprétation des divers changements subis par la cellulose dans les opérations techniques et a fourni une fondation plus sûre pour prédire le comportement de la cellulose dans les nouvelles formulations et les nouvelles conditions¹⁰².

Lansing rejoint le groupe des colloïdes début 1932 afin d'exploiter les potentialités de l'ultracentrifugeuse comme auxiliaire de recherche pour les équipes engagées dans le

⁹⁹ Lettre, Kraemer à Lars Onsager, 29 juillet 1930, CRD 21/Fundamental research 1926-1931

¹⁰⁰ Kraemer et Lansing, « Ultracentrifugal analysis of linear macromolecules », 18 août 1932, JBN 6/UC chapter 1938 ; –, « The molecular weight of linear macromolecules by ultracentrifugal analysis I. Polymeric ω -hydroxydecanoic acid », *JACS*, vol. 55 (1933), pp. 4319-26

¹⁰¹ FURUKAWA, *op. cit.*, p. 196

¹⁰² Kraemer, « Ultracentrifugal analysis of cellulose – major experimental project n°1608 », 18 janvier 1933, JBN 1/Cellulose research

développement des fibres textiles (cf. ci-dessus). Son action, cependant, s'inscrit au croisement de la recherche « fondamentale » et « appliquée », et incline le groupe des colloïdes à collaborer davantage aussi bien avec le département de la Rayonne qu'avec le groupe de chimie organique de Carothers. Le travail de Lansing s'inscrit dans l'horizon théorique de long terme qui anime Kraemer, et à travers lui l'ensemble du groupe des colloïdes : déterminer quantitativement le poids moléculaire des substances manipulées et corrélérer quantitativement poids moléculaire et viscosité. Kraemer entend bien profiter de l'exclusivité de l'ultracentrifugeuse dont jouit le groupe qu'il dirige pour s'imposer sur cette question qui agite une prestigieuse frange de chimistes, qui n'ont pas encore accès à cet instrument. Le programme de recherche « fondamental » qu'il met en place, et dont il charge Lansing de réaliser la partie expérimentale en multipliant les essais sur ultracentrifugeuse, est de tester la validité des équations de Staudinger pour déterminer le poids moléculaire par inférence à partir de la mesure de la viscosité. La détermination du poids moléculaire par ultracentrifugeuse s'affranchit de cette procédure inférentielle, et, à l'instar de la taille des pigments, permet de déterminer plus directement la taille des molécules.

Dans un premier temps il s'agit de calibrer la méthode par ultracentrifugation en manipulant des substances dont le poids moléculaire est connu. Pour ce faire, Lansing sollicite les compétences de synthèse du groupe de Carothers, et celui-ci fournit comme échantillon d'analyse un polymère de synthèse, l'acide hydroxydécanoïque, dont Carothers peut faire varier le poids moléculaire de 700 à 25 000. Si Carothers peut avancer cette fourchette, rien ne lui permet cependant d'affirmer que l'ensemble des molécules de l'échantillon ont le même poids moléculaire ; de même Staudinger ne peut déduire des mesures de viscosité des substances qu'il analyse que leur poids moléculaire *moyen*. C'est au groupe des colloïdes que revient le mérite d'avoir initié la problématisation de l'*hétérogénéité* des colloïdes organiques : « Il est reconnu que les hauts polymères en général », affirme Lansing au groupe des colloïdes et de chimie organique fin 1932, « sont composés d'une mixture d'un nombre assez important d'espèces moléculaires. Pour obtenir une caractérisation complète d'un tel polymère, il nous faudrait connaître la distribution complète pondérée au poids ou à la fréquence des diverses espèces moléculaires présentes »¹⁰³. Lansing exprime dans ce mémorandum un écart essentiel vis-à-vis des présupposés et pratiques traditionnels en chimie, et en particulier vis-à-vis de la culture de la chimie organique, qui conçoit une substance donnée comme une collection de molécules identiques, ou d'un ensemble limité d'espèces moléculaires bien déterminées.

Ces présupposés n'aident pas à appréhender l'hétérogénéité des colloïdes organiques. Ces considérations de disparité dans la taille des molécules sont marginales au sein du groupe de chimie organique au moment où le groupe des colloïdes s'attèle à la redéfinition du concept de « poids moléculaire » pour les matériaux polymères. Carothers par exemple, dans une longue publication de 1931 qui rassemble l'ensemble de ses idées sur la polymérisation, affirme que « les hauts polymères linéaires synthétiques sont invariablement des mixtures

¹⁰³ Mémorandum, Lansing à Kraemer, Nichols, Carothers et F.J. van Natta, « Molecular weight of H.D.A. polymer », 15 novembre 1932, JBN 7/UC HDA 1932

dont les molécules sont des chaînes de longueur légèrement différentes »¹⁰⁴. Les premières déterminations de la distribution des poids moléculaires par ultracentrifugation, issues du groupe des colloïdes, montreront au contraire une forte hétérogénéité dans la taille des molécules, en particulier dans les polymères naturels comme le caoutchouc. Le leitmotiv « *particle size* » qui structure la démarche du groupe des colloïdes favorise la confrontation avec cette hétérogénéité. Dans le document interne destiné au groupe de chimie organique et à celui de Kraemer de 1932, Lansing rappelle que le « poids moléculaire » ne peut pas être réduit à un nombre unique pour les polymères, mais exprime au contraire une distribution. Il propose de distinguer le poids moléculaire calculé sur le poids individuel des molécules (*weight-averaged*) ou sur leur nombre (*number-averaged*).

Par la suite, pour étayer ces méthodes de calcul des poids moléculaire sur des matériaux polymères plus hétérogènes que les polymères de synthèse préparés par le groupe de Carothers, Lansing se tourne vers le caoutchouc purifié. En juin 1934 il contacte le chimiste W.H. Smith, du Bureau des normes (*U.S. Bureau of Standards*), afin qu'il lui envoie des échantillons de caoutchouc purifié à peu près standardisés¹⁰⁵. Rapidement, Lansing envoie à Smith le résultat des analyses des échantillons par ultracentrifugeuse, et y expose sa nouvelle méthodologie de calcul de poids moléculaire, dont le calcul d'un paramètre de « non-uniformité » pour statuer sur l'hétérogénéité des poids moléculaires. Le groupe des colloïdes poursuit sa coopération avec le Bureau des normes jusqu'au début 1935, alors que les chimistes gouvernementaux profitent de l'apport de l'ultracentrifugeuse de Du Pont pour publier leurs propres résultats sur le calcul du poids moléculaire du caoutchouc¹⁰⁶. Ces premières mesures par ultracentrifugation sur des polymères synthétiques et des échantillons de caoutchouc permettent d'établir la relation entre poids moléculaire et viscosité sur des bases expérimentales plus robustes et d'affiner ou d'infirmer les prédictions de Staudinger. En juillet 1934, Kraemer écrit à Svedberg que la méthode de Staudinger sous-estime les poids moléculaires d'un facteur deux ou trois¹⁰⁷. Kraemer et Lansing présentent cette nouvelle méthode de calcul des poids moléculaire à la conférence annuelle de la Société américaine de chimie, qui a lieu à New-York en septembre 1935¹⁰⁸. Plus tard, la méthodologie développée à partir des échantillons du Bureau des normes sera appliquée aux échantillons de caoutchouc et de néoprène manipulés par les départements industriels de Du Pont, et en 1937 Nichols soumet un rapport à ces départements, reprenant ces analyses et calculs sur les matériaux manipulés industriellement par Du Pont¹⁰⁹.

En septembre 1935, alors que Kraemer et Lansing sont à New-York pour le meeting de la Société américaine de chimie, Carothers est à peu près au même moment, à Cambridge, en Angleterre, pour une conférence internationale sur la polymérisation organisée par la *Faraday*

¹⁰⁴ Wallace CAROTHERS, « Polymerisation », *Chem. Rev.*, vol. 8 (1931), pp. 353-426, citation p. 412

¹⁰⁵ Lettre, Lansing à W.H. Smith, 8 juin 1934, JBN 6/Rubber and neoprene papers of EOK

¹⁰⁶ Lettres, Lansing à Smith, 25 juin 1934 et Kraemer à Smith, 27 mars 1935, *Ibid.*

¹⁰⁷ Lettre, Kraemer à Svedberg, 3 juillet 1934, JBN 7/UC equipment 1934

¹⁰⁸ Lansing et Kraemer, « Molecular weight analysis of mixtures with the ultracentrifuge », *JACS*, vol. 57 (1935), pp. 1369-1377

¹⁰⁹ Nichols, « Molecular weight and homogeneity of rubber and neoprene », Experimental Station Progress Report 37-62, 3 juin 1937, JL 3/ESP 37-x

Society. Même si son intervention se concentre sur les mécanismes de polymérisation, il cite les travaux de Kraemer et Lansing et rappelle que l'ultracentrifugeuse est jusqu'à présent la méthode la plus fiable pour déterminer expérimentalement les poids moléculaires ; il ajoute cependant très vite que l'instrument est fastidieux à manipuler et extrêmement coûteux, qu'il ne se trouve alors qu'en deux endroits au monde (Du Pont et Uppsala), et que par conséquent les résultats obtenus jusqu'à présent sont maigres¹¹⁰. Quoi qu'il en soit, Carothers a suivi de près les avancées du groupe des colloïdes sur la détermination des poids moléculaires, et a rapidement saisi l'importance du paramètre taille pour la compréhension des propriétés des polymères. Lorsque fin 1933 Kraemer milite pour financer une nouvelle ultracentrifugeuse plus performante au sein de la Station, Carothers appuie la demande de Kraemer¹¹¹. En juillet 1934, Carothers ajoute à son équipe un jeune docteur en chimie physique et futur prix Nobel, Paul J. Flory (1910-1985), auquel il propose d'établir un traitement mathématique et statistique de la polymérisation¹¹².

Flory n'est resté que quatre ans chez Du Pont, et poursuit ensuite sa carrière dans d'autres laboratoires industriels puis dans les grandes universités américaines qui se spécialisent dans l'après-guerre sur l'étude des polymères. Cependant il s'approprie chez Du Pont des concepts et méthodes qui vont s'avérer importants pour la suite de sa carrière, notamment les techniques d'ultracentrifugation et les nouveaux concepts de poids moléculaires développés par l'équipe de Kraemer. Il s'approprie également la terminologie « *molecular size* », hybride de chimie colloïdale et de chimie organique. Aussi ses premières études portent sur « la distribution de la taille des molécules [*molecular size*] dans les polymères linéaires de condensation de type polyamide »¹¹³. Flory y reprend et développe les catégories de poids moléculaires établies par Lansing et Kraemer, vers un traitement statistique des longueurs des molécules. Flory et Nichols ont continué à travailler ensemble sur le projet phare de Du Pont concernant les fibres synthétiques, celui qui devait associer rapidement Du Pont aux nylons, assurant ainsi sa renommée et singulièrement celle de Carothers : le « nylon 6-6 ». Ils ont travaillé ensemble sur la détermination des groupes fonctionnels terminaux dans les polymères 6-6, ces groupes terminaux étant importants pour assurer la polymérisation¹¹⁴. Par la suite, en poste au laboratoire de la firme Goodyear au cours de la Seconde Guerre mondiale, Flory est engagé dans le grand programme américain visant à développer des caoutchoucs synthétiques. Un programme dans lequel l'expertise de Du Pont sur la caractérisation des poids moléculaires développée pendant les années 1930 sera rapidement mobilisée.

¹¹⁰ W. CAROTHERS, « Polymers and polyfunctionality », *Transactions of the Faraday Society*, vol. 32 (1936), pp. 39-49

¹¹¹ Lettre, Kraemer à Tanberg, 6 décembre 1933, *op. cit.*

¹¹² Michael CHAYUT, « New sites for scientific change : Paul Flory's initiation into polymer chemistry », *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, vol. 23 (1993), pp. 193-218

¹¹³ Mémoire, Flory à Carothers, « Distribution of molecular size in linear condensations of the polyamide type », 21 mars 1935, JBN 5/polyamides 35-37

¹¹⁴ Mémoire collectif, Flory et Nichols, « End group determination for 66 polymers », 1er juin 1937, JBN 5/polyamides 35-37

Ce programme coopératif sur les polymères rapproche scientifiquement et méthodologiquement les groupes de chimie organique et de chimie colloïdale tout au long de la décennie 1930. Ce rapprochement est manifeste dans l'évolution du vocabulaire utilisé pour exprimer les grandeurs microscopiques des colloïdes organiques, qui deviennent rapidement appréhendés comme des matériaux « polymères ». Alors que le groupe des colloïdes utilise à la fois « poids moléculaire » et « taille de particule » de manière à peu près équivalente, au moment où le programme coopératif débute, très rapidement, au contact des articles de Staudinger, il en vient à exclure « taille de particule » et à préférer les expressions « poids moléculaire » ou « taille de molécule » pour les substances polymères. Symétriquement, si la tradition de la chimie organique s'est construite en statuant sur des « poids moléculaires », le groupe de chimie organique, ainsi que Staudinger, se sont appropriés, à travers la chimie colloïdale, cette focalisation sur la taille des éléments microscopiques, et en vient à utiliser l'expression hybride « taille de molécule », « *molecular size* ». Le groupe de Kraemer est sans doute parmi les premiers, parmi ses collègues spécialistes des colloïdes, à entériner cette évolution de vocabulaire. Alors que Kraemer et Lansing sont au congrès de la Société américaine de chimie en septembre 1935 pour présenter leurs résultats sur le calcul des poids moléculaires, les commentateurs de leur article relèvent cette évolution :

Le terme de « poids moléculaire » a été de plus en plus utilisé récemment à la place de ce qui peut être désigné plus proprement par « taille de particule » quand la particule est petite. Les auteurs continuent cette tendance mais doivent être complimentés pour faire ressortir ces faits dans leur discussion¹¹⁵.

La dissymétrie qui s'instaure à partir de la fin des années 1920 entre « taille de particule » et « poids moléculaire », et la préférence des chimistes envers cette dernière expression, reflètent l'acceptation progressive de l'idée que les colloïdes peuvent être constitués, comme les substances classiquement étudiées par la chimie organique, de dispersions moléculaires. Certains colloïdes sont des dispersions de « macromolécules », et non d'« agrégats » ou de « micelles » plus grossières que des molécules. Selon Furukawa, La reconnaissance internationale de la théorie macromoléculaire de Staudinger s'achève en septembre 1935 à Cambridge, lors du colloque extraordinaire sur la polymérisation auquel participe Carothers. Cependant si la question de l'existence des macromolécules est réglée d'un point de vue académique, le triomphe de la théorie de Staudinger n'a pas aplani les différences de conception parmi l'ensemble des chimistes qui étudient les matériaux polymères industriels, et subsistent encore au sein de Du Pont. Considérer les particules des polymères comme des « macromolécules » ne résout pas instantanément les ambiguïtés qui se posent sur la compréhension microscopique de ces matériaux, loin de là. Début 1935, alors que le groupe des colloïdes a depuis longtemps accepté la pertinence du concept de « macromolécule » et sa réalité ontologique, Lansing se demande encore si les « poids moléculaires » qu'il détermine par ultracentrifugeuse correspondent à des grandeurs de « vraies » molécules ou des « sortes

¹¹⁵ Revue anonyme du papier de Lansing et Kraemer, *Molecular weight analysis of mixtures with the ultracentrifuge*, *op. cit.*, JBN 6/ rubber & neoprene papers of EOK

de micelles »¹¹⁶. Deux ans plus tard, la question, aux yeux de Kraemer, est toujours loin d'être réglée :

En dépit de l'attention soutenue que le sujet a reçu, il y a très peu de consensus parmi les chercheurs concernant le poids moléculaire de la cellulose ou des dérivés de la cellulose, ou l'état de dispersion de ces matériaux en solution¹¹⁷.

Cette absence de consensus n'est pas restreint à la recherche « fondamentale », et les chimistes des départements industriels de Du Pont ont également des idées divergentes sur la nature microscopique des matériaux polymères. Par exemple au département industriel des Produits Organiques (qui s'est substitué au département des Colorants), chargé de la production du néoprène : « étant donné que deux groupes [du département de chimie organique de Du Pont] soutiennent des idées diamétralement opposées concernant le caractère moléculaire du néoprène et du caoutchouc, et que les équipes habituées à publier leurs recherches ne sont pas prêtes à accepter les conclusions auxquelles notre travail préliminaire nous a mené, l'intérêt de ces aspects scientifiques [poids moléculaire du néoprène] était particulièrement vif »¹¹⁸.

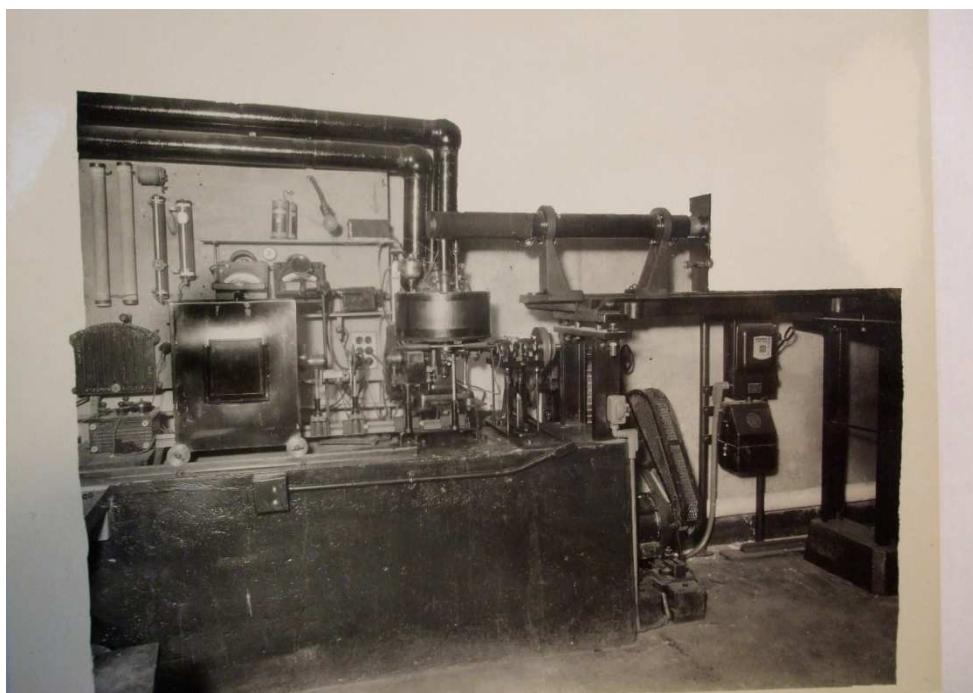


Figure 5.4 — Photographie de l'ultracentrifugeuse de la Station utilisée pour caractériser les dérivés de la cellulose, vers 1937

Avec l'aimable autorisation du Hagley Museum and Library

¹¹⁶ « We also have wondered whether our ultracentrifuge results indicate a true molecular weight or some sort of 'micellar' weight », lettre, Lansing à W.H. Smith, 14 janvier 1935, JBN 6/ rubber & neoprene papers of EOK

¹¹⁷ Kraemer, « The molecular weights of cellulose and cellulose derivatives, 5 avril 1937, JBN 6/UC chapter 1938

¹¹⁸ Mémoire, Kraemer à C.H. Greenewalt, « Molecular weights and homogeneity of neoprene and rubber », 2 février 1937, *op. cit.*



Figure 5.5 — Photographie de William D. Lansing prise en 1931
Avec l'aimable autorisation du Hagley Museum and Library

Le démantèlement du groupe des colloïdes – des colloïdes organiques à la physico-chimie des polymères : continuité ou discontinuité ?

« *Pressure to discontinue* ». C'est par ces mots que débute un feuillet de quelques pages manuscrites portant l'écriture de Kraemer, un document conservé dans les archives personnelles de Nichols¹¹⁹. Si ces pages ne comportent aucune indication explicite de date, ni aucune information permettant de les dater de manière certaine, on peut supposer que Kraemer les a écrites alors qu'il s'apprête à quitter Du Pont pour rejoindre la Biochemical Research Foundation début 1938. L'autonomie du groupe des colloïdes s'achève en effet avec le départ de Kraemer. Depuis 1935 cependant, le nombre de chercheurs composant ce groupe ainsi que ses dépenses sont en déclin inexorable. Courant 1935 il est constitué de dix personnes, tandis que fin 1937 il ne reste que plus 6 chercheurs sous la direction de Kraemer (cf. annexe D). Le départ de Kraemer, néanmoins, ne provoque pas la dissolution du groupe qu'il a dirigé pendant 10 ans, mais plutôt son absorption par un autre groupe du département de Chimie, celui dirigé par Gordon Patterson. Patterson est embauché en 1923 par le département de Chimie pour travailler sur les résines et les vernis, et prend à la fin des années 1920 d'importantes responsabilités de recherche sur les pigments minéraux. Au début des

¹¹⁹ « Pressions pour abandonner », JBN 4/Quarterly reports colloid group

années 1930 cependant il prend la tête du « comité en physique » institué au sein du département ; alors que ce comité absorbe le laboratoire des rayons X de Kenney, ce comité s'institue en groupe autonome de « physique ». Ce groupe est chargé du développement ou de l'assimilation des nouvelles techniques instrumentales de pointe permettant de caractériser les matériaux ou composés, et d'assurer leur appropriation par l'ensemble des laboratoires de la compagnie (cf. chapitre 4). Le contrôle des ultracentrifugeuses de la Station par le groupe des colloïdes a pu apparaître comme une source de conflit avec les missions du groupe de physique, et sans doute une partie des « pressions » dont témoigne Kraemer à démembler le groupe des colloïdes a pu émerger du groupe de physique.

Parmi les réflexions mises sur papier par Kraemer dans ce feuillet, la suivante semble particulièrement significative pour éclairer ce démembrement : « Trop de problèmes sans lien entre eux – plus difficile à suivre avec l'attention nécessaire aux détails. [recommandation :] Moins de problèmes avec une attaque plus concentrée, comme en recherche appliquée »¹²⁰. Le domaine de la chimie colloïdale est effectivement vaste, et le groupe des colloïdes en est venu à disperser ses efforts sur une gamme importante des produits manufacturés par Du Pont, des matériaux inorganiques comme les peintures aux matériaux organiques comme le nylon. En intégrant le groupe de physique, ce qui reste du groupe des colloïdes a effectivement suivi cette réflexion de Kraemer, car le groupe de Patterson concentre son activité sur l'instrumentation et la caractérisation des matériaux. Il y a ainsi une continuité évidente entre les recherches effectuées par le groupe de Kraemer et celles du groupe de physique en plein essor à la veille de la Seconde Guerre mondiale : la taille de particule des pigments, la caractérisation des polymères, l'étude fondamentale de la conversion anatase-rutile.... (cf. annexes D&E) Placé sous la responsabilité de Patterson à partir de 1938, les compétences de Nichols se désolidarisent de la chimie colloïdale et s'alignent progressivement sur les techniques instrumentales de pointe.

Début 1942, alors que Du Pont s'engage massivement dans l'effort de guerre scientifique et industriel, Nichols est placé à la tête de la section « techniques physico-chimiques » du groupe de Patterson. « A la tête de la section Physique du département de Chimie », raconte Nichols sur cette expérience de mobilisation, « j'étais au cœur de développements excitants à la frontière de l'instrumentation pour l'effort de guerre. La coopération mise en place avec des scientifiques anglais et américains de laboratoires universitaires et industriels s'est avérée particulièrement utile, en particulier pour les programmes sur le caoutchouc synthétique et le carburant pour l'aviation »¹²¹. De fait, les missions de Nichols s'alignent sur celles de Kenney, qui est détaché au MIT le temps de la mobilisation de Du Pont dans le conflit de la Seconde Guerre mondiale. En décembre 1942, Nichols visite le laboratoire de physique de Dow, une des plus grandes firmes américaines de chimie. Il est introduit aux installations en microscopie électronique et en diffraction

¹²⁰ « *Too many unrelated problems – more difficult to follow with necessary attention to detail. Fewer problem and more concentrated attack – as in applied research* »

¹²¹ Nichols, *Biographical sketch*, *op. cit.*

électronique de Dow, et les compare avec celles de Du Pont¹²². En février 1943, une délégation de Du Pont emmenée par Nichols visite le laboratoire de microscopie électronique du département de biologie du MIT afin d'« appliquer avec profit leurs méthodes pour nos études sur les fibres »¹²³. Tout au long du conflit, la section de Physique s'attache à améliorer les techniques instrumentales comme la spectroscopie infrarouge et Raman, les caméras à rayons X à petits angles, les compteurs Geiger... dans des projets à vocation militaire comme la détection des isotopes ou l'équipement des soldats en fibres synthétiques¹²⁴.

Le récit autobiographique de Nichols laisse entendre que Du Pont, et le groupe de physique en particulier, a également été mobilisé dans le grand programme américain en vue de la production à grande échelle d'un substitut au caoutchouc naturel, institué en urgence avec l'entrée des Etats-Unis dans le conflit. Les régions asiatiques touchées par le conflit constituent en effet des sources d'approvisionnement en caoutchouc naturel importantes pour les activités industrielles et militaires américaines ; officiellement en guerre contre le Japon, qui domine ces régions stratégiques, les États-Unis courent le risque de la pénurie de ce matériau indispensable à ces activités. Un large effort politique, industriel et scientifique est déployé pour produire de vastes quantités de caoutchouc artificiel par la polymérisation du butadiène et du styrène¹²⁵. La grande firme de fabrication de pneumatiques *Goodyear Tire and Rubber Co.*, qui a entrepris depuis le milieu des années 1920 d'importantes recherches sur le caoutchouc artificiel, se positionne en acteur industriel incontournable de ce programme. Goodyear a sollicité l'expertise de Du Pont pour mener à bien ce programme d'envergure. Le groupe de Patterson, et singulièrement Nichols, travaille courant 1942 avec le directeur du laboratoire de Goodyear Lorin B. Sebrell, situé à Akron, dans l'Ohio, sur la détermination des poids moléculaires du butadiène polymérisé par ultracentrifugeuse¹²⁶.

Au laboratoire d'Akron, la méthode utilisée pour déterminer ces poids moléculaires est celle de Staudinger, par inférence avec la mesure de viscosité de l'émulsion polymérisée de butadiène ou de styrène. Les courbes obtenues par ultracentrifugeuse permettent de déterminer la distribution des poids moléculaires plutôt que le seul poids moléculaire moyen par le biais de la viscosité. Une autre technique de caractérisation de ces poids moléculaires est développée pendant les années de guerre, entre la section de Nichols et le laboratoire du professeur Peter Debye (1884-1966, prix Nobel de chimie 1936) à l'université de Cornell, dans l'état de New-York. Les figures de dispersion de la lumière par de petites particules en solution fournissent des informations sur leur taille, et le groupe des colloïdes a contribué à développer cette méthode pour son étude sur les pigments à partir de 1934. La coopération

¹²² Memorandum, Nichols à Patterson, « Visit to the physics laboratory of the Dow chemical company », 28 décembre 1942, JBN 5/Physics section memoranda 1942-1944

¹²³ Mémorandum, A.F. Smith à J.W. Hill, « Application of biological methods to the study of synthetic fibers », 20 février 1943, *Ibid.*

¹²⁴ Patterson, « Outline for steering committee », 1942-1945, GDP 7/Steering committee outlines

¹²⁵ Peter J. T. MORRIS, *The American synthetic rubber research program*, Philadelphia (PA), University of Pennsylvania Press, 1989

¹²⁶ Lettre, Patterson à L.B. Sebrell, 11 août 1942 et mémorandum, Nichols et E.D. Bailey, « Ultracentrifugal determination of molecular weights of natural and synthetic rubber », 10 août 1942, JBN 5/Physics section memoranda 1942-1945

avec Debye pendant la guerre vise à adapter cette méthode aux substances organiques comme les polymères, afin de déterminer la longueur des « macromolécules » dans les émulsions de butadiène. Cet ensemble de méthodes de caractérisation des matériaux polymères « a aidé », selon Nichols, « à détecter les erreurs de conception et améliorer le traitement théorique des données »¹²⁷. Les mesures de poids moléculaire peuvent en effet être reliées aux traitements mécanique ou thermique subis par le caoutchouc, ainsi qu'à son mode de production. Elles fournissent des balises pour améliorer la qualité du substitut au caoutchouc naturel final en contrôlant les nombreux paramètres du procédé.

Les interactions entre Debye et Nichols se poursuivront après la fin du conflit, pour améliorer la méthode de caractérisation par dispersion de la lumière. Paul Flory, après avoir travaillé à partir de 1943 au laboratoire de Goodyear sur le caoutchouc synthétique, rejoindra en 1948 l'université Cornell pour instituer un des premiers programmes universitaires axé sur la toute jeune physico-chimie des polymères, ou du moins revendiquée comme telle. Herman Mark, qui a fui l'Allemagne nazie puis l'Autriche en anticipant l'*Anschluss* de 1938, rejoint en 1940 le *Brooklyn Polytechnic Institute* de New-York pour y amorcer le premier programme académique sur les polymères. Cette attribution d'un poste pour Mark à New-York, et dédié aux polymères, est le résultat de tractations entre Du Pont et la Compagnie Internationale du Papier Canadienne, un des principaux fournisseurs de Du Pont en cellulose, et qui a proposé à Mark une position industrielle alors que l'annexion de l'Autriche par le troisième Reich est imminente¹²⁸. Une fois en poste au Polytechnique de New-York, Mark organise des séminaires hebdomadaires auquel Nichols participe, et qui seront maintenus alors que les États-Unis entrent officiellement en guerre et se perpétueront dans l'après-guerre¹²⁹. Mark s'est également rendu à la Station au cours de ces années. En juillet 1944, il échange avec Nichols sur la thèse récente d'un autre disciple de Svedberg, Nils Gralèn, qui s'inscrit dans la droite ligne des problématiques du groupe des colloïdes puis de celui de physique, soit la détermination du poids moléculaire des dérivés de la cellulose par ultracentrifugation. Des copies de la thèse sont distribuées au département de Chimie et de la Rayonne¹³⁰.

Ainsi, l'« école de recherche » de Svedberg continue à être active pendant la guerre. Peut-être Nichols s'est-il procuré la thèse de Nils Gralèn par l'intermédiaire d'un membre de la délégation Suédoise à Washington, Edy Velandér, proche connaissance de Svedberg, qui vient rendre visite à Nichols d'abord informellement puis plus officiellement à la Station courant 1944. Velandér (1894-1961), ingénieur Suédois diplômé du MIT et de Harvard, est au cœur des agissements – avec Svedberg – visant à réorganiser la recherche scientifique et les relations entre le gouvernement suédois, l'industrie et l'université à la veille de la Seconde

¹²⁷ Nichols, *Biographical sketch*, *op. cit.*

¹²⁸ Herman MARK, « Polymer chemistry in Europe and America – How it all began », *JCE*, vol. 58 (1981), pp. 527-534

¹²⁹ Nichols, *Biographical sketch*, *op. cit.*

¹³⁰ Mémoire, Nichols à Salzber, « Discussion of Svedberg's ultracentrifugal analysis of cellulosic materials with Dr. Mark », 9 août 1944, JBN 6/UC juin 1930-nov1945

Guerre mondiale¹³¹. Directeur depuis 1941 de l'Académie Royale Suédoise des Sciences de l'Ingénieur, il est nommé responsable technique de la Délégation Suédoise à Washington, qui visite les Etats-Unis à partir de 1943. Introduit par une lettre de Svedberg auprès de Nichols, il rencontre ce dernier avec un autre chimiste de la Station en février 1944 de manière informelle¹³². Résumant à Nichols les missions qui lui sont confiées dans le cadre de cette délégation, il est clair que la Suède cherche, à travers cette délégation et Velandér en particulier, et malgré sa neutralité dans le conflit, à renforcer ses coopérations avec les États-Unis et se projette dans l'après-guerre, alors que la victoire des Alliés semble inexorable dès 1943. Velandér informe Nichols de l'état général de la mobilisation scientifique suédoise pour le conflit, et celle de Svedberg en particulier, qui a délaissé ses études sur les protéines pour se concentrer sur les polymères cellulosiques et le caoutchouc artificiel. En échange, Velandér cherche à comprendre l'organisation générale de la recherche chez Du Pont, et la relation entre le département de Chimie, ceux d'Ingénierie et du Développement, et les départements industriels. L'instrumentation est également un enjeu prioritaire de sa mission et celui-ci souhaite visiter les laboratoires de la Station et en particulier la section de Physique dirigée par Nichols. Ayant obtenu l'autorisation des autorités gouvernementales, Velandér visite la Station en mai 1944, et est introduit par Nichols à l'instrumentation de pointe qu'elle recèle¹³³.

Se constituent ainsi en gestation, pendant ces années de guerre, les réseaux scientifiques et industriels qui vont assurer la maturité du domaine des polymères dans l'après-guerre. Car l'urgence de l'effort de guerre n'empêche pas ces réseaux de se projeter quelques années en avant, dans un avenir qui, une fois l'Allemagne et le Japon vaincus, s'annonce radieux pour l'industrie des polymères : « Etant donnée la position importante que les matériaux synthétiques comme les plastiques, les films et les fibres occuperont dans l'économie d'après-guerre, » écrit Nichols au directeur de la Station en avril 1943, « les études sur le poids moléculaire devraient recevoir plus d'attention une fois la main d'œuvre mobilisée pour la guerre à nouveau disponible »¹³⁴. Pour le nylon en particulier, l'enjeu est d'assurer son hégémonie au sein des marchés civils des textiles synthétiques, auprès du grand public, plutôt qu'au sein des marchés militaires qui caractérisent l'économie de guerre. La recherche sur les caractéristiques moléculaires des polymères, et en particulier sur les poids moléculaires, apparaît essentielle à cette industrie des polymères florissante qui se profile à l'horizon. Cette recherche apparaît essentielle d'abord aux yeux du groupe de physique, qui s'approprie ce thème en anticipant sur les recherches dans l'après-guerre¹³⁵. Puis, très vite, également aux yeux d'acteurs plus puissants de Du Pont, et notamment auprès du directeur du département de Chimie Elmer Bolton, comme il l'exprime dans son rapport annuel de 1945 :

¹³¹ Thorsten NYBOM, « The socialization of science : technical research and the natural sciences in Swedish research policy in the 1930s and 1940s », in Lindqvist (ed.), *Center on the periphery*, *op. cit.*

¹³² Mémoire, Nichols à Cole Coolidge, « Talk with Dr. Edy Velandér in Feb. 12, 1944 », 19 février 1944, JBN 5/Physics section memoranda

¹³³ Lettre, Nichols à Tanberg, 8 mai 1944, *Ibid.*

¹³⁴ Mémoire, Nichols à A.P. Tanberg, « Ultracentrifuge data », 6 avril 1943, *Ibid.*

¹³⁵ Patterson, « Characterization methods for high polymers – Major experimental project n° 3127 », 27 octobre 1944, JBN 5/Oil turbine blueprints 1934-1966

Le développement et l'affinage de techniques physiques pour déterminer la structure moléculaire des hauts polymères constituent des phases vitales de notre recherche sur les polymères. [...] Cette information [la longueur des chaînes moléculaires par fractionnement] est utilisée quotidiennement par le département de la Rayonne dans une étude visant à améliorer les procédés de fabrication du nylon¹³⁶.

Au sortir de la guerre donc, les connaissances sur l'état microscopique des matériaux polymères se « tissent », pour reprendre la métaphore de Greenewalt exposée à Nichols à l'occasion de son vingt-cinquième anniversaire au service de Du Pont, de manière plus massive avec la recherche « appliquée ». Ces matériaux, moins de deux décennies auparavant, étaient encore davantage considérés comme colloïdaux plutôt que comme polymères. Ce tissage qui devient alors effectif, opérationnel, peut être interprété comme une phase d'aboutissement des ambitions qui ont porté le groupe des colloïdes sur la longue durée, une réalisation des prétentions qui ont structuré son existence et sa justification au sein de Du Pont. Fin 1937 encore, Kraemer écrivait au même Greenewalt que le travail d'analyse des échantillons de néoprène par ultracentrifugeuse « a été jusque là d'un caractère largement exploratoire, car il était évident depuis le début que l'élucidation des questions relatives au poids moléculaire des substances composant le néoprène, et la relation à leur performance pratique, constitue une entreprise considérable »¹³⁷. La mobilisation des informations sur le poids moléculaire – et de l'instrumentation sophistiquée associée – par le département de la Rayonne pour améliorer ses procédés de production du nylon, de manière plus systématique au sortir de la guerre, représente un accomplissement majeur dont le groupe des colloïdes peut revendiquer, à titre posthume, une bonne part du mérite. Un succès partagé avec le groupe de Patterson qui l'absorbe et assure en quelque sorte la perpétuation de l'« âme » de ce groupe au sein de la compagnie. De même, si l'on considère le cas des pigments minéraux et des peintures au sortir de la guerre, l'apport du groupe des colloïdes alors défunt révèle également cet aboutissement, peut-être plus rapide et visible encore que dans le cas des polymères.

¹³⁶ Bolton, « 1945 annual report to the Executive Committee », 11 avril 1946, CRD 16/Annual reports 1942-1946

¹³⁷ Kraemer à Greenewalt, 2 février 1937, *op. cit.*

Partie III. Pigments et vernis : consommation de masse et recherche industrielle

Chapitre 6. « FROM AN ART TO A SCIENCE » (I) : L'INDUSTRIE DES PEINTURES ET VERNIS 1900-1928

“To the end that paint manufacturers may become truly scientific...

... *I commend this paper*”. Gustave W. Thompson, chimiste en chef à la plus importante compagnie américaine de pigments au plomb, la *National Lead Company*, conclut ainsi un article qu'il publie en 1910, esquissant auprès de ses collègues industriels et fabricants de peintures le tableau des possibilités offertes par la science à l'industrie des peintures en ce début de siècle¹. Thompson appelle ici à une réforme des pratiques encadrant la production et l'étude des peintures ; ainsi qu'il le développe dans son article-manifeste, la clé de cette réforme se situe dans l'étude « scientifique » de l'« aspect physique » des substances et matériaux auxquels ces pratiques se confrontent. Par aspect « physique », le chimiste-en-chef entend deux choses relativement indépendantes : la microstructure des peintures et vernis d'une part, et leurs propriétés non-chimiques d'autre part, c'est-à-dire mécaniques, rhéologiques (viscosité), et optiques (couleur, opacité...). « Il semblerait, par conséquent », résume Thompson, « que l'art de la fabrication des peintures, pour être scientifique, passe par l'établissement de règles et de formules gouvernant les proportions des différentes tailles de particule dans un pigment »². En outre, s'attachant à comprendre l'état des pigments qu'il étudie sous son microscope, Thompson spéculait sur la « condition colloïdale » qui lie le pigment à son véhicule.

Dans les parties précédentes, nous avons appréhendé l'essor de la chimie colloïdale au début du siècle dans le cadre de bouleversements plus larges sur l'ontologie des matériaux ; nous avons également retracé comment ces bouleversements ont pénétré Du Pont, alors que ses chimistes se sont mis à étudier avec intensité les propriétés colloïdales et physiques des substances. Dans cette partie, nous souhaitons reprendre cette histoire en se focalisant sur l'industrie des peintures et vernis, en particulier sur le cas de Du Pont. Cette industrie connaît en effet de profonds bouleversements au tournant du siècle, alors qu'elle s'adapte et reste en phase avec ce que les historiens ont appelé l'« ère Progressiste » : entre les années 1890 et 1920, l'industrialisation rapide du pays et l'émergence du « *big business* » génèrent de nouveaux corps professionnels, dont les scientifiques (en particulier en tant qu'experts), qui se révèlent de plus en plus indispensables³. Nous essaierons d'analyser comment ce déplacement

¹ G.W. THOMPSON, « Scientific preparation and application of paint », *JIEC*, vol. 2 (1910), pp. 87-92

² « It would appear, therefore, that the art of paint-making, to be scientific, should involve the establishment of rules and formulae governing the proportions of different sized particles in a pigment », *Ibid.*, p. 90

³ L'étude de Robert H. WIEBE (*The search for order, 1877-1920*, Londres, MacMillan, 1967) est un classique dans l'historiographie de l'ère Progressiste ; cette ère a généré une volumineuse littérature ainsi que d'importantes controverses historiographiques, pour une introduction relativement récente à cette littérature et à ces controverses, voir Steven J. DINER, *A very different age : Americans of the progressive era*, New York (NY), Hill and Wang, 1998

vers l'aspect physique des substances s'articule avec les bouleversements socio-économiques qui démarrent avec l'ère Progressiste et se poursuivent avec le boom économique des années 1920 et la Grande Dépression des années 1930.

Au cours des années 1900, suite à des fraudes massives et récurrentes dans la formulation des peintures, les états puis le gouvernement fédéral obligent légalement les fabricants à afficher la composition de leurs produits, entraînant ces fabricants à embaucher des chimistes pour analyser ces produits ou à les soumettre à l'examen de laboratoires publics. Ce chapitre décrit la mise en place de ces lois sur l'étiquetage et comment elles participent à la réforme de l'étude des peintures. Comme le pressent Thompson, ces lois accélèrent la pénétration des chimistes diplômés des universités dans cette industrie, ainsi que le basculement vers l'étude des propriétés physiques. En mettant au cœur des enjeux scientifiques qui attendent les chimistes la détermination de la taille et de la forme des pigments minéraux, ainsi que les propriétés physiques des peintures, Thompson anticipe remarquablement sur les grandes questions qui vont progressivement occuper les recherches sur les peintures et vernis au cours de l'entre-deux guerres, ainsi que sur les orientations des grands laboratoires industriels des compagnies qui commercialisent ces pigments. En 1910 cependant, ces laboratoires sont encore en gestation et seules les plus grandes compagnies comme la National Lead où travaille Thompson ont les moyens financiers d'entretenir un laboratoire de manière permanente, intégré aux activités routinières de production et hébergeant des moyens expérimentaux coûteux et un personnel qualifié.

Pénétration des « chimistes » dans l'industrie des peintures 1890-1916

L'industrie des peintures au tournant du siècle – les lois d'étiquetage

Les peintures minérales sont composées principalement de pigments, pour la plupart métalliques – plomb, zinc, titane, barium, chrome... – dispersés dans un liant, souvent appelé un « véhicule ». Ces pigments sont des petites particules solides, cristallines ou amorphes, dont la taille s'étale de quelques nanomètres à quelques micromètres. Le liant peut être gras ou aqueux ; au début du siècle l'huile de lin est un véhicule gras couramment utilisé dans les peintures et vernis protecteurs ou décoratifs. Dans la lignée des travaux de l'historien Christian Warren sur l'histoire de la régulation des pathologies liées à l'ingestion de plomb aux Etats-Unis, cette industrie des peintures au tournant du siècle gagne à être analysée à travers une dichotomie « *mixed-paints* »/« *pure-paints* », peintures « mixtes » et « pures »⁴. Cette dichotomie est caractéristique en particulier des peintures blanches, où la « pureté » de la peinture ne reflète pas nécessairement sa couleur, mais plutôt celle du pigment métallique qui entre dans sa composition. Parmi ces pigments, le blanc de plomb jouit de la plus grande notoriété. Le blanc de plomb (« *white lead* »), « premier produit chimique fabriqué

⁴ Christian WARREN, *Brush with death : a social history of lead poisoning*, Baltimore (MD), The Johns Hopkins University Press, 2000 ; –, « Toxic purity : the Progressive Era's origins of America's lead paint poisoning epidemic », *The Business History Review*, vol. 73 (1999), pp. 705-736

commerciallement dans ce pays [les Etats-Unis] »⁵, est dépositaire d’une longue tradition artistique, technique et industrielle. Il est le pigment préféré des Américains, même si une morbidité anormalement élevée parmi les travailleurs de l’industrie du plomb, et des enfants exposés au contact des poussières de plomb, font douter de son innocuité. Les consommateurs acceptent de payer plus cher les peintures au plomb que celles issues d’autres pigments blancs, car le blanc de plomb est alors synonyme d’authenticité, de qualité, de tradition.

Mais un marché en expansion⁶, l’appât du gain et la variété des combinaisons des substances menant à un pigment compétitif, qui semble inépuisable, introduisent continûment de nouveaux pigments ou peintures qui rentrent en compétition avec les peintures « pures » au plomb. Le blanc de zinc, introduit au Etats-Unis juste avant la Guerre Civile, occupe une place grandissante à la fin du siècle parmi les pigments blancs, mais se vend moins cher que le blanc de plomb⁷. Les blancs de plomb et de zinc constituent les pigments « purs » ; les pigments issus d’un mélange zinc-plomb, ou de tout autre pigment métallique, constituent les pigments « mixtes ». Parmi ceux-ci, il y a le lithopone, mélange de zinc et de barium, qui occupe une place grandissante au sein des pigments blancs au tournant du siècle. Les peintures « mixtes » sont caractérisées également par l’ajout d’autres substances comme le talc, les barytes, les argiles... dont les fabricants ne s’expliquent pas très bien l’impact sur les propriétés de la peinture, mais qui, moins chers que le plomb ou le zinc, permettent de réduire les coûts de production et de proposer un produit à un prix compétitif. Ces substances sont significativement appelées des « adultérants », et leur ajout est considéré comme avilissant pour la « pureté » du zinc ou du plomb, seulement motivé par la cupidité de fabricants peu scrupuleux. « Les fabricants respectables les évitent », écrivent deux chimistes des peintures dans un rétrospectif de la division « Peintures et vernis » de la Société américaine de chimie à l’occasion de ses 75 ans⁸. L’attrait des peintures pures est tel que ces ajouts sont généralement occultés dans la composition mise en avant pour vendre ces peintures « adultérées », même s’il apparaît que dans certains cas leur effet pourrait être bénéfique dans la tenue générale de la peinture.

Du fait de la formation de chimistes aux compétences expérimentales d’analyse, qui devient plus massive à la fin du siècle, ces publicités mensongères sont détectées plus systématiquement et sont de plus en plus assimilées à des fraudes, dont les consommateurs attendent des sanctions de la part des autorités politiques locales ou fédérales. C’est en effet

⁵ William HAYNES, *American chemical industry*, New-York, D. van Nostrand & Co., vol. I, 1945 p. 355

⁶ L’industrie des peintures, à l’instar de l’ensemble de la chimie industrielle et même de l’ensemble des secteurs industriels, est au tournant du siècle caractérisée par une *forte expansion*, à la fois en termes de fabricants et en quantités produites. Suite à la poussée du marché des peintures pour l’habitat, la consommation de blanc de plomb augmente fortement à partir de 1870. La production double entre 1870 et 1890, passant de 35 000 à 75 000 tonnes (Haynes, *op. cit.*, p. 356). En 1909 la production de blanc de plomb atteint plus de 210 000 tonnes (« Industry and trade notes : mineral paints production », *JIEC*, vol. 3 (1911), pp. 56-7). En valeur, la production de l’ensemble du secteur des pigments et vernis est plus que doublée entre 1899 et 1914, passant de 70 à 147 millions de dollars (dollars courants, source : A.S. SWIFT, « Changes in the chemical industry in the past twenty-five years », *JIEC*, vol. 20 (1928), p. 658)

⁷ HAYNES, *American chemical industry*, *op. cit.*, pp. 355-371

⁸ C.K. BRAGDON, M.M. RENFREW, « Paint, varnish and plastic chemistry », *JIEC*, vol. 43 (1951), pp. 1272-1282, citation p. 1272

au cours des années 1890 que la chimie en tant que profession connaît son véritable essor. La Société américaine de chimie (*American Chemical Society*), instituée en 1876, voit le nombre de ses adhérents augmenter fortement pendant cette décennie. Les étudiants peuplent les départements de chimie des universités de manière plus prépondérante, et en 1901 plus de 22 000 étudiants sont inscrits dans les filières de l'enseignement supérieur dédiées à la chimie, dont 5 400 dans la spécialité analyse. Mieux, la plupart des laboratoires universitaires sont modernisés au cours de cette décennie, ou au tout début du siècle⁹. Ces chimistes formés à l'analyse appliquent leur art et leur science sur les pigments et les peintures ; un des premiers manuels dédié à l'analyse des peintures blanches paraît en 1898, et expose les méthodes en vigueur pour déterminer la composition des pigments et du véhicule¹⁰. La professionnalisation des chimistes, leur formation aux techniques d'analyse de composition chimique, et leur implantation progressive dans les milieux industriels et techniques, fournit au tournant du siècle les moyens scientifiques et techniques pour mettre à jour l'écart entre l'affiché et le vendu dans les peintures.

La pénétration des chimistes « modernes » dans l'industrie des peintures et vernis aux États-Unis, formés à l'université et dont la légitimité se fonde sur un savoir général en chimie plutôt que sur une connaissance intime, pratique de tel procédé ou tel produit, est ainsi très récente au moment où les lois sur l'étiquetage sont adoptées. Ces premières générations de chimistes diplômés de l'enseignement supérieur et embauchés par les entreprises de peinture se distinguent nettement des contremaîtres et autres personnels des fabriques ou des usines qui ont acquis leurs connaissances principalement à partir de leur expérience industrielle. Maximilian Toch (1864-1946) par exemple, qui a fondé une firme de consultants à New-York et dont la réputation est mondiale sur l'authenticité des œuvres des grands maîtres, dénigre les habitudes de ses prédécesseurs à conserver jalousement la formulation de leurs produits. « Heureusement », écrit-il en 1915, « ces jours sont derrière nous et le contremaître en vernis est à présent plus ou moins dominé par le chimiste »¹¹. Ces premières générations de « chimistes » se perçoivent comme les agents de la modernisation de l'industrie des peintures et vernis, aptes à assurer la transition de l'industrie « de l'art à la science », selon la formule de Thompson.

Il n'est donc pas surprenant que ces premières générations de chimistes « modernes » aient joué un rôle substantiel dans l'avènement de ce que les historiens ont appelé l'« ère Progressiste ». Selon Robert Wiebe, « l'ambition d'une nouvelle classe moyenne à réaliser sa destinée à travers des moyens bureaucratiques était au cœur du progressisme »¹². Chimie et bureaucratie se rencontrent dans les lois visant à réguler la qualité des produits consommés par les Américains. L'initiation de ces législations contraignantes revient en grande partie à

⁹ Chiffres et laboratoires cités par John W. SERVOS, *Physical-chemistry from Ostwald to Pauling. The making of a science in America*, Princeton (NJ), Princeton University Press, 1990, pp. 95-99 ; voir aussi A. THACKRAY *et al.*, *Chemistry in America, 1876-1976 : historical indicators*, Dordrecht, Reidel, 1985

¹⁰ George H. ELLIS, *Analysis of white paints*, Evanston (IL), The Technical Press, 1898

¹¹ M. TOCH, « Contributions of the chemist to the paint and varnish industry », *JIEC*, vol. 7 (1915), p. 938 ; sur Toch, voir Ellwood HENDRICK, « Maximilian Toch », *JIEC*, vol. 21 (1929), p. 704

¹² WIEBE, *The search for order, op. cit.*, p. 166

un chimiste de l'université Agricole du Dakota du Nord, à l'extrémité nord des plaines du *Midwest*, Edwin F. Ladd (1859-1925). Particulièrement dans les grandes plaines agricoles du *Midwest* et du *Southwest*, les conditions économiques se détériorent au milieu des années 1890, généralisant les suspicions contre des pratiques industrielles douteuses, dans un contexte économique caractérisé par la concentration des entreprises, l'avènement du « *big business* »¹³. Ladd se concentre sur la qualité de la nourriture et des médicaments consommés par ses concitoyens du Dakota du Nord, et dénonce les pratiques frauduleuses dans les industries alimentaires et pharmaceutiques, dont certaines présentent un réel danger pour la santé publique. Ladd jouera un rôle essentiel dans la ratification par le Congrès du *Pure Food and Drugs Act* de 1906, qui va généraliser les contrôles des produits alimentaires effectués par le ministère de l'Agriculture¹⁴. Porté par ses succès sur la régulation des produits alimentaires et pharmaceutiques, Ladd se tourne rapidement vers l'industrie des peintures et des vernis, et parvient en 1905 à faire passer des lois au niveau de l'état du Dakota du Nord imposant l'étiquetage des « adu'térants », c'est-à-dire toute substance autre que le plomb, le zinc, l'huile de lin et des « couleurs pures » entrant dans la composition des peintures. L'industrie des peintures « mixtes » s'est dans un premier temps vivement opposée aux lois sur l'étiquetage, qui contraindraient les fabricants et artisans à dévoiler leur formulation et recettes. Cette industrie s'est organisée au cours des années 1890 ; elle est représentée à partir de 1899 par l'Association des Fabricants de Peintures (*Paint Manufacturers' Association of the United States*), qui dispose des agents, au niveau des capitales des principaux états concernés, pour militer contre les projets de loi sur l'étiquetage, qui commencent alors à être proposés. À l'automne 1906 et suite aux succès des lois du Dakota du Nord, le secrétaire de cette association, George B. Heckel, rencontre Edwin Ladd et tente de le persuader de l'inanité des peintures « pures » et de le dissuader de proposer un projet de loi au niveau fédéral. L'Association, portée par Heckel, ira jusqu'à faire appel devant la Cour Suprême pour tenter d'abroger les lois sur l'étiquetage du Dakota du Nord¹⁵.

Sans succès, cependant, et comprenant que l'affichage de la composition est en passe de s'inscrire irréversiblement dans les pratiques des fabricants et consommateurs de peinture, l'Association ainsi que des représentants des peintres proposent un projet de loi d'étiquetage au niveau fédéral en 1907. Entre-temps, d'autres états ont également ratifié des lois similaires. Cette agitation autour des peintures au début du siècle revêt des caractéristiques qui singularise le cas américain de la plupart des pays Européens ; ces derniers étant également engagés, à peu près au même moment, dans les premières phases d'une régulation politique des pathologies liées au plomb qui comprend l'encadrement des peintures au plomb. En

¹³ Cette concentration des entreprises qui caractérise la période économique des deux ou trois dernières décennies du siècle touche également le secteur des peintures. Les principaux producteurs de blanc de plomb se combinent en 1887 et constituent le *National Lead Trust*. En 1891, suite au passage des lois Sherman anti-trust le trust au plomb se réorganise et devient la *National Lead Company*. En 1895, plusieurs fabricants de zinc se combinent pour former la *New Jersey Zinc Company*, et domine rapidement le marché du lithopone et du blanc de zinc.

¹⁴ James Harvey YOUNG, *Pure Food : securing the federal Food and Drugs Act of 1906*, Princeton (NJ), Princeton University Press, 1989 ; Lorine S. GOODWIN, *The pure food, drink and drug crusaders, 1879-1914*, Jefferson (NC), McFarland, 1999

¹⁵ WARREN, *Toxic purity, op. cit.* p. 718

France, le saturnisme préoccupe les corps médicaux dès la fin du 19^e siècle et la première loi d'interdiction des peintures au plomb est passée en 1909, même s'il faudra attendre les années 1920 pour qu'elle commence à être véritablement appliquée. Aux États-Unis en revanche, la part des débats sur la toxicité des peintures au plomb est marginale dans l'ensemble du processus de régulation des peintures qui agite les autorités locales et fédérales à partir du début du XX^e siècle et jusqu'aux années 1960. Cette agitation est dominée par la modernisation des pratiques commerciales et industrielles autour des peintures et vernis, plutôt que par l'enjeu sanitaire associé :

On ne peut pas nier que les peintres américains, en dépit des dangers reconnus, aimaient les peintures au plomb. Les débats qui ont traversé l'Ère Progressiste se sont concentrés moins sur la santé que sur la définition d'une peinture, la liberté d'expérimenter, et la mise en place de normes plus efficaces –en bref, sur le futur de l'industrie.¹⁶

Il y a en effet peu de doutes que l'implantation des lois sur l'étiquetage et plus généralement l'interventionnisme étatique et fédéral dans les pratiques des fabricants de peinture aient accéléré l'emprise de la chimie moderne sur ce secteur industriel et la mise en place de tests et normes progressivement acceptés par l'ensemble du secteur – en bref, aient fait prendre à l'industrie des peintures et vernis un tournant résolument plus « scientifique ».

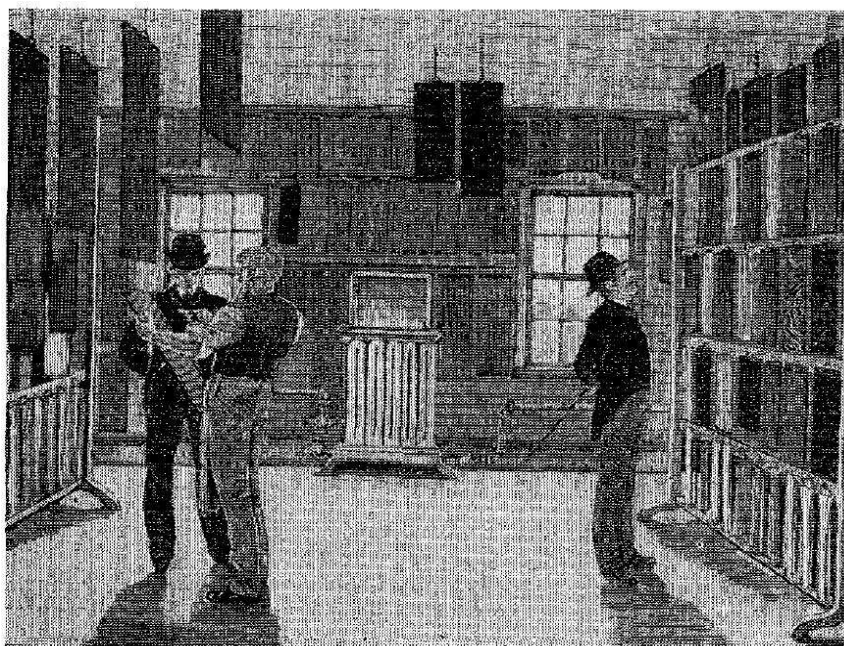
Premiers panneaux d'exposition en extérieur

L'agitation autour de la qualité des peintures au tournant du siècle, et en particulier la diffusion des lois sur l'étiquetage, va incliner les associations professionnelles des peintures et vernis à promouvoir plus sérieusement les études techniques des peintures, et à ne plus se limiter à la défense de pratiques jugées commercialement avantageuses. En 1904, sous l'action d'Heckel, l'Association des Fabricants de Peinture institue le Bureau de Promotion et de Développement, sorte de vitrine publicitaire et médiatique de l'Association. En 1907 cependant, peu après les premiers succès des lois sur l'étiquetage, le Bureau de Promotion et de Développement se dote d'une « Section Scientifique ». Cette section scientifique finance et chapeaute un laboratoire qui, bien qu'hébergé par la compagnie de lithopone Harrisons Brothers de Philadelphie – qui sera plus tard rachetée par Du Pont –, est conçu comme une plateforme expérimentale et de formation pour l'ensemble des compagnies représentées par l'Association des Fabricants de Peinture. En 1908, l'Association des Fabricants de Vernis est invitée à se joindre au Bureau de Promotion et de Développement et à cette section scientifique. Le nom du bureau est alors changé en Bureau de Formation (*Educational Bureau*), dont la vocation bascule de la vitrine publicitaire à la formation scientifique et technique du personnel dans le secteur des peintures¹⁷.

¹⁶ *Ibid.* p. 717

¹⁷ BRAGDON et RENFREW, *Paint, varnish and plastic chemistry*, *op. cit.* p. 1277 ; National Research Council, *Handbook of scientific and technical societies and institutions of the United States and Canada*, 4^eme édition, 1942, volume 1, §862, « National Paint, Varnish and Lacquer Association »

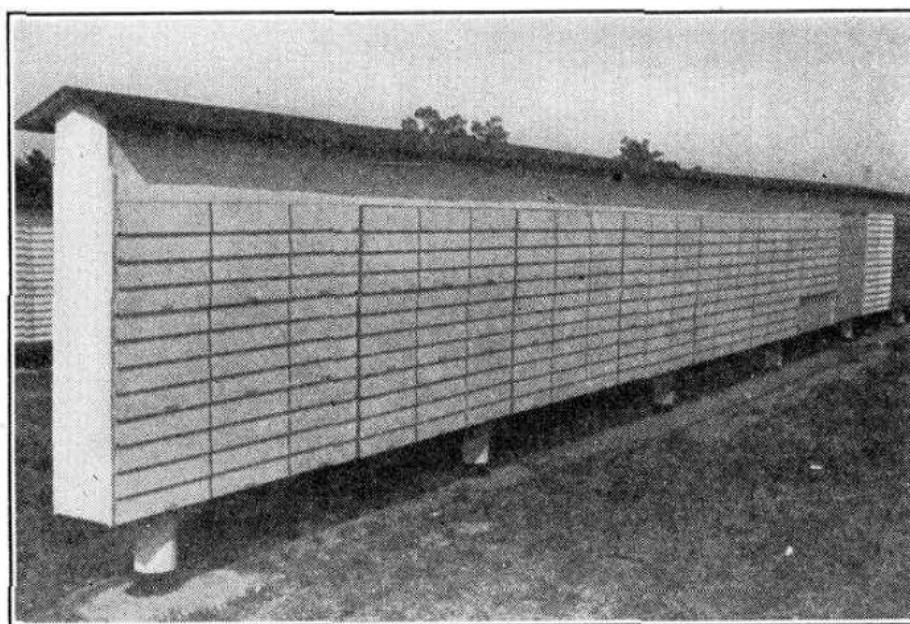
L'intérêt récent de l'industrie des peintures et vernis autour des enjeux de formation du personnel et de tests expérimentaux sur ses produits va mobiliser les ressources scientifiques et techniques du pays vers l'étude plus systématique de leur qualité. En particulier, des panneaux d'exposition en condition réelle, permettant d'évaluer empiriquement la durée de vie des peintures (« *weathering tests* »), vont commencer à être érigés et maintenus en divers sites des États-Unis, reflétant la diversité des conditions environnementales et climatiques du territoire américain. Ces panneaux d'exposition ont été jusque là des pratiques courantes dans le commerce des peintures et vernis, comme en témoigne la figure VI.1. Mais ils sont utilisés, jusqu'à cette période clé de transition au début du 20^e siècle, en milieu confiné, et destinés aux acheteurs qui se font une idée directe de la qualité générale du produit exposé. Par contraste, les panneaux d'exposition en extérieur, qui fleurissent sur le continent après cette transition, ne sont pas destinés directement aux acheteurs, mais aux professionnels scientifiques et techniques des peintures, et intégrés dans une stratégie générale de recherche empirique sur la qualité des peintures et vernis (figs. VI.1 et VI.2).



Purchasers carefully examined test panels before giving their approval to shipments of varnish

Figure 6.1 — « Acheteurs examinant précautionneusement des panneaux de tests avant de donner leur approbation à la livraison du vernis »

Source : Bradgon et Renfrew, *op. cit.*, avec l'aimable autorisation de l'American Chemical Society. Selon Bradgon et Renfrew, les pratiques commerciales des années 1876-1896 sont marquées par une intense compétition, où la devise « *caveat emptor* » (« que l'acheteur soit vigilant ») règne



AN EXCELLENT TYPE OF TEST FENCE MAINTAINED BY THE
NATIONAL LEAD CO. AT SAYVILLE, NEW YORK

Figure 6.2 — Un panneau d'exposition « scientifique » mis en place par la compagnie National Lead Co
Source : *JCE*, septembre 1933, p. 532. Avec l'aimable autorisation de l'American Chemical Society

La trajectoire de Percy H. Walker (1867- ?), chimiste qui jouera un rôle éminent dans la diffusion et la standardisation des tests sur panneaux d'exposition en extérieur, est typique de celle des premières générations de chimistes formés à l'université et qui vont contribuer à orienter les pratiques de l'industrie des peintures et vernis vers de nouvelles bases expérimentales et théoriques. Après avoir été diplômé en chimie de l'université de l'Iowa en 1896, Walker effectue un séjour de recherches de deux semestres en Allemagne, à Heidelberg puis à Berlin. De retour aux États-Unis, il occupe diverses positions universitaires, ainsi que dans un laboratoire commercial, avant d'être embauché en 1902 par le ministère de l'Agriculture, au tout jeune Bureau de Chimie et des Sols (*Bureau of Chemistry and Soils, U.S. department of Agriculture*). En poste au Bureau de Chimie, il travaille sur l'analyse et les tests de divers produits industriels, notamment ceux concernés par le *Pure Food and Drugs Act*, comme les alcools et les sucres, mais également sur les alliages et les minerais. Il est membre de la Société américaine de chimie depuis 1893¹⁸.

Selon Heckel, ce sont les recherches de Walker et d'un autre chimiste du Bureau de Chimie qui ont induit la communauté technico-scientifique des peintures en gestation au milieu des années 1900 à entreprendre de vastes essais de durabilité des peintures sur panneaux d'exposition. Walker et son collègue se sont en effet rendus compte que des peintures et revêtements de composition chimique similaire peuvent toutefois présenter des comportements très différents face à la corrosion des surfaces métalliques qu'ils recouvrent. Ayant communiqué leurs résultats à la Société américaine de tests et matériaux (*American*

¹⁸ C.E. WATERS, « American contemporaries –Percy Hargraves Walker », *JIEC*, vol. 24 (1932), pp. 834-5

Society for Testing and Materials, ASTM), une société partenaire du Bureau de Formation de l'Association des Fabricants de Peinture, l'ASTM propose au Bureau de Formation de financer une vaste campagne de tests de peintures sur panneaux d'exposition, afin de déterminer empiriquement la résistance des peintures mixtes et pures face à la corrosion et l'action de l'environnement. En 1908, des panneaux en acier recouverts de diverses formulations mixtes et pures sont érigés à Atlantic City (New-Jersey, sur la côte Atlantique) et à Pittsburgh (Pennsylvanie), à environ 600 km à l'ouest de New-York¹⁹. Rapidement des panneaux en bois sont aussi mis en place à Fargo, dans le Dakota du Nord, en collaboration avec Ladd.

Représentant l'industrie des peintures mixtes, c'est avec un plaisir qu'il dissimule à peine qu'Heckel cite les résultats de ces premières études sur panneaux d'exposition, qui constituent selon lui « une proposition quasi-révolutionnaire » :

Une mixture de deux ou plus de pigments blancs primaires (blanc de plomb, oxyde de zinc, blanc de plomb sublimé, etc.), lorsqu'utilisée seule ou en combinaison avec un petit pourcentage de pigments inertes (barytes, silices, alumino-silicates, silices de magnésium, etc.) constitue une peinture bien supérieure à celle constituée d'un seul pigment²⁰.

L'impact de ces résultats, qui s'opposent frontalement aux acquis patiemment élaborés par les praticiens liant pureté et qualité du pigment, se diffuse rapidement parmi la frange des chimistes travaillant dans l'industrie des peintures. Le chimiste Louis S. Hughes, pourtant en poste à la Peacher Lead Company, c'est-à-dire représentant les peintures pures au plomb, estime que les résultats des panneaux d'Atlantic City sur des pigments blancs « purs » « illustrent l'égarément de la doctrine de la “pureté” comme critère de fiabilité »²¹. Se pose alors à cette frange de chimistes la délicate question de l'interprétation – et surtout de l'explication – de ces résultats. Si la pureté du pigment n'apparaît plus comme le seul gage de sa qualité, ou de sa tenue générale vis-à-vis des intempéries que la peinture associée est vouée à affronter, alors quels autres gages de qualité esquisser ? Quels nouveaux critères établir pour statuer sur la qualité d'un pigment ou d'une peinture ? C'est à ces questions que les chimistes en prise avec les peintures vont devoir s'atteler en ce début de siècle.

Composition et microstructures – la diffusion du microscope

Face à l'étendue de ces questions, les chimistes ont trouvé un allié de poids dans le secteur de la métallurgie, où les mêmes questions se posent et où la pénétration du microscope optique, qui accompagne ce questionnement, devient plus systématique dans les laboratoires industriels américains à partir de 1900. Si deux alliages de même composition chimique ont des comportements physiques et mécaniques distincts, c'est que l'organisation microscopique

¹⁹ Guy B. HECKEL, « The outlook for paint manufacture », *Annals of the American Academy of Political and Social Science*, vol. 34 (1909), pp.69-73 ; –, « A century of progress in the paint industry », *JCE*, vol. 11 (1934), pp. 487-493

²⁰ Cité dans HECKEL, *The outlook*, op. cit., p. 72

²¹ L.S. HUGHES, « The development of paint formulae », *JIEC*, vol. 3 (1911), pp. 39-41

des différentes phases qui constituent l'alliage n'est pas la même pour les deux alliages, et que cette différence d'organisation est responsable de la différence de comportement des alliages²². Les chimistes spécialistes des peintures font les mêmes constats que les métallurgistes quelques années ou décennies auparavant, et proposent les mêmes orientations expérimentales et théoriques pour continuer à améliorer la qualité de leurs produits :

L'analyse chimique, écrit Hughes en 1911, même lorsqu'elle est fiable, a échoué à rendre compte des vastes écarts observés dans le comportement des peintures de composition similaire, et cette méthode d'examen a été largement déconsidérée parmi une majorité de peintres et fabricants de peintures. [...] Alors que le microscope en est venu à être de plus en plus utilisé, il est devenu évident que la structure et la taille des particules sont d'une importance aussi grande que la composition chimique.²³

De même, selon Thompson, le traitement scientifique des peintures ne saurait se restreindre à l'analyse chimique, c'est-à-dire à la détermination de la composition des pigments et du véhicule en termes d'éléments chimiques. Aussi important à ses yeux, et négligé jusqu'à présent, est la compréhension « scientifique » des propriétés physiques des peintures – leur couleur et pouvoir opacifiant, leur vieillissement et réaction aux stimuli de l'environnement. Cette compréhension est tributaire d'une meilleure connaissance de la microstructure des pigments, leur taille, forme, et organisation dans le véhicule :

Les chimistes sont plus enclins à considérer les pigments sous leur aspect chimique, plutôt que physique. C'est, pour eux, une pratique courante que d'analyser un pigment donné ; et ensuite, à partir de cette analyse, de s'assurer que cette composition s'accorde avec ce qu'ils pensent être une composition standard, afin de statuer sur la qualité du pigment. La négligence de l'étude des propriétés physiques a été la cause d'un énorme gaspillage d'argent, de temps et d'effort dans la fabrication des peintures. L'analyse est sans doute le moyen le plus éclairant que le fabricant de peintures possède, mais son examen ne doit pas s'arrêter là. Trop peu d'études ont été consacrées à la taille et à la forme des particules de pigment et leur relation physique au véhicule utilisé²⁴.

Suivent de nombreuses images d'échantillons de pigments photographiés au microscope, ainsi qu'un exposé sur leur forme et leur immixtion au véhicule, assortis d'une longue discussion sur les liens entre ces caractéristiques microscopiques et les propriétés physiques de la peinture. Il est probable que ces chimistes, alors qu'ils se détachent lentement de la composition comme paramètre explicatif principal pour se tourner vers les microstructures, se soient inspirés des acquis de la métallurgie et des pratiques ayant cours dans ses laboratoires lorsqu'ils ont initié cette transition. Car les industries métallurgiques et des peintures et vernis se sont développées, dans les dernières décennies du XIX^e siècle, dans un état d'interdépendance économique, technique et scientifique de plus en plus marqué. En particulier à travers l'industrie ferroviaire, qui consomme une fraction importante de la production américaine d'enduits et de revêtements protecteurs, les échanges scientifiques et

²² Nicole CHEZEAU, *De la forge au laboratoire. Naissance de la métallurgie physique*, pp. 107-112. Voir aussi chapitre 1

²³ HUGHES, *The development*, *op. cit.*, pp. 39-40

²⁴ *Ibid.*, p. 89

techniques s'intensifient entre ces secteurs au tournant du siècle. Ainsi les chimistes spécialistes des peintures citent régulièrement les travaux de Charles B. Dudley (1842-1909), titulaire d'un doctorat de Yale et employé par la compagnie des chemins de fer de Pennsylvanie. Dudley a largement contribué à initier aux États-Unis les études sur les propriétés physiques des alliages utilisés dans l'industrie ferroviaire et à standardiser les matériaux de construction pour cette industrie ; il a joué un rôle essentiel dans la mise en place de l'ASTM en 1898. Significativement, c'est le comité « revêtements protecteurs pour le fer et l'acier » de l'ASTM (comité E) qui est affilié à la Section Scientifique du Bureau de Formation pour superviser les essais de peintures sur les panneaux. Ce comité de l'ASTM est rebaptisé en 1910 « revêtements protecteurs pour les matériaux à structure » (*structural materials*, comité D1), et Walker en est nommé secrétaire²⁵.

Il n'est donc pas surprenant que l'introduction du microscope dans le secteur des peintures suive de près son implantation dans le secteur de la métallurgie. Dès 1910, les laboratoires des grandes firmes comme National Lead et Peacher Lead sont dotés d'équipements microscopiques. Du Pont, qui n'est pas encore implanté dans les marchés des peintures, s'équipe en 1911 d'un microscope en s'inspirant de l'exemple des laboratoires en métallurgie (cf. section suivante). L'instrument pénètre également à peu près au même moment le laboratoire de la Section Scientifique du Bureau de Formation. Dirigé par Henry A. Gardner, il est transféré en 1910 des locaux de la compagnie Harrisons Brothers à Philadelphie vers une institution typique des coopérations universitaires-industrielles qui se multiplie : l'*Institute of Industrial Research* de Washington, qui est un ensemble de laboratoires financés par les entreprises, mais où l'équipe pédagogique, ou les étudiants de l'Université de Washington, peuvent effectuer des recherches ponctuelles. Le microscope et l'ultramicroscope s'y implantent en même temps que l'étude des propriétés physiques des peintures²⁶.

L'examen au microscope des peintures mixtes permet d'envisager des explications à l'effet bénéfique des additifs ajoutés dans les peintures au plomb ou au zinc, comme les silices ou les barytes. Les études de durabilité sur panneaux d'exposition ont fait apparaître que ces additifs, dans certains cas loin de dégrader la qualité de la peinture, favorisent au contraire sa durabilité ou son pouvoir opacifiant. De ce fait, ces additifs ne sont plus considérés exclusivement comme des « adultérants », mais parfois comme des « pigments de renforcement » (« *reinforcing pigments* »), des « rallongeurs » (« *extenders* ») ou des agents de charge (« *fillers* »). En particulier, un phénomène a intrigué les fabricants et chimistes : l'ajout de pigments de renforcement cristallins, plus grossiers que les pigments solides opaques au zinc et au plomb, renforce le pouvoir opacifiant de la peinture. Cet effet bénéfique des particules grossières contredit un autre acquis majeur partagé dans la communauté des peintures – avec celui de la pureté – : plus le pigment est finement dispersé, meilleure est la qualité de la peinture. En outre, fabricants et chimistes ne voient pas très bien comment l'ajout

²⁵ BRAGDON et RENFREW, *Paint, varnish and plastic chemistry*, op. cit. p. 1277

²⁶ Henry A. GARDNER, « Notes on some physical characteristics of pigments and paints », *JIEC*, vol. 8 (1916), pp. 794-797

d'une substance cristalline, c'est-à-dire *a priori* perméable à la lumière, peut augmenter le pouvoir opacifiant de la peinture, c'est-à-dire sa capacité à recouvrir optiquement une surface en empêchant la réflexion des rayons incidents sur la surface couverte. À partir de l'examen au microscope de fines couches de peintures contenant ces additifs grossiers et cristallins, Hughes fournit l'explication suivante : la taille plus importante et la forme plus rugueuse des additifs grossiers entraînent, par capillarité, une augmentation de l'épaisseur de la couche ; son pouvoir opacifiant est donc plus important.

Bien d'autres phénomènes font l'objet d'une tentative d'explication à la lumière de cette approche microstructurale, comme le pouvoir d'absorption des pigments, c'est-à-dire la quantité de liant qu'un volume donné de pigment peut absorber en une pâte homogène. La deuxième édition de la monographie de Maximilian Toch, *The Chemistry and Technology of Paints*, publiée en 1916, comporte 83 planches photomicrographiques permettant d'identifier et d'isoler les pigments de renforcement ou agents de charge – carbonates de calcium, silices, argiles, amiante – des pigments « purs » – zinc et plomb. Mais cet examen microscopique ne suffit pas à rendre compte de l'effet de l'additif sur la peinture, et *a fortiori* ne permet pas d'anticiper sur son impact global sur la tenue de la peinture, bénéfique ou néfaste. L'empirisme règne pour déterminer si l'additif est effectivement un « pigment de renforcement » ou un « adultérant » :

Ces matériaux, écrit Toch en introduction au chapitre sur les additifs, qui ont parfois été appelés des "pigments de renforcement", sont utiles lorsqu'ils sont utilisés dans des proportions modérées ; néanmoins aucun chimiste des peintures n'est en mesure d'affirmer dans quelle mesure ces matériaux peuvent être classés comme adultérants, ou dans quelle mesure ils peuvent être classés comme des agents de charge inertes ou des pigments de renforcement. Lorsque cette question se fait pressante, le sens commun, le jugement et la pratique experte permettent de trancher.²⁷

Il ne fait pas de doute que le microscope ait joué un rôle considérable dans l'amélioration des produits et procédés dans le secteur des peintures dès sa diffusion à partir des années 1900. Cependant son pouvoir de résolution limité a, en pratique, découragé les chimistes convaincus de l'importance d'une connaissance quantitative de la taille des pigments et des additifs. Son apport, au cours de deux premières décennies de son implantation, s'inscrit globalement dans une démarche qualitative. Les photomicrographies introduites par Toch servent simplement à illustrer la forme ou l'aspect des pigments et additifs, et comportent très rarement des indications sur leur taille. L'analyse chimique domine encore sa monographie, et, on peut le penser, les tests expérimentaux encore en vigueur parmi les chimistes des peintures. L'ambition quantitative, la détermination précise de la taille des particules de pigment, et la corrélation avec les propriétés optiques de la peinture, ne prendra son essor que dans l'après-Première Guerre mondiale. La généralisation et la standardisation des tests physiques, la réorganisation des chimistes au sein des laboratoires des grandes firmes qui dominent de plus

²⁷ M. Toch, *The chemistry and technology of paints*, New York, D. van Nostrand Co., 2^{nde} édition 1916, p. 110

en plus le marché des pigments et peintures, et la mobilisation d'instruments au pouvoir de résolution élevé, vont s'agencer pour réaliser cette ambition.

Essor de l'industrie chimique américaine, consommation de masse et nouveaux modes de spécification des peintures dans l'entre-deux guerres

Le rôle accru du gouvernement fédéral – le Bureau des Normes et sa section des peintures

La Première Guerre mondiale a révélé l'importance cruciale de l'industrie chimique aux yeux du gouvernement fédéral. La mobilisation de l'industrie chimique lors de l'engagement américain dans le conflit, principalement sur les explosifs et les engrais azotés, a été déterminante pour que les États-Unis puissent soutenir leur effort de guerre dans la durée, notamment dans l'approvisionnement en armes et pour assurer leur indépendance alimentaire. Réciproquement, le haut degré de planification économique mis en œuvre lors de la préparation des États-Unis au conflit et pendant son engagement – opéré institutionnellement par le *War Industries Board*, le Comité des industries de guerre – a fait apparaître la portée de l'interventionnisme fédéral aux yeux des industriels et des hommes d'affaire. Selon l'historien de l'industrie chimique américaine William Haynes, au cours du conflit « le gouvernement a tout d'un coup réalisé l'importance des produits chimiques, et l'industrie chimique est devenue de plus en plus consciente de “Washington” »²⁸. En dépit du démembrement du *War Industries Board* quelques mois après la signature de l'armistice, les connexions entre le gouvernement et l'industrie chimique établies durant la guerre vont se prolonger dans l'après-guerre. Dès 1919 en effet, le ministère du Commerce met en place un « Service de Coopération Industrielle » chargé de perpétuer certaines des prérogatives et missions du *War Industries Board* ; un secrétaire est désigné au sein de ce service pour représenter l'industrie chimique.

Cette perpétuation de l'interventionnisme fédéral dans l'après-guerre est légitimée aux yeux des acteurs industriels et des *businessmen*, qui adhèrent pourtant dans leur ensemble au moule de la politique économique américaine d'essence libérale et de l'idéologie du *free-market* (le marché libre), par la dépression économique qui caractérise l'immédiat après-guerre, courte mais intense, et la transition d'une économie de guerre à une économie de paix que chacun espère prospère. Un élément clé dans cette période de transition reflétant ce compromis interventionniste est la nomination en 1921 de l'ingénieur Herbert C. Hoover au poste de ministre du Commerce, tentant de mettre en œuvre sa vision de l'« état associationniste ». Admiratifs des techniques taylorienne de « management scientifique » et fordiste alors en gestation, Hoover et ses alliés vont lancer une « croisade pour la standardisation » visant à utiliser de manière plus efficace les ressources naturelles et les matières premières américaines, à réduire les déchets dans la production et les transports, et à uniformiser les produits et les procédés dans l'ensemble des secteurs industriels. Le Bureau

²⁸ HAYNES, *American chemical industry, op. cit.*, vol. III, p. 416

des Normes (*National Bureau of Standards*, situé dans les environs de Washington), qui relève de l'autorité du ministère du Commerce, est alors considéré comme l'organe gouvernemental idoine pour initier cette « croisade ». Peu après la prise de fonction de Hoover au ministère du Commerce, est institué un « Comité de spécifications fédérales » (*Federal Specification Board*), dont l'essence est l'unification de l'approvisionnement en matériaux – dont les peintures – et la simplification des procédures d'achat par l'ensemble des agences gouvernementales. Les spécifications des matériaux issues du Bureau des Normes, et validées par ce Comité, deviennent des standards officiels, reconnus par le gouvernement comme par les industriels qui l'approvisionnent²⁹.

Cette inflexion vers la standardisation comme moyen pour performer sur l'efficacité technique va de pair avec l'essor de la consommation de masse et la focalisation, dans la pensée économique, sur la figure du consommateur, notamment dans les textiles (cf. chapitre précédent). Les années 1920 sont aussi celles de la maturité de ce que l'historienne Carolyn Goldstein appelle les « médiateurs » de la consommation : les « économistes domestiques » (*home economists*), qui se sont faits de Hoover un allié, et cherchent à « éduquer » les citoyens Américains dans leurs pratiques de consommation courantes, « domestiques », ainsi qu'à orienter l'ensemble du système de production sur la satisfaction du consommateur³⁰. L'industrie des peintures évolue avec ce double-mouvement de standardisation et de focalisation sur le consommateur, ne serait-ce que parce que les peintures constituent des matériaux essentiels à cette consommation « domestique », à la fabrication et la personnalisation des « foyers » – comme l'exprime si bien la vignette anglo-saxonne *home, sweet home*. L'habitat privé est devenu un terrain où la culture de la consommation a pu s'exprimer avec force dans l'entre-deux guerres³¹. Il est d'ailleurs remarquable que les grandes initiatives sur la standardisation se développent en parallèle avec un vaste programme fédéral pour promouvoir la propriété immobilière et l'habitat privé, programme dans lequel s'insère le Bureau des Normes. Hoover lui-même est actif dans le mouvement « *Better Homes in America* », initié par le gouvernement fédéral en 1922. La construction de nouvelles maisons augmente alors fortement, et pendant les 8 années du programme, entre 1922 et 1929, environ 750 000 nouveaux foyers (*homes*) sont construits annuellement, ce qui représente le double du taux de construction pour l'année 1921³².

Plus de foyers, donc plus de peintures et de vernis. La production nationale est doublée entre 1914 et 1925³³, ce qui ne veut pas dire que le développement de la propriété immobilière est

²⁹ Rexmond C. COCHRANE, *Measures for progress. A history of the National Bureau of Standards*, Washington (D.C.), U.S. Department of Commerce, 1966, pp. 229-37 & 253-62

³⁰ Carolyn M. GOLDSTEIN, « Educating consumers, representing consumers : reforming the marketplace through scientific expertise at the Bureau of Home Economics, U.S. department of Agriculture, 1923-1940 », in Alain Chariot *et al.* (eds.), *The expert consumer : associations and professionals in consumer society*, Aldershot, Ashgate, 2006, pp. 73-88

³¹ C. M. GOLDSTEIN, *Do it yourself. Home improvement in twentieth century America*, New York (NY), Princeton Architectural Press, 1998

³² COCHRANE, *Measures for progress, op. cit.*, pp. 249-53

³³ En dollars courants, la production de pigments, peintures et vernis grimpe de 147 à 482 millions de dollars entre 1914 et 1925, ce qui, compte tenu de l'inflation entre ces deux années, représente une multiplication par

seul responsable de cet essor du secteur des peintures et vernis. Mais les consommateurs américains sont-ils satisfaits des peintures qu'ils achètent ? Les fabricants peuvent être de bonne foi quand ils affirment que la formulation utilisée est gage de la qualité de leur produit ; tandis que les consommateurs, pour qui la différence entre un pigment au plomb, au zinc ou au titane, ou entre une résine synthétique et naturelle ne saute pas forcément aux yeux, peuvent également être de bonne foi s'ils s'affirment déçus, à l'utilisation, par le produit en question. Comment arbitrer ? Comment spécifier les produits de telle manière à ce que acheteurs et producteurs évitent conflits et procès ? Comme pour les textiles, le Bureau des Normes va accompagner le développement de l'industrie des peintures autour de ce diptyque standardisation/consommation, en développant et sanctionnant les méthodes de test et les grandeurs « objectives » à même de statuer sur la qualité d'un produit. Percy Walker, qui a contribué quelques années auparavant à initier les recherches sur panneaux d'exposition en conditions réelles, va se retrouver au cœur de ce processus alors qu'il rejoint le Bureau en 1914, et y institue la section « peintures et vernis », rattachée à la division chimie du Bureau. Au cours des années 1920 les spécifications des peintures basculent de la composition aux propriétés physiques – la « performance » –, un basculement promu délibérément par le Bureau, et en particulier par Walker :

Tandis que la composition donne une indication de la qualité, elle n'est cependant pas un moyen d'évaluation infaillible. La performance [« *performance* »], quand elle peut être définie, est un guide bien plus sûr. Percy H. Walker, chimiste des peintures (« *paint chemist* ») au Bureau National des Normes, et qui a contribué à la politique visant à élaborer les spécifications gouvernementales pendant la Première Guerre mondiale et pour un certain nombre d'années par la suite, a été un pionnier pour défendre ce point de vue.³⁴

La guerre a en effet accéléré ou initié l'uniformisation des spécifications pour les peintures et vernis consommés par l'ensemble des agences ou services gouvernementaux. Le *War Industries Board* a promu l'adoption par l'ensemble des ministères des mêmes spécifications et des mêmes produits. A son démantèlement en 1919, le Bureau des Normes s'est approprié cette mission d'uniformisation des spécifications, et a institué un Comité interministériel pour la standardisation des spécifications des peintures et vernis. Mais les spécifications publiées par le Bureau en 1919 sont toujours dominées par l'analyse chimique et la composition : ces spécifications statuent sur des pourcentages minima de tel ou tel constituant pour le pigment et le véhicule³⁵.

Au sortir de la guerre cependant, Walker cherche à s'affranchir de l'analyse et de la composition comme mode exclusif de spécification des vernis et peintures : « Du point de vue du consommateur », écrit-il en 1926, « il n'y aurait aucune raison à effectuer le travail chimique [d'analyse] si nous disposions de méthodes précises et reproductibles pour définir et

deux de la valeur produite dans l'absolu. Source : Anna Hazel SWIFT, « Changes in the chemical industry during the past twenty-five years », *JIEC*, vol. 20 (1928), pp. 657-662

³⁴ BRAGDON et RENFREW, *Paint, varnish and plastic chemistry*, op. cit. p. 1277

³⁵ COCHRANE, *Measures for progress*, op. cit., p. 257

déterminer les propriétés physiques des peintures à la fois dans leur boîte et pendant les phases d'application et de séchage »³⁶. Cet article que Walker publie dans le *Journal of Chemical Education* retrace le développement de la section des peintures au Bureau et l'évolution de ses grandes orientations dans l'après-guerre, aussi il n'est peut-être pas superflu d'en donner un aperçu synthétique et d'en citer quelques extraits. Dans le contexte de la politique volontariste d'Hoover à réduire les déchets et à uniformiser les sources d'approvisionnement en matériaux pour le gouvernement, les modes de spécification promus pendant la guerre, dominés par l'analyse de la composition, montrent clairement leurs limites :

Il y a quelques années presque tous les échantillons reçus étaient envoyés pour examen [au Bureau] afin de déterminer si certains impératifs de composition ou certaines garanties étaient respectés. Dans bien des cas à cette époque les méthodes d'analyse disponibles étaient inadéquates ou peu fiables. [...] Les spécifications sur les peintures et vernis étaient très hétérogènes et dans bien des cas inutiles pour distinguer les matériaux satisfaisant des autres. [...] Ainsi pour un même type de matériau il y avait de nombreuses spécifications, plus ou moins distinctes l'une de l'autre. Dans bien des cas ces différences n'étaient fondées sur aucune considération pratique de qualité, et la nature des spécifications faisait qu'un matériau serait accepté par une branche du Service [gouvernemental] et rejeté par une autre, même lorsque [ces spécifications] étaient exprimées de la même manière et orientées pour les mêmes usages.³⁷

Le Bureau des Normes se retrouve ainsi au cœur d'un nouveau processus d'arbitrage entre producteurs et consommateurs qui émerge de ce double mouvement de standardisation/consommation de masse, « orienté usage » : « Il est évident que pour tester n'importe quel matériau pour l'ensemble des usages associés, et pour émettre un rapport qui ait quelque valeur pour l'acheteur non-technique tout en étant parfaitement juste [« fair »] avec le producteur, une forme de spécification définie précisément est nécessaire »³⁸. Or si le consommateur – ou l'« acheteur non-technique » – acquiert une place grandissante dans l'ensemble du système de production-consommation, la composition des produits devient secondaire par rapport à leur « performance », ce que Walker a parfaitement compris :

L'analyse chimique sera toujours d'une grande valeur pour le fabricant, qui doit l'utiliser pour contrôler les opérations de production et pour l'aider à dupliquer le produit d'un rival ; mais le consommateur est avant tout intéressé par les propriétés physiques du matériau qu'il achète ou qu'il utilise. S'il pouvait déterminer toutes les propriétés désirables et indésirables du produit fini, il ne serait alors pas plus intéressé par la composition de la peinture qu'un homme achetant une scie serait intéressé par le minerai, la coke et le fondu utilisé pour produire l'acier utilisé pour la scie.³⁹

³⁶ Percy WALKER, « Paint and varnish research at the Bureau of Standards », *JCE*, vol. 3 (1926), pp. 777-784, citation p. 781

³⁷ *Ibid.* p. 779-80

³⁸ *Ibid.* p. 779

³⁹ *Ibid.* p. 781

Les propriétés physiques des peintures et vernis en viennent ainsi à constituer un axe prioritaire de la recherche sur les nouveaux types de tests et modes de spécification dans l’après-guerre. « Propriété physique », cependant, est d’une acception plus large que « propriété chimique », qui désigne la composition de la peinture ou ses propriétés de combinaison – d’affinité – avec d’autres substances. La couleur est comprise comme une propriété physique, et dès 1917 la section dirigée par Walker délimite une ligne budgétaire dédiée à la standardisation des couleurs, qui s’élève annuellement à 10 000\$ (170 000 [2010]\$). Cette ligne budgétaire perdure jusqu’à 1935 au moins, et mobilise des physiciens universitaires comme August Herman Pfund ainsi que la division optique du Bureau⁴⁰. Pfund est également consultant pour Du Pont pendant toute la période de l’entre-deux guerres, car l’ambition d’instrumentaliser et d’objectiver les propriétés de couleur, de s’affranchir de l’œil, constitue un travail de longue haleine (cf. chapitres 4 & 8). Les différentes grandeurs permettant de mesurer le pouvoir opacifiant du pigment ou de la peinture (*hiding power* et *tinting strength*) sont aussi considérées comme des propriétés physiques, et le Bureau est également travaillé par la recherche de définitions et de tests permettant de quantifier ces grandeurs. Cette ambition à la quantification des grandeurs physiques est une volonté générale de cette section, qui comprend également la quantification du vieillissement et de la détérioration des peintures et vernis exposés aux intempéries sur les panneaux d’essai⁴¹. Cette volonté de quantifier les propriétés dérive de ce nouveau processus d’arbitrage entre producteurs et consommateurs et dans lequel le Bureau des Normes se trouve en prise : « Les fabricants souhaitent des labels pour identifier ou garantir que leurs biens répondent aux normes qu’ils ont adoptées, et les consommateurs souhaitent l’information et la protection [que ces labels et normes] permettent »⁴².

En tant qu’agence du gouvernement fédéral placée sous l’autorité du ministère du Commerce, la vocation du Bureau est le bien-être économique de la nation ; sa section des peintures et vernis est dédiée au développement de l’ensemble du secteur industriel associé, et pas de telle compagnie ou tel produit du secteur en particulier. Aussi Walker rappelle que sa section ne saurait, en règle générale, effectuer des tests sur un produit issu d’une compagnie privée ou d’un fabricant individuel ; les relations industrielles de la section privilégient les contacts avec les associations de producteurs, comme l’Association des Fabricants de Peintures, plutôt qu’avec les entreprises individuelles. Cette politique industrielle de la section, qui est représentative de la politique industrielle de l’ensemble du Bureau, incline les compagnies à mettre sur pied leurs propres laboratoires de tests et essais, du moins celles qui ont les moyens de se le permettre.

C’est au sein des grands laboratoires hébergés par ces compagnies que vont s’initier les premiers programmes d’envergure sur la quantification des microstructures. Comme nous le verrons, la quantification des propriétés physiques constitue une base théorique, expérimentale et instrumentale essentielle à l’essor de la quantification des microstructures.

⁴⁰ *Ibid.* et COCHRANE, *Measures for progress, op. cit.* appendix G

⁴¹ WALKER et E.F. HICKSON, « Accelerated tests of organic protective coatings », *JIEC*, vol. 20 (1928), pp. 591-6

⁴² COCHRANE, *Measures for progress, op. cit.*, p. 261

Quantification des propriétés physiques et des microstructures se mêlent inextricablement dans l'entre-deux guerres dans ces laboratoires industriels. Ces programmes sont initiés dans les laboratoires industriels, et non dans les laboratoires gouvernementaux comme ceux du Bureau des Normes, car ils répondent à des priorités qui ne sont pas celles du Bureau – les brevets et l'amélioration des produits et procédés. Du Pont et la New Jersey Zinc Company sont certainement parmi les compagnies chimiques pionnières dans cette ambition réductionniste, et qui l'ont poursuivie avec le plus d'assiduité.

La rivalité Du Pont – New Jersey Zinc Co.

Du Pont s'insère dans le secteur des peintures et vernis en 1917, alors qu'elle achète la compagnie Harrisons Brothers de Philadelphie, qui est bien implantée dans le marché du lithopone. L'acquisition de cette compagnie anticipe sur la diversification ambitieuse qui caractérise la stratégie de croissance de Du Pont dans l'après-guerre, et d'autres entreprises de peintures et vernis moins importantes sont acquises. Suite à des retours sur investissement jugés insuffisants dans ce secteur notamment, Du Pont change radicalement sa stratégie organisationnelle, et adopte une structure largement décentralisée fin 1921. Les structures et capacités industrielles issues des firmes de peintures acquises sont alors organisées en un département industriel plus ou moins autonome, le département des Peintures, rebaptisé deux ans plus tard le département des Peintures et Laques (*Paint, Lacquer and Chemicals*)⁴³. Cependant, ce changement organisationnel majeur révèle d'autres préoccupations que les seuls enjeux économiques, que les seuls retours sur investissements des différentes lignes de produits et marchés parmi lesquels Du Pont cherche à s'insérer dans l'après-guerre. La décentralisation manifeste également les tensions et conflits qui se sont installés entre les équipes travaillant en usine, et le département de Chimie, dont le directeur Charles Reese a progressivement centralisé en son sein l'ensemble des activités de « recherche et autres sujets techniques ». Activités qui incluent les pratiques de contrôle et d'analyse routinières, et dont la main-mise par le département de Chimie n'est pas sans générer des réticences et tensions vis-à-vis du personnel travaillant dans les usines, qui se sent dépossédé de ses compétences et prérogatives légitimes. Ces tensions sont particulièrement manifestes en ce qui concerne les relations entre le département de Chimie et les usines de peintures et vernis acquises par Du Pont (cf. chapitre 3).

Mais ces activités de « recherche et autres sujets techniques » ne peuvent pas facilement être compartimentées en une part « recherche » d'un côté, qui reviendrait au département de Chimie, et une part « autres sujets techniques » qui reviendrait aux laboratoires des usines, pour leurs tâches expérimentales quotidiennes de l'autre. En pratique, ces activités constituent un continuum. Les tests et analyses qui sont familiers des chimistes employés dans les usines pour vérifier la qualité d'un produit ou le bon fonctionnement d'un procédé portent avec eux une « vision » des substances et matériaux ; ces tests et analyses performant sur leur mode de classification et de spécification, c'est-à-dire sur leur ontologie (cf. chapitre 1). L'essor du

⁴³ H&S, pp. 138-9 & 210-1

département de Chimie au cours des années 1910 mène à des positions managériales clé de jeunes chimistes avec une longue formation universitaire. Hamilton Bradshaw, un des premiers docteurs en chimie embauchés par Du Pont (doctorat obtenu en 1905 à Johns Hopkins, et embauché directement par Du Pont), est typique de ces premières générations de chimistes hautement qualifiés qui pénètrent l'industrie des peintures et vernis et souhaitent la réformer sur une « base scientifique » :

« Nous devrions implanter à la Station », écrit Bradshaw en 1920 alors qu'il est directeur de la Station, « un laboratoire de tests sur les peintures et vernis correctement équipé. [Ce laboratoire permettra] la simplification des nombreuses formulations sur la base scientifique des comparaisons systématiques des tests de qualité »⁴⁴. Le laboratoire de tests que Bradshaw a en tête pour la Station n'est pas neutre quant aux pratiques ayant cours dans les sites de production, puisqu'il s'agit de réduire la prépondérance de la formulation, et de concevoir des tests de qualité pour orienter ces pratiques. Bradshaw porte une autre « vision » sur les peintures ou vernis que celle ayant cours parmi le personnel des usines. C'est le même Bradshaw qui, peu après, alors que le démantèlement du département est imminent, estime que « le travail de la Section des Standards [du département de Chimie], à la fois sur les produits et les spécifications, [...] est le mieux à même d'être réalisé en un seul endroit pour l'ensemble des départements industriels »⁴⁵. Un rapport sur les pigments remis à peu près au même moment permet de saisir à quel point les chimistes de la Station sont dépendants de l'expérience des chimistes et ouvriers affectés aux usines : les tests de qualité utilisés par les chimistes de la Station pour leurs propres recherches sont certainement ceux en vigueur dans les usines ; par exemple le test de finesse du lithopone inséré dans son véhicule, qui s'effectue « à la spatule », et reste donc extrêmement sensible à l'appréciation du testeur : « Selon la détermination à la spatule, les quatre matériaux [zinc, barium, pigment neutre, standard de laboratoire] étaient d'une finesse à peu près égales ». Ou pour le test de « force » (« *strength* »), qui statue sur la tonalité du pigment : « Les quatre pigments ont à peu près la même force, le barium comportant un ton légèrement plus pur ». Ou encore pour la couleur : « Pour la couleur, le pigment neutre est le plus propre, et le standard de laboratoire le plus pauvre. Ce dernier a un ton plus vert, tandis que les trois autres sont davantage portés sur le rouge »⁴⁶.

C'est précisément pour s'affranchir des « à peu près » et surtout des tests ayant cours dans les usines, globalement qualitatifs, que Bradshaw milite pour l'instauration d'un laboratoire de peintures et vernis hébergé par le département de Chimie et placé sous son autorité, dont les tests seraient valables d'un produit à l'autre et indépendants de l'appréciation du personnel qui le fabrique ou le manipule quotidiennement. Sa conception

⁴⁴ Lettre, Bradshaw à W.M. Whitten (directeur assistant de la Station), 7 mai 1920, CRD 18/Chemical Department 1917-1926 ; informations biographiques sur Bradshaw tirées du *American Men of Science*, 9^e édition (1955)

⁴⁵ Mémoire, H. Bradshaw à Reese, non-daté, probablement octobre 1921, CRD 18/ Chemical department 1917-1926

⁴⁶ H.E. Eastlack et H.C. Graebner, « Pigments. Light-stable lithopone. Effect of method of precipitation upon hardness and ease of grinding in oil », Experimental Station report B-189-7, 3 janvier 1921, CRD 10

d'un laboratoire « scientifique » sur les peintures et vernis s'aligne remarquablement sur le virage qu'est en train de prendre à peu près au même moment le laboratoire du Bureau des Normes. Au sortir de la guerre en effet Walker commence à remplacer la composition des vernis par quelques « tests physiques simples » comme critère de spécification des peintures⁴⁷. Il est probable que l'équipe de la Station en prise avec les peintures et vernis se soit inspirée des laboratoires associés les plus « modernes » comme celui du Bureau et de la Section Scientifique de l'Association des Fabricants de Peinture.

Mais le bouleversement organisationnel de 1921 freine la réalisation de ce laboratoire polyvalent sur les peintures et vernis, placé sous l'autorité du département de Chimie. Deux chimistes de la Station continuent cependant à développer des tests sur les « propriétés physiques » des peintures et vernis, en particulier sur le lithopone. James E. Booge (1890- ?), qui sera un des acteurs clé de l'ouverture plus intense de Du Pont aux pigments de titane quelques années plus tard, et H.E. Eastlack, jeune docteur embauché par Du Pont depuis 1918. Booge et Eastlack sont tous les deux titulaires d'un doctorat de l'université Columbia à New-York, qu'ils ont obtenu la même année, en 1916 ; Booge dans la spécialité physico-chimie, et Eastlack dans la spécialité chimie inorganique⁴⁸. Ils font appel au professeur de physique de l'université Johns Hopkins Herman Pfund, consultant pour Du Pont tout au long de la période de l'entre-deux guerres. Pfund a collaboré avec le laboratoire de la Section Scientifique de Washington, et peut-être également avec le laboratoire du Bureau des Normes. Il est également consultant pour la New Jersey Zinc Company, avec laquelle Du Pont se retrouve rapidement en compétition, puis en conflit, sur le lithopone (cf. ci-après). Au cours de ses contacts avec ces laboratoires industriels et gouvernementaux, Pfund a mis au point des instruments ou méthodes pour mesurer les propriétés physiques des peintures et vernis, le « colorimètre » et le « cryptomètre ». Le colorimètre permet, selon Booge, « d'exprimer quantitativement et analytiquement de petites différences de couleur entre deux pigments »⁴⁹. Le cryptomètre permet de mesurer le pouvoir opacifiant (*hiding power*) d'un pigment⁵⁰.

D'autres méthodes permettant de mesurer ou d'estimer les propriétés d'élasticité et de viscosité, d'absorption du solvant, de finesse du pigment, ou la proportion de moisissure, sont mises au point à la Station dans la première moitié des années 1920. Comme le font remarquer Booge et Eastlack dans un article destiné à la communauté professionnelle des peintures, ce n'est pas que ces propriétés et méthodes étaient jusqu'alors inconnues ou inintéressantes, mais elles diffèrent tellement d'un producteur à l'autre, ou d'un utilisateur à l'autre, qu'elles sont incapables d'être mobilisées pour comparer deux produits entre eux ou déterminer « rationnellement » la qualité d'un produit⁵¹. Afin de progresser vers cette standardisation des méthodes de tests et essais des peintures et vernis, et à l'instar du Bureau

⁴⁷ WALKER, *Paint and varnish, op. cit.*, p. 782

⁴⁸ Informations biographiques tirées de *American Men of Science*, 9^e édition (1955)

⁴⁹ Lettre, Booge à L.O. Bryan, 5 octobre 1921, accompagnant le rapport écrit par Herman Pfund chez Du Pont : « The colorimetry of lithopones », Experimental Station B-189-13 report, 21 septembre 1921, CRD 10

⁵⁰ Booge, « Lithopone, hiding power, results of cryptometer and paint », Experimental Station B-189-14 report, 26 septembre 1921, CRD 10

⁵¹ BOOGE et EASTLACK, « Improved methods of testing lithopone », *Paint, Oil, and Chemical Review*, 28 mai 1924

des Normes, à partir du milieu des années 1920 les efforts entrepris à la Station prennent un tournant résolument quantitatif. Fin 1926 est étrenné un laboratoire équipé d'un système de climatisation lui permettant d'opérer à température et humidité constantes, ce qui permet d'une part de recréer des conditions climatiques représentatives du territoire américain, et d'autre part d'augmenter la fiabilité et la sensibilité des mesures issues des instruments et méthodes visant à quantifier ces « propriétés physiques ». Certains de ces tests sont directement calqués sur ceux du Bureau des Normes ou de la Section Scientifique (résistance à l'eau, couleur, viscosité) ou développés en interne avec l'aide de Pfund (brillance, dureté...) ⁵². L'ensemble des recherches sur les vernis est placé sous la direction de Cole Coolidge (1897-1953), qui sera promu peu après directeur assistant de la Station. Fin 1926 Coolidge a sous sa responsabilité une équipe de 32 chimistes à la Station pour travailler sur les peintures et vernis, soit près de la moitié des employés technique du département de Chimie ; ce secteur mobilise ainsi une fraction importante des ressources scientifiques de Du Pont : la même année en effet, le nombre de personnes engagées dans des activités de « recherche » pour l'ensemble des départements de la compagnie est estimé à 241 ⁵³.

⁵² D.V. Gregory, « Quantitative testing methods for paint, varnish and lacquers », Experimental Station Report B-157-18, 25 décembre 1926, CRD 7/Varnishes

⁵³ Tanberg à Stine, 1^{er} décembre 1926, CRD 18/Chemical Department 1917-1926 ; H&S, pp. 290-1



Figure 6.3 — Photographie du laboratoire de tests quantitatifs sur les peintures et vernis à la Station, 1926
Avec l'aimable autorisation du Hagley Museum and Library

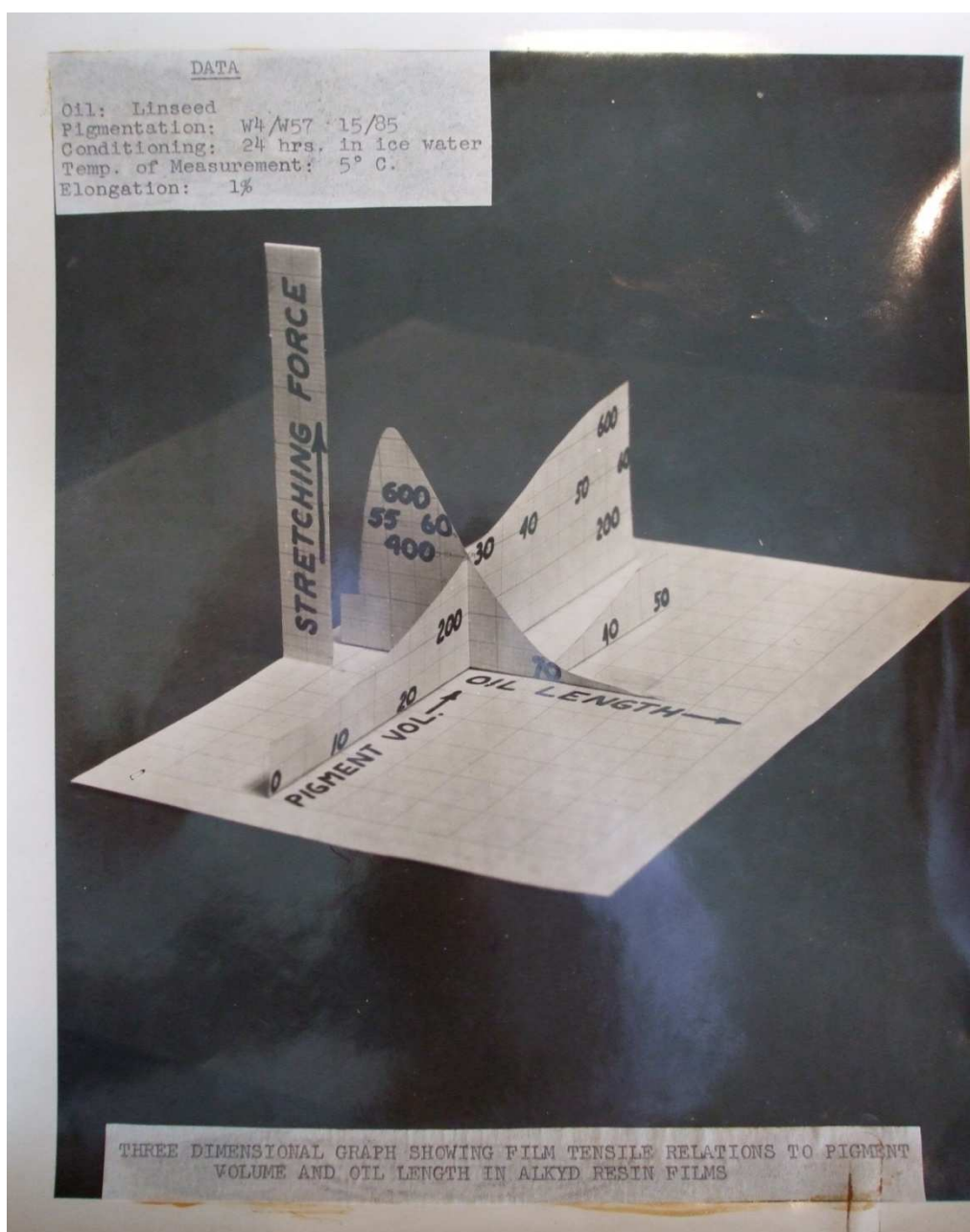


Figure 6.4 — Dispositif pour mesurer les propriétés mécaniques (élongation, élasticité) des vernis du laboratoire d’essais quantitatifs sur les peintures et vernis
Avec l’aimable autorisation du Hagley Museum and Library

Ce laboratoire s’inscrit au sein des activités industrielles de Du Pont liées aux vernis en remarquable adéquation avec la façon dont l’avait souhaité ou anticipé Bradshaw quelques années auparavant, qui est également l’orientation générale du laboratoire du Bureau des Normes. La substitution de tests physiques pour spécifier les vernis s’accompagne en effet d’une réduction drastique du nombre de formules pour identifier et distinguer l’ensemble des vernis manipulés dans les usines de Du Pont. Selon Stine, il y avait en 1924 environ 1050 formules différentes utilisées dans les quatre sites de production de vernis ; fin 1925, suite à une coopération intense entre les responsables des usines et le département de Chimie, ces

nombreuses formules ont été réduites à une « liste maîtresse » de 123 formules⁵⁴. Le département de Chimie a également érigé à partir de 1923 des panneaux d'exposition en Californie, en Floride, et à Wilmington pour tester empiriquement la meilleure formulation possible, en fonction de la localité, des pigments qu'il cherche à développer⁵⁵. La multiplication des tests sur les peintures et les vernis semble s'accompagner d'une attention accrue à l'égard des clients de Du Pont sur ces produits : « les exigences de certains clients sont prises en compte », affirme Stine au Comité Exécutif à propos des études de qualité sur le lithopone⁵⁶.

Est-il surprenant que ce laboratoire de tests quantitatifs sur les peintures et vernis ne comprenne aucun microscope ? Il est significatif que l'expertise de Pfund, qui a largement contribué à l'élaboration des tests en vigueur dans ce laboratoire, soit également mobilisée pour introduire aux chimistes de la Station les opportunités que le microscope recèle dans la recherche sur les pigments. En 1923, Pfund remet un rapport à Reese décrivant les méthodes de préparation d'échantillon de pigments pour analyse au microscope, et de prise de microphotographies. Pfund inclut quelques prises photographiques dans son rapport, sans donner cependant d'information précise quant à la taille des particules de pigment. En outre, le rapport reste muet sur l'utilité du microscope dans la recherche sur les pigments ; l'apport des photomicrographies aux autres activités de recherche ou industrielles des équipes associées n'est pas du tout abordé⁵⁷. À la lecture des rapports des chimistes de la Station sur les peintures et pigments, il ne semble pas que le microscope ait joué un rôle prépondérant dans leurs activités au cours des années 1920. Son rôle apparaît beaucoup plus significatif dans le département industriel des explosifs, où l'étude microscopique de la cristallisation dans les poudres contenant de la nitrocellulose a, selon Bradshaw, été d'une grande utilité dans le développement des poudres générant des explosions sans fumée⁵⁸.

Le microscope optique est introduit chez Du Pont en 1910 alors que Fin Sparre, le premier directeur de la Station, revient d'un séjour en Europe pour visiter les principaux laboratoires industriels travaillant sur les explosifs. Sparre mentionne que les laboratoires qu'il visite sont mieux équipés en « équipement physique ou mécanique » que ceux de la Station, et que les études par le biais du microscope, bien que « d'un caractère hautement scientifique », sont néanmoins « d'une assistance considérable dans les expérimentations, comme le travail général de test sur les poudres noires »⁵⁹. Prenant exemple sur l'utilisation du microscope dans le secteur de la métallurgie, et suivant les directives de Sparre, les premières études sur l'étude microscopique des explosifs sont rapidement initiées à la

⁵⁴ Stine, rapport au Comité Exécutif de 1925, 27 janvier 1926, CRD 16/Annual reports 1922-1929

⁵⁵ Reese, rapport au Comité Exécutif de 1923, *Ibid.*

⁵⁶ Stine, rapport au Comité Exécutif de 1925, *op. cit.*

⁵⁷ Pfund, « Pigments – photomicrography of ultimate particles », Experimental Station report B-189-34, 9 octobre 1923, CRD 10

⁵⁸ Bradshaw à Reese, vers 1921, *op. cit.*

⁵⁹ Lettre, Sparre à F.L. Connable, 11 janvier 1910, 500 II 2 326/Fin Sparre trip in Europe et Sparre, « Investigations of various subjects in Europe, October, November December 1909 », 15 février 1910, *Ibid.*

Station⁶⁰. Néanmoins l’apport du microscope est globalement qualitatif ; il permet de mieux estimer le « degré d’incorporation » de la poudre dans son liant nitrocellulosique. Comme d’ailleurs est l’apport que Pfund propose dans son rapport sur l’application du microscope aux pigments. Les figures au microscope permettent de discriminer les divers pigments blancs en fonction de leur finesse. La figure VI.4, issue du rapport de Pfund, montre que le blanc de plomb, quel que soit le procédé utilisé (*Dutch process, sublimated, anaconda*) est en moyenne plus grossier que le lithopone produit par Du Pont (« *Gold Seal* »), et que l’oxyde de zinc ou le titanox (pigment mixte au zinc et au titane). Les pigments titanox sont à leur tour plus fins que ceux au lithopone. De telles figures ont sans doute rendu bien des services dans les laboratoires industriels, même si la lecture des rapports de Du Pont montre que la détermination précise, quantitative, des tailles constituant l’ensemble des particules de pigment n’a pas été réalisée à travers l’utilisation du microscope au cours des années 1920.

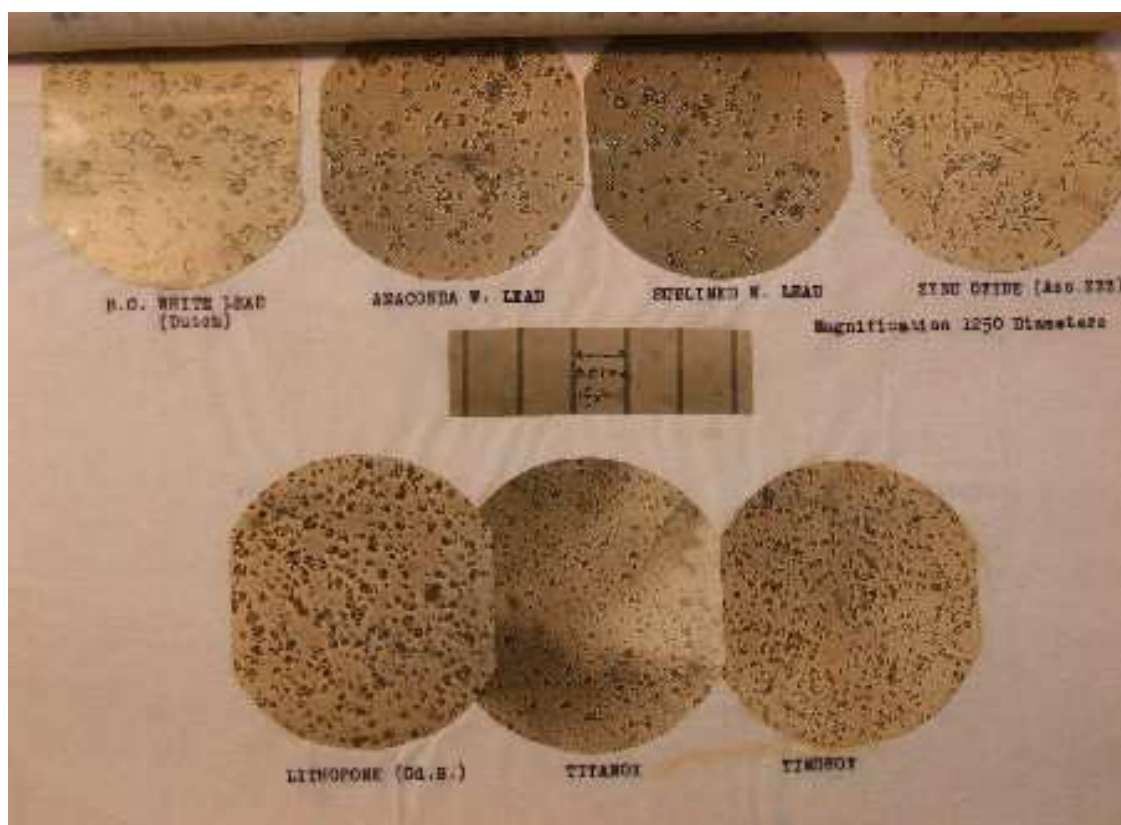


Figure 6.5 — Photomicrographies de divers échantillons de pigments, issues du rapport de Pfund

Un chercheur du laboratoire de recherche de la compagnie New Jersey Zinc situé à Palmerton, en Pennsylvanie, est en revanche tout entier tourné vers cette ambition quantitative. En 1921, Henry Green publie un article présentant des données sur la moyenne des tailles de particules de divers échantillons de pigments blancs, dont les pigments au zinc fabriqués par la

⁶⁰ Cf. les rapports conservés dans le dossier 500 II 2 326/Microscope black powder

compagnie qui l'emploie⁶¹. Cet article sera systématiquement cité au cours des années 1930 et 1940 dans les études microscopiques sur les pigments, alors que ces problématiques gagnent en intensité. Green y présente les méthodes de préparation d'échantillons et de photographies, mais aussi les méthodes statistiques de comptage et de mesure pour s'assurer de l'adéquation de la valeur moyenne obtenue avec la diversité des tailles de particule qui constituent le pigment. Green affirme prendre exemple sur la métallurgie, et tente de reproduire les méthodes et acquis développés pour mesurer la taille des grains dans les alliages dans le cas des pigments. De même que cette taille de grain est considérée comme fondamentale pour comprendre les propriétés mécaniques et physiques des alliages dans le cadre de la métallurgie, la taille des particules de pigment est un des facteurs déterminant les propriétés des peintures : « Les qualités d'un pigment telles que la teinte, la clarté, le pouvoir opacifiant, l'absorption d'huile et la résistance à l'abrasion lorsque utilisés dans le caoutchouc, sont des fonctions de la taille de particule »⁶². Quelques années plus tard, Du Pont et New Jersey se retrouveront en rivalité sur ces questions, mêlant inextricablement des considérations scientifiques à des intérêts industriels immédiats – la protection par les brevets et l'amélioration des procédés.

Dans l'immédiat cependant, Du Pont est en compétition économique avec New Jersey Zinc, cette dernière firme dominant, au moment où Du Pont se diversifie vers les peintures, le marché américain des pigments au zinc et au lithopone. Très vite, la compétition prend la forme d'un conflit sur l'utilisation d'un procédé breveté. En 1923, New Jersey Zinc a en effet engagé des poursuites pénales contre Du Pont, l'accusant d'utiliser frauduleusement un procédé de production de lithopone protégé par ses brevets, notamment sur le contrôle électrolytique de la réaction de précipitation qui engendre le pigment. Le département de Chimie collabore alors intensément avec le département Légal de Du Pont pour déterminer la validité des accusations et trouver les failles des brevets de New Jersey Zinc, ou de modifier le procédé utilisé, afin d'éviter d'enfreindre ces brevets⁶³. Cet épisode convainc les responsables du département de Chimie de l'importance des brevets dans la stratégie générale de domination pour les pigments. En particulier, les moyens instrumentaux modernes comme la microscopie et les rayons X sont appréhendés par ces managers de la recherche, chez Du Pont comme à New Jersey Zinc, comme des armes scientifiques pour étendre la portée et la validité des brevets déposés. Apprenant par l'intermédiaire de ses contacts au MIT que le laboratoire de New Jersey Zinc vient de s'équiper d'un tube à rayons X et est grandement intéressé par la détermination de la taille des particules de pigment, Reese prévient Stine, récemment promu directeur du département de Chimie, que « la compagnie de Zinc [New Jersey Zinc] pourrait débouler avec davantage de brevets décrivant des propriétés ou des

⁶¹ H. GREEN, « A photomicrographic method for the determination of particle size of paint and rubber pigments », *Journal of the Franklin Institute*, vol. 192 (1921), pp. 637-668

⁶² *Ibid.*, p. 638

⁶³ J.L. Keats, « Pigments. Light stable Lithopone. Lithopone Patent Situation. Our Case Against the New Jersey Zinc Company », *Experimental Station Report B-189-47*, 18 septembre 1925, CRD 10/B-189-41 to B-189-47

qualités de pigments produits, révélées uniquement par le biais de cette méthode d’investigation [les rayons X] »⁶⁴.

L’exposition de la rivalité qui oppose Du Pont à New Jersey Zinc sur les pigments a sans doute concouru à faire avaliser par le Comité Exécutif l’ambitieux programme « fondamental » que Stine élabore fin 1926. Avec l’implantation des rayons X dans les laboratoires de New Jersey, la course sur les brevets entre les deux compagnies s’est muée en course scientifique pour l’appropriation des instruments permettant de breveter plus efficacement les produits et procédés. C’est en effet par le biais de cet ambitieux programme de recherche « fondamental » que Stine est parvenu à introduire à la Station les tubes à rayons X et l’ultracentrifugeuse, instruments qui seront rapidement mobilisés dans la stratégie de brevetage des pigments manufacturés par Du Pont, offensive et défensive. L’ultracentrifugeuse est insérée par le biais du « groupe des colloïdes », qui va axer son programme de recherche autour de l’ultracentrifugeuse et du leitmotiv « *particle size* ». Peu de temps auparavant, Reese avait appris de ses contacts au MIT que les rayons X pouvaient être d’une grande utilité sur les pigments, car « les particules de dimensions colloïdales donnent des patterns de diffraction », et que « ce domaine [analyse par rayons X] est ouvert aussi pour d’autres matériaux colloïdaux »⁶⁵. Comme monsieur Jourdain « faisait de la prose sans le savoir », les chimistes de Du Pont découvrent que de nombreux matériaux qu’ils manipulent sont « colloïdaux », et sont intéressés d’apprendre que la théorie et les pratiques associées – la chimie colloïdale – sont susceptibles de les aider. La chimie colloïdale est alors en passe de s’implanter sur le terrain des pigments, peintures et vernis, d’assurer sa visibilité dans ce secteur industriel.

Diffusion de la chimie colloïdale et organisation des chimistes

Les pigments minéraux : des matériaux types pour la chimie colloïdale

Dès l’essor de la chimie colloïdale au début du 20^e siècle, cette spécialité a entretenu des liens privilégiés avec les pigments minéraux. Les grands noms de la chimie colloïdale se sont tous frottés à ces matériaux. Richard Zsigmondy, l’inventeur de l’ultramicroscope et premier prix Nobel associé à cette spécialité, a démontré la nature colloïdale du pourpre de Cassius, en partie grâce à cet instrument (cf. chapitre 1). Zsigmondy a en effet montré que le pourpre de Cassius, un pigment mauve, est constitué d’or colloïdal lié à l’acide stannique, acide composé d’étain. Wolfgang Ostwald s’est également intéressé aux pigments minéraux. Wilder Bancroft, alors qu’il s’apprête à orienter son laboratoire de l’université de Cornell sur la chimie colloïdale, fait travailler ses étudiants sur le blanc de plomb et le lithopone⁶⁶. Les chimistes industriels dans le secteur des peintures en viennent également à appréhender assez

⁶⁴ Lettre, Reese à Stine, 29 avril 1925, PP 16/Chemical department 1924-1925

⁶⁵ Lettre, G.L. Clark à Reese, 23 avril 1925, PP 16/Chemical department 1924-1925

⁶⁶ R. Stuart OWEN, « Experiments on white lead », *Journal of Physical Chemistry*, vol. 18 (1914), pp. 461-473 ; W. J. O’BRIEN, « A study of lithopone », *Ibid.*, vol. 19 (1915), pp. 113-44 ; sur la transition de Bancroft vers la chimie colloïdale, voir SERVOS, *Physical-chemistry from Ostwald to Pauling*, op. cit., pp. 300-8

rapidement leurs substances comme colloïdales : « Quelque chose semblable à la condition colloïdale pourrait exister en ce qui concerne les pigments et leur relation au véhicule », écrit Gustave Thompson dès 1910 dans son article sur la préparation « scientifique » des peintures.

Cette proximité entre pigments minéraux et chimie colloïdale est tissée avec plus d'entrain quelques années plus tard au laboratoire de la Section Scientifique de l'Association des Fabricants de Peinture, situé à Washington. Son directeur, Henry A. Gardner, vient d'équiper le laboratoire d'un ultramicroscope et affirme que « d'après les résultats de tests récents, tous les pigments utilisés dans les peintures sont dans une certaine mesure colloïdaux »⁶⁷. En variant la dilution du pigment dans son véhicule (huile de lin « chinoise »), Gardner parvient à faire varier la viscosité du milieu dispersant, et parfois à observer le mouvement Brownien des particules de pigments, et en déduit alors que ces particules sont si finement dispersées qu'elles sont dans la condition colloïdale. Ce test du mouvement Brownien n'a pas qu'une valeur scientifique (voire esthétique, tant il est captivant d'observer les particules en solution « danser » aléatoirement). Il est repris dans l'industrie des peintures et vernis pour distinguer une « bonne » d'une « mauvaise » dispersion, comme par exemple chez Du Pont : « Une bonne dispersion », écrit un chimiste sous la responsabilité de Patterson, « est celle qui, examinée au microscope, est travaillée par le mouvement Brownien des particules primaires suffisamment petites, peu agrégées ; versée dans l'eau, elle se disperse en petits serpentins »⁶⁸. Gardner rapproche encore davantage la chimie colloïdale de l'étude des pigments en s'appropriant le vocabulaire associé – dispersion, sol, gel, suspensoïde... –, puis en inventant les termes « linosol » pour désigner les sols de pigments, et « linogel » lorsque le véhicule huileux prend l'apparence d'un gel.

La diffusion de l'ultramicroscope, un instrument souvent rattaché à la pratique de la chimie colloïdale, a donc contribué à faire connaître aux chimistes des peintures et vernis cette spécialité. Un autre instrument qui a eu un impact similaire est le « moulin colloïdal », qui se diffuse rapidement parmi les chimistes travaillant sur les vernis. Le moulin colloïdal permet, par centrifugation, de « clarifier » les vernis, d'améliorer leur texture ; il semble être d'une utilisation courante dans les usines au début des années 1920 : « La centrifugation pour la clarification des vernis constitue à présent, selon Mr. Henry A. Gardner, une partie du procédé utilisé dans toutes les usines modernes de vernis », écrit le chimiste de la Station D.V. Gregory fin 1922⁶⁹. Ce dernier est chargé de trouver un substitut économiquement acceptable au procédé de « vieillissement » du vernis (« *aging* ») (cf. chapitre 3). Gregory, lorsqu'il utilise le moulin colloïdal pour étudier ce phénomène de vieillissement, s'approprie plus qu'un instrument. Il s'ouvre à un certain « point de vue » sur les matériaux et substances, qui le conduit à formuler certaines hypothèses et à effectuer certaines recherches : « Ce phénomène [vieillissement] est probablement un phénomène colloïdal [...] il s'agit donc d'étudier le vernis du point de vue colloïdal ».

⁶⁷ GARDNER, *Notes, op. cit.* p. 795

⁶⁸ Mémoire, O.E. Schupp à W.M. Whitten, « Dispersions containing deacetylated chitin », 12 décembre 1934, GDP 12/Chronological file 1930-1936

⁶⁹ D. V. Gregory, « Aging of varnish », Experimental Station Monthly progress report, 25 décembre 1922, CRD 20/Combined progress reports 1922

L'appropriation de la théorie colloïdale par les chimistes étudiant les pigments s'accompagne de leur adhésion à la dichotomie colloïde/cristalloïde, revue au prisme de la réalité moléculaire. Dans cette acception, les procédés de production des pigments comportent des phases colloïdales, des phases cristalloïdes, et des suspensions mécaniques. Joseph Blumenfeld, l'inventeur du procédé de synthèse des pigments de titane qui sera massivement utilisé au cours des années 1920, le procédé au sulfate, interprète ces étapes à la lumière de cette dichotomie lorsqu'il brevète son invention :

Il est bien connu que si l'on essaye de dissoudre de l'ilménite ou de l'oxyde de titane dans un acide, l'acide sulfurique par exemple, on n'obtient aucune solution bien définie ; au contraire, toute une série continue de supposées solutions sont produites, composées du titane sous diverses formes, c'est-à-dire en suspension mécanique, en solution colloïdale de plus en plus dispersée, et en solution cristalloïde. [...] Il a été découvert récemment qu'une solution véritablement cristalloïde de titane, c'est-à-dire dotée de propriétés constantes, peut être obtenue. Cette solution peut être définie et identifiée sans ambiguïté. Elle ne montre l'effet Tyndall à aucun degré appréciable. Elle ne change pas avec le temps. Lorsqu'elle est chauffée au-dessus de 65°C, mais en-dessous de son point d'ébullition, [...] du sel de titane sulfaté sous forme de cristaux microscopiques en forme d'aiguilles se précipite. La composition de ces cristaux répond à la formule $\text{TiOSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Les solutions de ce sel sont bien plus stables que les soi-disant solutions colloïdales [...] et, ce qui semble fondamental en ce qui concerne la production du TiO_2 à grande échelle, ces solutions mènent toujours à des produits ayant les mêmes propriétés physiques et chimiques lorsqu'elles sont hydrolysées sous les mêmes conditions.⁷⁰

Il n'est pas superflu de citer longuement le raisonnement de Blumenfeld qui le mène à breveter son procédé au sulfate. Ce dernier cherche, en mettant sur pied son procédé, à s'affranchir de l'état colloïdal lors de la production du pigment ; l'état colloïdal est ici synonyme de désordre, de composition inconnue, et d'incertitude sur la qualité des pigments produits. La production de pigments aux propriétés physico-chimiques constantes nécessite de travailler avec des solutions « cristalloïdes », c'est-à-dire moléculairement définies. Et puis citer Blumenfeld présente l'avantage d'introduire les grandes étapes du procédé au sulfate, qui va nous occuper plus longuement par la suite, lorsque la chimie du titane sera étudiée en détail par le groupe des colloïdes de Du Pont, à travers le prisme *particle-size*. Ce procédé est constitué de deux étapes clé, l'attaque de l'ilménite (le minerai qui contient le titane) à l'acide sulfurique concentré, et l'hydrolyse des sels de titane qui génère le pigment. Les traités sur le titane vont conserver cette partition de l'état du titane – cristalloïde, colloïde, ou précipité – en fonction des paramètres expérimentaux de l'hydrolyse (fig. 6.6).

⁷⁰ Joseph Blumenfeld, « Titanium compound », U.S. patent # 1,504,669, breveté le 12 août 1924

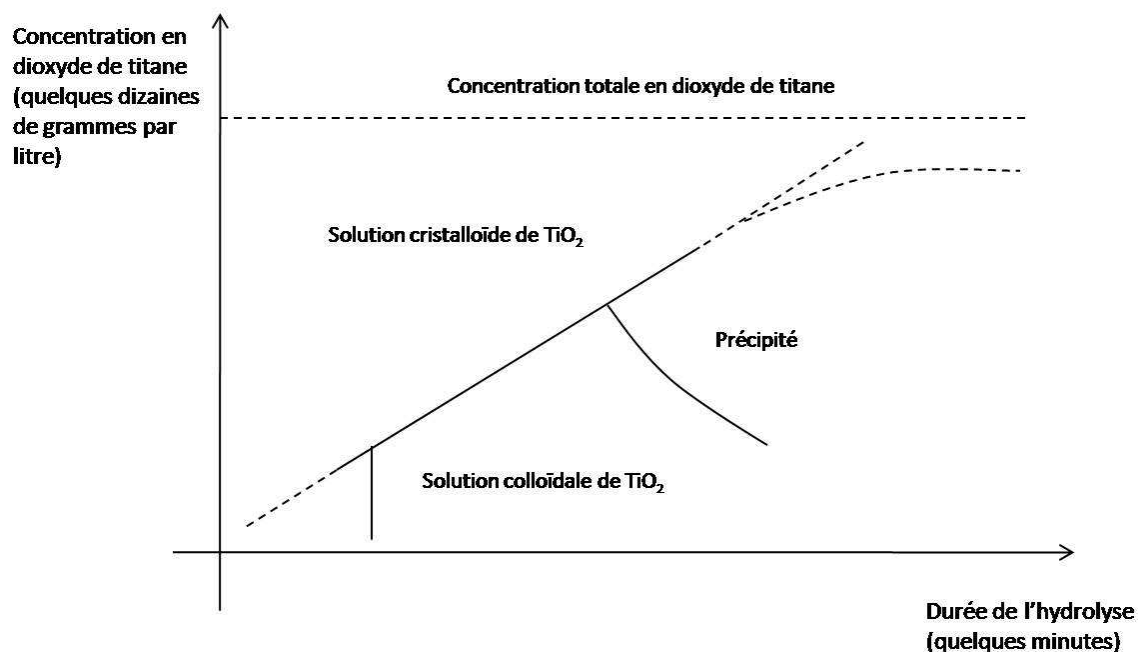


Figure 6.6 — Etat du titane en fonction de la durée de l'hydrolyse et de la concentration
 Source : inspiré de Jelks BARKSDALE, *Titanium. Its chemistry, occurrence, and technology*, New York, Ronald Press Company, 1946, p.178

Organisation des chimistes et complémentarité des divisions de l'American Chemical Society

Parallèlement à cette pénétration de la chimie colloïdale dans le vocabulaire et les pratiques des chimistes industriels travaillant sur les peintures et vernis, ceux-ci s'organisent au sein de la Société américaine de chimie, en parvenant au cours des années 1920 à instituer une section puis une division axées sur leurs problématiques. Dans un premier temps cependant, c'est autour de la division sur les caoutchoucs de la Société que ces chimistes vont flocler au début des années 1920. Même si l'industrie du caoutchouc semble à première vue très éloignée de l'industrie des peintures et vernis, ces deux industries en sont venues à s'interpénétrer du fait de l'ajout de certains pigments minéraux – principalement au plomb, zinc, titane puis noir de carbone – dans la fabrication du caoutchouc pour en améliorer les propriétés mécaniques et sa durée de vie. Le noir de carbone en particulier, un pigment noir résultant de la combustion incomplète des hydrocarbures et du gaz naturel, est massivement utilisé au cours de la Première Guerre mondiale. Sous l'effet conjoint de la mobilisation industrielle sur le caoutchouc pour l'effort de guerre, et de la forte augmentation du trafic automobile au sortir de la guerre, la demande en caoutchouc et en pigments minéraux pour renforcer les pneumatiques a fortement augmenté au cours des années 1910 et 1920. Entre 1920 et 1924 la part de la consommation américaine de caoutchouc dans l'ensemble de la consommation mondiale est la plus forte, et s'élève à 75%⁷¹. L'industrie du caoutchouc et

⁷¹ William WOODRUFF, « Growth of the rubber industry of Great Britain and the United States », *Journal of the Economic History*, vol. 15 (1955), pp. 376-391, statistique p. 382

celle des pigments minéraux se sont ainsi construites, au cours des trois premières décennies du siècle, dans un état d’interdépendance économique croissant.

La mobilisation sur le caoutchouc pour l’effort de guerre a accéléré l’appropriation de ce matériau par les chimistes, et au sortir de la guerre une division « Caoutchouc » est instituée au sein de la Société américaine de chimie. La dépendance de l’industrie du caoutchouc envers les pigments minéraux a généré une certaine proximité technique et scientifique entre celle-ci et l’industrie des peintures et vernis. Poursuivant un objet commun – les pigments – de nombreux chimistes membres de la Société circulent entre l’univers industriel des caoutchoucs et celui des peintures et vernis, et cherchent à organiser une division « peintures et vernis » sur le modèle de la division des caoutchoucs récemment instituée : « Certains chimistes des pigments, particulièrement ceux ayant participé aux premiers meetings de la section caoutchouc de la Société américaine de chimie (établie en 1919), ont souhaité la formation d’une section similaire sur les peintures et les vernis »⁷². Typique de ces chimistes qui ont migré de la section caoutchouc à la section peintures et vernis est Henry Green de New Jersey Zinc, qui présente en 1921 ses travaux sur l’étude microscopique des pigments dans le caoutchouc à la section associée, puis en 1924 ses études de « microchimie » des pigments dans les peintures à la section peintures et vernis en gestation⁷³.

Henry Gardner, le directeur du laboratoire des peintures et vernis de l’Association des Fabricants de Peinture, mobilise ces voix qui s’expriment pour l’instauration d’une division peintures et vernis au sein de la Société et courant 1923 recense, à travers une pétition envoyée aux membres de la Société de chimie, les forces qui souhaitent l’existence autonome de cette division. Environ 100 chimistes ont répondu positivement ; présentée au Conseil de la Société en octobre 1923, la pétition débouche sur l’institution formelle d’une section « peintures et vernis » reconnue par la Société, qui deviendra en 1927 une division. Gardner est le premier secrétaire de cette section. Les premiers meetings de cette section sont organisés autour d’une thématique scientifique et technique ciblée : « Pouvoir de dilution des peintures et vernis », « Applications de la chimie colloïdale aux phénomènes des peintures et vernis », « Distribution des tailles de particules et ses fonctions dans les peintures et les émaux »...⁷⁴. Le meeting sur la thématique taille de particule de la section peintures et vernis a été organisé pendant le symposium annuel de 1926 de la Société de chimie, qui a eu lieu en septembre à Philadelphie. Comme nous le verrons, cette problématique taille de particule a contribué à rapprocher encore chimie colloïdale et industrie des peintures et vernis à la fin des années 1920.

Ainsi, d’une manière générale, les chimistes des peintures et vernis ont conçu la relation entre le secteur industriel qui les emploie et la spécialité chimie colloïdale dans un rapport

⁷² BRAGDON et RENFREW, *Paint, varnish and plastic chemistry*, op. cit. p. 1277

⁷³ H. GREEN, « Recent development in the art of rubber microsectioning », *JIEC*, vol. 13 (1921), pp. 1130-2 ; –, « The microchemistry of white pigments and inerts as they occur mixed in paints », *Ibid.*, vol. 16 (1924), pp. 677-80

⁷⁴ BRAGDON et RENFREW, *Paint, varnish and plastic chemistry*, op. cit. p. 1277

théorique. Ce rapport est parfaitement clair chez Du Pont entre 1925 et 1928, en particulier pour l'équipe de la Station en charge d'améliorer le vernis « *Brush Duco* », qui attend de son incursion dans la chimie colloïdale des idées et recettes simples pour l'orienter dans ses recherches. Le vernis « Duco » est un revêtement nitrocellulosique pour automobiles contenant également des pigments minéraux comme le titanox, pigment « mixte » de titane et de zinc. Inventé en 1920 par le département des Produits de la Cellulose, il est développé conjointement par les laboratoires de Du Pont et ceux de General Motors et est rapidement appliqué comme enduit de finition pour les voitures commercialisées par la grande firme automobile⁷⁵. Hélas le produit a tendance à s'altérer : sous certaines conditions, les pigments flocculent et sédimentent au fond de leur contenant, ce qui limite l'application et la durabilité du vernis. Un chimiste de la Station, Gordon D. Patterson, est chargé en 1926 d'entreprendre des études pour remédier à cette situation, c'est-à-dire élaborer un « agent de dispersion » capable de maintenir la dispersion des pigments. Après bien des essais de diverses substances connues pour avoir des propriétés de dispersion, le caoutchouc est retenu comme agent de dispersion potentiel pouvant rentrer dans la composition du vernis Duco⁷⁶.

Fin 1926 cependant, le directeur du département de Chimie Charles Stine est en train de peaufiner son programme de recherche « fondamental » qu'il compte présenter sous peu au Comité Exécutif. Patterson, en tant que responsable des recherches sur la dispersion des pigments à la Station, est convié à réfléchir aux orientations qu'une étude « fondamentale » pourrait prendre sur ce domaine dont il est responsable. Sans doute influencé par Kraemer, consultant pour Du Pont depuis avril 1926, Patterson envisage cette étude « fondamentale » comme une étude « colloïdale » du système caoutchouc-titanox « et des autres systèmes dispersés ». Disposant d'un certain recul sur son travail sur les dépôts formés dans le vernis Duco, Patterson estime que la méthodologie employée pour élaborer le bon agent de dispersion est trop empirique. Il attend de cette étude fondamentale, colloïdale, l'explication des mécanismes de floculation des pigments, de manière à pouvoir prédire le comportement des pigments en fonction de la composition du vernis et des conditions environnantes, afin d'éviter les longues séries d'expérience où un paramètre est changé à chaque expérience :

L'étude menant à l'utilisation réussie du caoutchouc dans le Brush Duco a jusqu'à présent été limitée à l'établissement, par des méthodes empiriques, des meilleures conditions d'incorporation pour le caoutchouc, le critère de sélection étant le développement de qualités satisfaisantes de non-déposition, de brillance et d'autres propriétés dans l'email associé. L'urgence de ces problèmes n'a permis que très peu voire aucune attention expérimentale orientée vers la compréhension du mécanisme de l'action protectrice induite par le caoutchouc. [...] Aucune théorie, généralisation, ou même information relative aux conditions spécifiques ne sont à présent disponibles pour nous guider dans notre sélection ou notre application des agents de dispersion [...]. Cette absence de

⁷⁵ H&S, pp. 138-46 ; le « brush duco » et les vernis « Dulux » sont parmi les premiers vernis décoratifs dont l'utilisation s'exporte rapidement hors du secteur automobile pour gagner notamment les milieux artistiques : Harriet STANDEVEN, « The development of decorative gloss paints in Britain and the United States c. 1910-1960 », *Journal of the American Institute for Conservation*, vol. 45 (2006), pp. 51-65

⁷⁶ Mémoire, Patterson à Cole Coolidge, « Improvements in pigment dispersion. Progress and developments during 1926 », 2 décembre 1926, GDP 8/Pigment dispersion reports 1926-1927

principes généraux réduit la sélection d'un agent pour un système en particulier à l'essai d'un grand nombre de substances dont les applications antérieures suggèrent l'utilité pour le problème en question. [...] Le projet présenté est ainsi amené à couvrir une étude colloïdale ou physico-chimique du système dispersé rubber-titanox, afin de développer les informations fondamentales menant à une explication du mécanisme qui prévient la déposition du titanox par le traitement au caoutchouc⁷⁷.

En pratique, cette étude colloïdale a poussé les chimistes sous la direction de Patterson à mobiliser le microscope optique de façon plus assidue, et à rechercher des « inférences microscopiques quant à la localisation du caoutchouc sur les particules de pigment ou dans le véhicule »⁷⁸.

Quelques années auparavant, Svedberg, le maître de Kraemer, concevait la chimie colloïdale comme la *science* des ultrastructures ; selon Svedberg c'est l'ignorance, parmi les chimistes industriels aussi bien qu'universitaires, de ces structures microscopiques et submicroscopiques des matériaux pour lesquels celles-ci sont supposées déterminer leurs propriétés, qui justifie l'institution d'une science dédiée à ces ultrastructures (cf. chapitre 1). La *science* des colloïdes est ainsi celle des systèmes dispersés ; elle est l'étude de la matière et des matériaux « dans un état finement divisé ». Les pigments, lorsqu'ils sont finement divisés, ne constituent alors qu'un des cas particuliers des systèmes colloïdaux ; les lois de la chimie colloïdale sont censées s'appliquer à l'ensemble des matériaux et substances considérées comme colloïdaux. Ce n'est pas autrement que Stine a envisagé le rapport à la chimie colloïdale alors qu'il a élaboré son ambitieux programme fondamental (cf. chapitre 3). Svedberg, d'ailleurs, n'est pas totalement étranger au secteur industriel des peintures. Un de ses collaborateurs, Nils Pihlblad, a en effet soutenu une thèse sous sa direction sur la relation entre taille de particules et absorption de la lumière dans les colloïdes. Pihlblad est ensuite devenu directeur d'une compagnie produisant des peintures et des vernis à Göteborg, en Suède. Visiblement celui-ci est resté en contact avec Svedberg par la suite, car ce dernier demande à Nichols en 1928 si Pihlblad peut venir visiter la Station⁷⁹.

Quelle que soit la proximité de Svedberg avec le secteur industriel des peintures – avant que ses disciples Américains Nichols et Kraemer ne rejoignent Du Pont –, ses derniers accomplissements sur la sédimentation des particules sont cités et discutés au symposium de la section peintures et vernis de 1926, orienté sur la problématique « distribution des tailles de particules ». En particulier, deux chercheurs de la firme Eagle-Picher Lead, essayent de s'approprier les méthodes de sédimentation développées par Svedberg pour déterminer la taille de divers échantillons de pigments blancs⁸⁰. Il est d'ailleurs remarquable que ces

⁷⁷ Patterson, « Colloïdal study of rubber-titanox and allied disperse systems », Major experimental project n°1140, 12 janvier 1927, GDP 7/Project outlines 1927-1934

⁷⁸ Patterson, « Fundamental study – Rubber titanox system », janvier 1927, GDP 8/Pigments research summary reports dispersion 1927-1929 ; R.A. Shive, « Brush Duco– Pigment dispersion », avril 1927, GDP 8/Pigments research summary reports dispersion 1926-1927

⁷⁹ Lettre, Svedberg à Nichols, 15 décembre 1928, JBN 6/Svedberg correspondence 1928-1931

⁸⁰ J.H. CALBECK, H.R. HARNER, « Particle size distribution by sedimentation method », *JIEC*, vol. 19 (1927), pp. 58-61

chercheurs industriels citent la monographie que Svedberg publie en 1924, dans laquelle celui-ci affirme que la chimie colloïdale est la science de la particule, l'étude des ultrastructures. Egalement présent à ce symposium est le physicien Herman Pfund, qui vient en tant que consultant non pas de Du Pont, mais de New Jersey Zinc. Il a en effet travaillé avec un chercheur du laboratoire de New Jersey Zinc sur la détermination de la taille des particules à partir des propriétés d'absorption et de diffusion de la lumière des échantillons de pigments dilués⁸¹. Il est significatif que Pfund ait écrit cet article en travaillant avec New Jersey Zinc plutôt qu'à partir de ses contacts avec Du Pont ; sans doute Du Pont est alors moins engagée que New Jersey Zinc dans l'analyse quantitative des tailles de particules de pigment. Cet écart va néanmoins rapidement se combler en quelques années, avec le recrutement par Du Pont de Kraemer puis Nichols, et la construction d'une ultracentrifugeuse à la Station permettant cette analyse quantitative. Le groupe des colloïdes va assurer, au cours des années 1930, un *leadership* certain et jalousement tenu secret concernant ces recherches.

Les premiers travaux de Nichols, alors qu'il est encore à l'université du Wisconsin, ne sont d'ailleurs pas passés inaperçus dans le milieu des peintures. Car si cet univers industriel en est venu à s'intéresser de près à la chimie colloïdale, réciproquement les représentants académiques de cette spécialité alors en plein essor se sont appropriés les pigments minéraux pour leur propre programme et problèmes disciplinaires. Ainsi, lors du troisième symposium national sur les colloïdes, qui a eu lieu à l'université du Minnesota en 1925, Nichols s'est associé avec une chimiste de la compagnie Acme White Lead-Color Works, Henriette C. Liebe, pour déterminer la taille des pigments de lithopone par centrifugation⁸². Ces mesures sont effectuées à l'aide du prototype d'ultracentrifugeuse que Nichols et Svedberg ont construit en 1923, et qu'ils ont laissé à l'université de Wisconsin. La firme Acme White Lead-Color Works fournit les échantillons de lithopone analysés par centrifugation. Nichols et Liebe citent l'article de Green de 1921, pour mieux mettre en avant les avantages de l'ultracentrifugeuse sur la microscopie optique dans la détermination de la distribution de taille des pigments : « La méthode photomicrographique de Green donne des résultats consistants pour des particules plus grandes que 0.3μ en diamètre, à condition qu'un nombre suffisamment grand de particules soit pris en compte pour soutenir la méthode statistique ». Les unités utilisées pour exprimer la taille des particules traduisent la différence des origines disciplinaires et institutionnelles entre Nichols et Green : Green utilise le micron (μ), tandis que Nichols utilise également le micromicron ($\mu\mu$), qui est encore restreint aux spécialistes de chimie colloïdale. Les chimistes industriels sont plus familiers avec le micron. Cet article, paru dans les actes du symposium associé, est cité un an plus tard, lors du meeting de la section peintures et vernis sur la taille des particules, par les chercheurs de la compagnie Eagle-Picher Lead. Dans leur recension sur les méthodes de détermination de la taille des particules de pigment par centrifugation, ceux-ci affirment que le travail de Nichols et Liebe

⁸¹ G.F.A. STUTZ, A.H. PFUND, « A relative method for determining particle size of pigments », *Ibid.* pp. 51-53

⁸² NICHOLS et LIEBE, « The centrifugal method for the determination of the distribution of size of particle of suspended material », *Colloid Symposium Monograph*, vol. 3 (1925), pp. 268-284

« semble être le seul qui a réalisé ce travail [détermination des tailles par centrifugation] en particulier sur les pigments utilisés dans les peintures »⁸³.

Ainsi à la fin des années 1920, les instruments et méthodes pour déterminer la taille des particules de pigments sont limités ; le microscope optique classique ne permet pas de résoudre toutes les particules. La méthode par sédimentation, en utilisant les récentes « ultracentrifugeuses » en gestation à l'école de recherche de Svedberg, vient à peine de toucher le secteur industriel des peintures et vernis. Il faut remarquer ici que la vocation de l'ultracentrifugeuse diverge radicalement de celle d'un autre instrument fondé sur l'augmentation artificielle des forces centrifuges par rotation, et qui a déjà largement pénétré ce secteur industriel : le moulin colloïdal. Cet instrument est en effet à la fois un outil de recherche et un dispositif intégré dans les procédés de production, principalement pour les vernis ; il sert à fabriquer des émulsions et à améliorer la dispersion des vernis, donc leur texture et turbidité. Ce n'est pas un instrument adéquat pour mesurer la taille des dispersions : « On peut affirmer », écrit Kenney dans son rapport sur le moulin colloïdal, « que presque aucune donnée quantitative n'a été obtenue sur les forces ou les vitesses développées par les divers appareils, ni aucune discussion sur les propriétés physiques de finesse de subdivision du produit résultant »⁸⁴. Par contraste, l'ultracentrifugeuse est uniquement un instrument de recherche et de caractérisation ; elle est toute entière tournée vers la quantification de ces « propriétés physiques de subdivision », que Kenney regrette de ne pas pouvoir trouver auprès du moulin colloïdal.

⁸³ CALBECK et HARNER, *Particle size distribution by sedimentation method*, *op. cit.*, p. 58

⁸⁴ A.W. Kenney, « High-speed agitating devices – centrifugal stirrer – littérature search », Experimental Station B-194-2 report, 11 octobre 1921, CRD 10/B-194-1 to B-194-

Chapitre 7. PIGMENTS ET ESSOR DU REDUCTIONNISME MICROSTRUCTURAL CHEZ DU PONT — 1928-1937

La rivalité qui oppose Du Pont à New Jersey Zinc sur les pigments a fait prendre conscience de l'importance des nouveaux instruments de pointe, en particulier pour la stratégie sur les brevets. Le programme fondamental de Stine permet de faire remonter cette prise de conscience du département de Chimie vers les instances dirigeantes de Du Pont, et de légitimer l'appropriation de ces instruments et des recherches associées. Lorsque le département de Chimie parvient fin 1927 à « capturer » Nichols afin qu'il élabore une ultracentrifugeuse, les domaines industriels en prise avec les pigments minéraux semblent les plus immédiats à l'« application » des résultats « fondamentaux » obtenus grâce à cet instrument. L'exclusivité dont jouit Du Pont sur l'ultracentrifugeuse est rapidement considérée comme un atout dans cette rivalité avec New Jersey Zinc d'une part, et avec l'ensemble des firmes produisant des pigments d'autre part. Patterson, qui a été promu responsable de la recherche « appliquée » sur les pigments à la Station, écrit fin 1929 au groupe des colloïdes, et aux responsables des départements industriels manipulant ces pigments minéraux, qu'

il est encore difficile d'estimer l'importance réelle à la Compagnie Du Pont d'un tel outil [ultracentrifugeuse]. Cependant, il semble que la possession de cet outil donne à la Compagnie un avantage concret sur les concurrents dans le domaine des pigments. L'importance d'un tel avantage est évident alors que la Compagnie vient de mettre en œuvre des études pour développer de nouveaux ou meilleurs pigments, considérés comme essentiels au futur des divisions sur les pigments¹.

Comme pour le secteur des fibres textiles, à la fin des années 1920 les départements industriels produisant des peintures et vernis envisagent une stratégie de croissance pour la décennie suivante fondée sur la commercialisation de nouveaux produits, et donc notamment de nouveaux pigments. Un des impératifs de cette stratégie est la protection de ces nouveaux pigments par des brevets les plus larges possibles. Lorsque Patterson prévient ses collègues de l'importance de l'ultracentrifugeuse pour les pigments, un des départements industriels produisant du lithopone vient de réaliser toute la portée que la détermination des tailles de particule de pigments pouvait avoir sur la spécification des brevets et la revendication à la nouveauté du produit. L'ultracentrifugeuse contribue à diffuser le leitmotiv « *particle-size* » dans la compagnie, et les chimistes industriels sont prompts à réaliser que ce leitmotiv n'est pas que d'un intérêt scientifique, mais peut être d'une utilité industrielle considérable.

En conséquence le directeur assistant de la Station, Cole Coolidge, qui a longuement travaillé avec Patterson sur les pigments, prévient ses collègues concernés que « pour une

¹ Mémorandum, Patterson, « Chemical department policy with respect to particle size study of pigments », 19 novembre 1929, JBN 4/miscellaneous

période indéfinie, les études sur les pigments par ultracentrifugeuse seront strictement confidentielles »². Ce qui signifie, en pratique, que le nombre d'employés de Du Pont mis au courant de ces études reste le plus réduit possible, et que ceux y participant réduits au silence. La restriction touche bien évidemment en priorité les publications, et le groupe des colloïdes se voit interdire de publier ses recherches sur les pigments. De ce fait, toutes les publications et communications produites par le groupe sur l'ultracentrifugeuse seront d'un caractère général, ou concernent les colloïdes organiques où la restriction est moins sévère (cf. chapitre 5). Dans le cas où les pigments sont mentionnés, le groupe soumet ses articles aux responsables des départements industriels pour révision et approbation. De même les rapports individuels de Nichols qui traitent des pigments sont marqués « confidentiel ».

Cette restriction sur la diffusion des travaux « *particle-size* » sur les pigments a isolé scientifiquement le groupe des colloïdes. Il est presque invisible dans la littérature sur la détermination des propriétés physiques des pigments, qui connaît une forte expansion à partir de la fin des années 1930 et surtout avec la diffusion du microscope électronique. Ce groupe est pourtant au cœur d'un travail considérable et original sur les pigments ; il a contribué substantiellement à l'expansion des nouveaux modes de spécification de peintures et vernis, en militant pour des approches plus « rationnelles » et « scientifiques », fondées sur le réductionnisme microstructural. Il a accéléré les tendances à l'« objectivation » des propriétés et mesures sur les peintures et vernis, et promu l'optimisation des procédés de production des pigments au prisme de la taille des particules, en particulier pour les pigments au titane.

La mobilisation du groupe des colloïdes dans la stratégie sur les brevets

Microstructures et brevets : du lithopone aux pigments colorés

Ainsi, à la fin des années 1920, le secteur des peintures et vernis est stratégique pour les dirigeants de Du Pont, qui investissent massivement dans la recherche sur les nouveaux pigments et l'achat de compagnies déjà bien implantées dans les marchés associés. Le lithopone en particulier fait l'objet d'un investissement important, et Du Pont achète en 1928 la compagnie *Grasselli Chemical* basée à Cleveland (Ohio), puis en 1929 *Krebs Pigment and Chemical*, basée dans le Delaware. Krebs produit du lithopone de haute qualité, et Grasselli produit également de l'acide sulfurique, un composé servant de réactif intermédiaire dans de nombreux procédés, dont la fabrication du lithopone. L'achat de ces deux compagnies offre à Du Pont un poids considérable sur le marché du lithopone³. Incarnant cette inflexion sur la recherche sur les pigments, le département des Peintures institue formellement une division technique en 1926, dotée d'un budget spécifique et dont les capacités expérimentales sont concentrées à Newark (New-Jersey), à une vingtaine de kilomètres à l'ouest de New York. Newark est également le site de production du « *Gold Seal* », une variété de lithopone à fort pouvoir opacifiant et dotée d'une bonne aptitude de résistance aux ultra-violets, développée

² *Ibid.*

³ H&S, p. 211

par le département de Chimie et produite depuis 1922. Cette division technique s'institue ainsi dans la continuité des activités de recherche liées aux besoins immédiats de production de Newark. Pour insuffler un nouvel élan à la recherche dans le département des Peintures néanmoins, James Booge, qui a contribué à initier la phase de standardisation des tests physiques sur les peintures et vernis depuis la Station, est transféré à ce département début 1926, pour diriger cette division technique et s'occuper en particulier du lithopone⁴.

Le groupe des colloïdes, sitôt installé à la Station fin 1927 et s'attelant à y construire une ultracentrifugeuse, est rapidement appelé à coopérer avec cette division technique pour résoudre certains problèmes de production. À tel point que, selon Nichols, cette coopération laisse peu de temps pour se préoccuper des aspects plus « fondamentaux » : « Trop de problèmes pratiques ont occupé notre attention dans la production du lithopone », écrit-il à Booge fin 1928, « pour que nous puissions, jusqu'à récemment, étudier les réactions fondamentales impliquées dans le procédé autrement que par petites touches »⁵. Nichols présente ici, à Booge ainsi qu'à Marion L. Hanahan, un autre chimiste transféré à Krebs, l'utilité de l'ultracentrifugeuse pour les opérations techniques et industrielles impliquées dans la production du lithopone. Comme pour les autres lignes de produit avec lesquelles le groupe des colloïdes se retrouve engagé, Nichols propage à travers ce mémo une conflation entre ultracentrifugeuse, *particle-size* et recherche « fondamentale ».

Parmi les enjeux « fondamentaux » que l'ultracentrifugeuse soulève vis-à-vis du lithopone, Nichols présente cet instrument comme une arme efficace dans les entreprises de protection juridique des nouveaux produits, c'est-à-dire leur brevetabilité. La connaissance accrue de la taille des particules de pigment que cet instrument permet, matérialisée dans les courbes de distribution de taille, peut être mobilisée pour défendre la nouveauté d'un pigment vis-à-vis du bureau des brevets, ou pour appuyer des revendications plus larges : « la courbe de distribution [de taille] du matériau, qui traduit certaines modifications du procédé, et déterminée par une méthode *absolue*, nous permettrait de rédiger des spécifications conduisant à un brevet qui couvrirait bien mieux le procédé amélioré »⁶. Un des trois critères essentiels pour prétendre au brevet est en effet – avec le critère d'utilité et celui d'invention (vs. découverte) – celui de la nouveauté. La méthodologie en vigueur dans les laboratoires industriels, pour évaluer la nouveauté et la qualité d'un pigment ou d'une formulation de peinture et sa qualité, est sa comparaison avec un produit ou une formulation de référence. Une procédure qui, selon Nichols, « n'a aucune considération au bureau des brevets ». La quantification des tailles de pigments, c'est-à-dire la détermination des caractéristiques *absolues* d'un échantillon donné, indépendantes d'un échantillon de référence, permet alors d'argumenter l'efficacité d'un nouveau pigment ou d'une modification du procédé associé. La difficulté est d'attribuer à telle modification de procédé tel impact sur la taille des pigments produits ; si cette causalité parvient à être établie, le prétendant au brevet peut justifier, sur des

⁴ Mémoire, A.P. Tanberg, 21 janvier 1926, GDP 12/Chronological files 1920s

⁵ Mémoire, Nichols à Booge, Tanberg et M.L. Hanahan, 18 décembre 1928, JBN 4/Lithopone Newark 1928-1931

⁶ *Ibid.*, emphase ajoutée

bases quantitatives, l'efficacité de son procédé, ou tout au moins son influence sur la taille des particules produites. Ces paramètres quantitatifs, qui semblent plus objectifs que les comparaisons des propriétés entre deux produits, peuvent être avancés dans les spécifications des brevets pour préciser la nature du pigment produit, ou l'efficacité du procédé associé.

Nichols est donc très tôt dans sa carrière industrielle initié aux subtilités du brevetage des pigments et peintures, et perçoit rapidement le potentiel que l'ultracentrifugeuse recèle pour performer sur la stratégie de brevetabilité. Peut-être est-ce lors de ses premiers contacts avec l'univers industriel des peintures, à l'occasion du papier co-écrit avec une chimiste de *Acme White Lead and Color*, et présenté en 1925 lors du symposium sur les colloïdes, que Nichols s'est ouvert à l'importance de la mesure des particules de pigments dans cette stratégie. D'ailleurs, certains éléments permettent de penser que ce dernier est en contact avec Du Pont dès 1925, et que certains échantillons de lithopone présentés dans l'article proviennent aussi de Du Pont, en plus de Acme⁷. Il se pourrait que le département des Pigments ait réalisé très tôt la portée de l'ultracentrifugeuse, et que Nichols n'apprenne pas grand-chose à Booge et à Hanahan en écrivant ce mémo fin 1928, mais couche simplement sur papier des discussions et des orientations élaborées de concert. Sur les pigments en tout cas, la portée de la recherche fondamentale sur la brevetabilité des produits et procédés n'a pas attendu les premiers résultats des groupes « fondamentaux » pour être reconnue parmi les chimistes en poste chez Du Pont qui ont milité pour ce programme. Pour Patterson en particulier, les brevets constituent un enjeu essentiel de l'étude colloïdale, physico-chimique du système caoutchouc-titanox qu'il élabore fin 1926 : « Nous pensons qu'une telle étude, d'une nature largement fondamentale », argumente-t-il dans sa proposition début 1927, « serait d'une grande valeur en développant : (a) des informations importantes sur les brevets, avec la possibilité de défendre des revendications plus larges que celles qui semblent à présent possibles en l'absence de fondamentaux, (b)... »⁸.

L'ultracentrifugeuse est opérationnelle en juin 1928, et les premières analyses d'échantillons de lithopone Gold Seal puis du lithopone à fort pouvoir opacifiant manufacturé par Krebs semblent pertinentes aux responsables du département des Peintures. Vers la mi-1929, Krebs sollicite le groupe des colloïdes pour un important programme d'analyse de pigments au zinc et de lithopone à fort pouvoir opacifiant (« *hi-strength* ») par ultracentrifugeuse, dont la vocation explicite est la spécification des brevets couvrant ces pigments. Comme Kraemer l'explique à Tanberg quelques années plus tard, « la plupart des dépenses couvrant ces [premiers travaux] sur les pigments ont été facturées à la Recherche Fondamentale afin d'encourager l'intérêt des départements industriels à la recherche

⁷ Nichols résume ainsi à Kraemer en juin 1929 ses travaux sur les pigments par ultracentrifugeuse : « Jusqu'à présent des échantillons de lithopone issus de l'usine Gold Seal, ainsi qu'un échantillon de 1924 de Du Pont, et un composite du procédé F ont été étudiés, qui donnent successivement des particules de plus en plus petites », in *Mémoire*, Nichols à Kraemer, « Ultracentrifuges studies, June 1928 – June 1929 », 15 juin 1929, JBN 4/Lithopone Newark 1928-1931

⁸ Patterson, « Colloidal study of rubber-titanox and allied disperse systems », Major experimental project n°1140, 12 janvier 1927, GDP 7/Project outlines 1927-1934

fondamentale colloïdale »⁹. Cette coopération formelle entre Krebs¹⁰ et le département de Chimie est ainsi l'occasion d'assurer la visibilité du programme « fondamental » au sein de la compagnie, et de tisser des liens fonctionnels avec ses activités industrielles. Une autre ressource phare du programme fondamental mobilisée dans cette étude sur la brevetabilité des pigments est le laboratoire des rayons X que Kenney dirige à la Station, qui sera renommé et reconnu par l'ensemble de la compagnie comme le « laboratoire de physique » quelques années plus tard. Sans doute averti de l'avance de New Jersey Zinc sur l'utilisation des rayons X pour spécifier les pigments produits, Krebs sollicite à la fois le groupe des colloïdes et le laboratoire des rayons X. Ce projet s'étale entre 1929 et 1930, et s'élève à environ 7000\$ (91 500 [2010]\$), prélevé sur le budget attribué à « Recherche Fondamentale » ; un coût situé dans la moyenne des autres projets fondamentaux sur les pigments (cf. annexe E).

Nichols et Kenney soumettent leur rapport en décembre 1929, qui présente les caractéristiques d'échantillons de lithopone en termes de distribution de taille et de constitution cristalline. Les produits comparés sont le lithopone Gold Seal, le lithopone ordinairement produit par Krebs ainsi qu'un nouveau pigment obtenu en modifiant la phase de calcination du procédé, et un échantillon de New Jersey Zinc¹¹. Les courbes de distribution présentées dans ce rapport sont certainement parmi les premières à mesurer aussi précisément la taille des particules de pigments de n'importe quelle peinture depuis les temps préhistoriques. Le rapport présente également les raies de diffraction des différents pigments :

⁹ Mémoire, Kraemer à Tanberg, 17 août 1932, CRD 21/Fundamental research 1932-1934

¹⁰ Jusqu'en 1942, Krebs est une entreprise juridiquement distincte de Du Pont, même si cette dernière détient 100% de son capital depuis 1929. La préservation d'une séparation formelle entre Krebs et Du Pont n'obéit pas à des motivations techniques ou industrielles, mais légales : il s'agit d'éviter la formation *de facto* d'un « trust » du lithopone, qui soumettrait Du Pont à des pressions politiques puis à des poursuites pénales pour violation de la loi Sherman anti-trust. Cette non-fusion juridique entre ces deux entités n'empêche pas, dans les faits, d'assimiler Krebs à un département industriel de Du Pont. Avec la montée en puissance des pigments au titane dans les 1930 cependant, le problème du monopole sur les pigments va se recentrer sur le titane. En 1942 Krebs devient formellement le département industriel des Pigments de Du Pont.

¹¹ Nichols et Kenney, « Particle size and constitution of Krebs high strength lithopones », Experimental Station B-189-49 report, 19 décembre 1929, CRD 10/B-189-48 to B-189-51

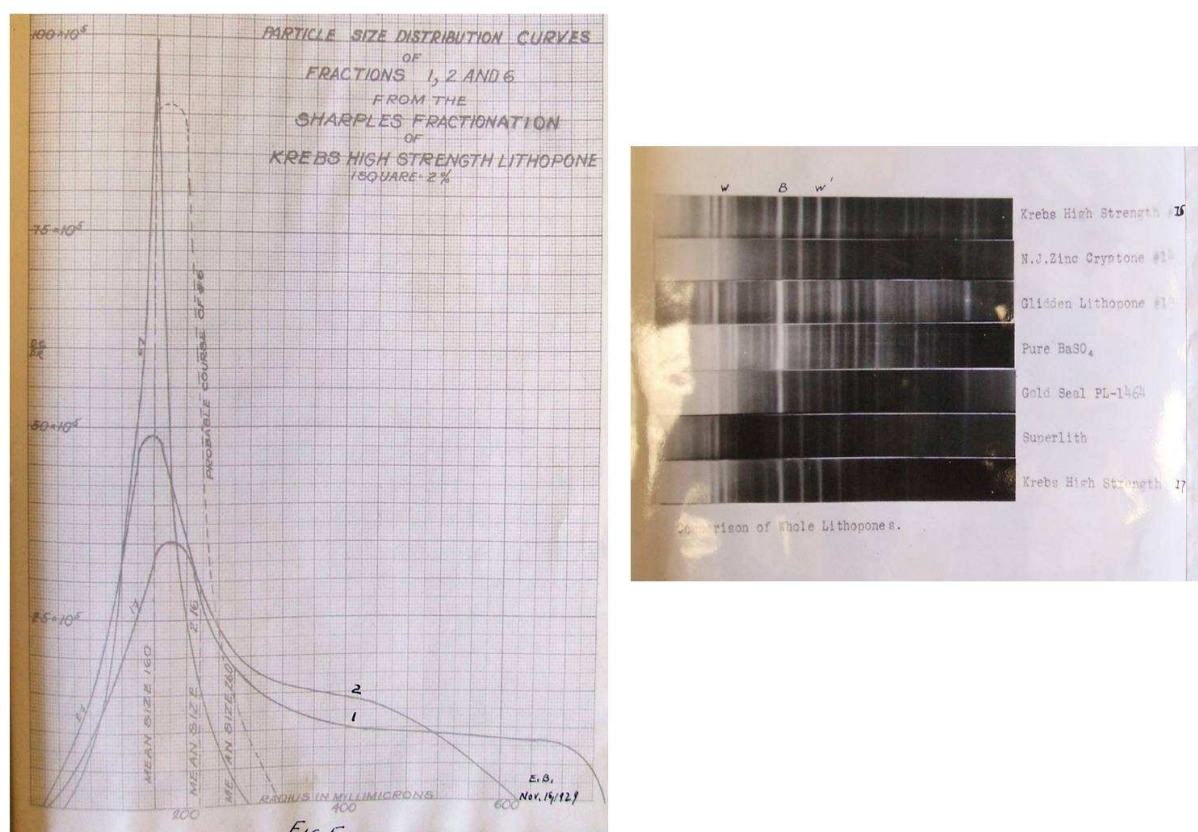


Figure 7.1 — Extraits du rapport de Nichols et Kenney

Noter l'unité utilisée pour exprimer la taille des particules : le millimicron. Les raies w et w' sont celles de la sphalérite et de la wurtzite, caractéristiques de la présence de sulfure de zinc.

Si le pouvoir de résolution du microscope est trop faible pour discerner tous les pigments dispersés dans leur véhicule, celui de l'ultracentrifugeuse n'est pas adéquat pour mesurer les particules les plus grossières. Cet instrument ne peut être fiable que sur une fourchette restreinte de taille de particules, les plus fines composant un échantillon de peinture diluée. Aussi, l'analyse exclusivement par ultracentrifugeuse ne peut pas fournir des estimations fiables sur la moyenne de taille des particules. Rapidement Hanahan demande à Nichols d'effectuer l'analyse des mêmes échantillons par microscopie pour la portion la plus grossière, afin d'obtenir une valeur moyenne qui tienne compte de cette portion¹². Hanahan semble convaincu que ces recherches vont rapidement déboucher sur des résultats utiles pour breveter le nouveau procédé qu'il met au point à Krebs, car il suggère à Nichols d'envoyer ce rapport au département Légal de Du Pont¹³. Courant 1930, Nichols continue à échanger avec Hanahan sur l'impact de la modification de l'étape de calcination sur la taille des pigments, et la portée de ces informations en tant que spécifications du nouveau procédé (baptisé « *F-process* »). En partie suite à ces échanges, Hanahan dépose un brevet en avril 1931, qui sera accordé par le bureau des brevets en 1934 seulement. Sur les 24 revendications associées à ce

¹² Nichols, « Particle size and texture of hydroseparator fraction of gold seal lithopone », Experimental Station B-189-51 report, 14 mars 1930, *Ibid.*

¹³ Lettre, Nichols à Hanahan, 15 mars 1930, *Ibid.*

brevet, 7 concernent des spécifications sur la taille moyenne et la distribution des pigments produits¹⁴.

Après ces succès sur le procédé modifié du lithopone de Krebs, d'autres mobilisations de l'ultracentrifugeuse en tant que moyen instrumental de spécification des brevets suivront. Par exemple pour les pigments de couleur au chrome (« *chrome yellow* »), qui dominent au cours des années 1930 les pigments colorés, et qui font l'objet d'efforts de recherches intenses de la part de Krebs (cf. chapitre 8). Afin de déterminer les meilleurs critères de brevetabilité de ces nouveaux pigments au chrome, Nichols est chargé d'« estimer les limites numériques permettant de caractériser la nouveauté du produit »¹⁵. Il s'agit donc de mesurer certaines propriétés – taille de particule, pouvoir opacifiant, pureté d'excitation, spectre d'absorption – et de déterminer laquelle est la plus indiquée pour prétendre à la nouveauté du produit. En ce qui concerne la taille de particules, Nichols estime que la taille moyenne des particules ne devrait pas être supérieure à 65 « millimicrons », et qu'une grande fraction des particules devrait être inférieure à 100 « millimicrons ». Kenney indique en 1935 qu'une grande partie du travail de microscopie effectué par son laboratoire de physique est orienté par des litiges qui émergent sur les brevets de Du Pont ou ses concurrents¹⁶. La brevetabilité des pigments au titane et des procédés de production associés ont également très vite occupé l'attention du groupe des colloïdes.

L'insertion de Du Pont dans une technologie brevetée : négociier, attaquer, défendre les brevets des pigments au titane

Alors que Du Pont vient à peine d'investir massivement dans le lithopone en achetant Grasselli puis Krebs, les pigments au dioxyde de titane, commercialisés aux États-Unis depuis 1916, commencent sérieusement à pénétrer les marchés du lithopone. Initialement peu compétitif économiquement avec les autres pigments blancs, au tournant des années 1930 le titane commence à se substituer au lithopone dans la formulation de certaines peintures et revêtements, et surtout comme agent de charge dans les caoutchoucs et autres matériaux comme le linoléum. Deux principales compagnies se partagent la production des pigments au titane à la fin des années 1920 : La National Lead Company, qui résulte de la concentration des entreprises américaines produisant du blanc de plomb, et qui s'est approprié en 1920 les droits d'exploitation du procédé Blumenfeld au sulfate (cf. chapitre précédent) ; la Commercial Pigment Corporation (abrégée par la suite CPC), une filiale d'une importante compagnie fabricant des solvants, entretenant des relations commerciales étroites avec Du Pont en lui fournissant les solvants utilisés dans les laques « *Duco* ». Les qualités optiques intrinsèques au titane, et l'amélioration que ces deux compagnies parviennent à apporter aux procédés de production, permettent à ce nouveau pigment d'être rapidement compétitif sur le

¹⁴ M.L. Hanahan, « Method of producing zinc sulfide pigments and product thereof », U.S. patent # 1 977 583, attribué le 16 octobre 1934

¹⁵ Nichols à Coolidge, « C.C.D. 83, chrome yellow of high color strength », 15 septembre 1936, GDP 12/Chronological files 1930-1936

¹⁶ Kenney, « General physical research », major experimental project # 1550, 23 décembre 1935, GPD 7/Project outlines 1935-1937

marché des pigments blancs. En 1930 National Lead réduit pour la deuxième fois en deux ans le prix de ses pigments au titane de 10%, et les ventes de lithopone de Du Pont s'effondrent. Cet épisode précipite son entrée sur la scène du titane, et ses dirigeants négocient le rachat en 1931 de CPC, ainsi qu'un accord sur les brevets et les procédés avec National Lead en 1933¹⁷.

La transition vers les pigments au titane illustre les différentes stratégies qui s'offrent à une firme industrielle majeure, alors que sa domination sur une ligne de produits est menacée par une innovation radicale dont le développement a été repris par d'autres firmes majeures. Un mélange de compétition et de coopération – jugées par la suite illégales – permet à Pont et National Lead de se partager les marchés nationaux, puis internationaux, des pigments au titane. En effet, freiné par le nombre et la qualité des brevets protégeant le procédé au sulfate (alors le seul viable économiquement), Du Pont a initialement cherché à mettre au point un procédé modifié qui n'enfreindrait pas les brevets existants. Courant 1929, le département du Développement a demandé au département de Chimie de mettre au point ce procédé. Une équipe se constitue à la Station, dirigée par John L. Keats, et comprenant douze chimistes. L'objectif de cette équipe est dans un premier temps de dupliquer le procédé de CPC, en espérant déceler certaines failles des brevets existants et modifier le procédé de manière à exploiter ces failles¹⁸. Au préalable, Keats avait déjà travaillé à la Station sur le lithopone et en particulier sur les litiges entre Du Pont et New Jersey Zinc dans les procédés associés (cf. chapitre précédent).

Un des moyens de fabriquer des pigments au titane sans enfreindre les brevets des concurrents est d'ajouter un « *extender* » dans la formulation du pigment, c'est-à-dire une substance autre que le titane censée améliorer sa tenue générale (durabilité, texture...), sans contrepartie rédhibitoire sur ses qualités optiques. De cette manière, la fabriquant peut défendre la nouveauté de son produit ou de son procédé, et ainsi passer outre les brevets sur les pigments au titane. National Lead détient les brevets sur le « Titanox », c'est-à-dire sur les pigments au titane contenant des *extenders* au calcium ou au baryum. Pour contrer ces brevets, l'attention de l'équipe de Keats et des départements industriels en lice pour produire le dioxyde de titane comme Krebs se porte sur la nature des pigments produits par National Lead. En modifiant la façon dont les *extenders* sont mélangés au titane, peut-être le produit final en résultant sera-t-il assez différent du « Titanox » pour prétendre à la nouveauté ? Nichols et son expertise sur l'ultracentrifugeuse sont mobilisés fin 1929 pour comprendre comment le calcium se lie avec le titane, afin d'en déduire des imprécisions dans les brevets détenus par National Lead :

En d'autres mots, résume Nichols dans un rapport envoyé à Booge et au département Légal, il s'agit d'établir si une mixture simple de composés, ayant approximativement la

¹⁷ H&S, pp. 210-9

¹⁸ Cole Coolidge, « Titanium pigments – monthly summary report », octobre 1929, GDP 10/Pigment rerserch – summary reports 1929-1931 ; J.L. Keats, « Titanium Pigments », Major experimental project # 1264, 18 aout 1930, SCS 5/Titanium dioxide

même qualité opacifiante que le Titanox, constituerait une infraction des brevets de Barton [détenus par National Lead] sur le Titanox en tant que pigment coalescé.¹⁹

Comme pour le lithopone quelques mois plus tôt, les pigments au titane font également l'objet d'analyse, par ultracentrifugeuse et par rayons X, pour déterminer la taille des particules et leurs caractéristiques cristallines. Ces informations sont pertinentes pour sonder l'état microscopique des pigments, notamment la façon dont les *extenders* se lient avec le titane. De cette meilleure connaissance de l'état microscopique des pigments découle la stratégie de brevetage du nouveau procédé, et de défense vis-à-vis des brevets déjà déposés. Comme l'avait anticipé Charles Reese quelques années plus tôt, l'instrumentation de pointe, lorsqu'elle est appropriée par l'industrie, trouve une de ses justifications majeures dans la lutte que se livrent les firmes par le biais des brevets.

Mais la menace grandissante du blanc de titane sur le lithopone courant 1930 a brutalement conduit les dirigeants de Du Pont à essayer d'autres voies que le développement d'un procédé en interne pour s'insérer dans la technologie du titane. Du jour au lendemain, ils se sont mis à négocier très rapidement avec leurs concurrents. En aout 1931, Du Pont devient l'actionnaire majoritaire de CPC, et forme entre cette dernière et Krebs une *joint-venture* baptisée *Krebs Pigment & Color Corporation*. James Booge est promu directeur technique de cette compagnie, dont Du Pont détient 100% du capital. Les connections que CPC avait développées avec les principaux producteurs d'oxyde de titane en Europe sont reprises par Du Pont, et en particulier, par le département de Chimie. Les chimistes de la Station, dont le groupe des colloïdes, entrent en contact avec les chimistes de l'entreprise française Thann et Mulhouse, avec qui Blumenfeld a développé industriellement son procédé au sulfate à partir de 1922. Les échantillons de titane de Thann et Mulhouse traversent l'Atlantique et sont introduits dans les ultracentrifugeuses de la Station, pour déterminer les différences entre les procédés américains et européens²⁰.

Cette connexion avec Thann et Mulhouse va s'avérer précieuse pour Du Pont dans le brevetage du procédé au chlore, qui va remplacer le procédé au sulfate dans l'après-guerre. Début 1925 en effet, Thann et Mulhouse négocie des accords avec la *Verein für chemische und metallurgische Produktion* située à Aussig, dans ce qui est alors la Tchécoslovaquie. Cette compagnie vient de mettre au point le procédé d'électrolyse à cathode de mercure, permettant notamment de produire du chlore en grande quantité²¹. Le procédé au chlore pour produire l'oxyde de titane utilisé par les chimistes d'Aussig fournit des pigments d'une autre nature cristalline, dotés de propriétés optiques supérieures aux pigments produits par le procédé au sulfate. Cependant, la difficulté d'opérer ce procédé à un niveau économiquement compétitif vis-à-vis du procédé au sulfate le rend marginal jusqu'aux années 1950.

¹⁹ Nichols, « Pigments, particle-size, and constitution of a titanium pigment », Experimental Station B-189-50 report, 11 février 1930, JBN 6/Titanium reports 1930, souligné dans l'original

²⁰ Jelks BARKSDALE, *Titanium. Its chemistry, occurrence, and technology*, New York, Ronald Press Company, 1946, p. 362 ; Nichols, Experimental Station quarterly progress report September-December 1931, 8 décembre 1931, CRD 17/Quarterly reports JB Nichols I&II

²¹ Marc DROUOT, André ROHMER, Nicolas STOSKOPF., *La fabrique de produits chimiques Thann et Mulhouse : histoire d'une entreprise de 1808 à nos jours*, Strasbourg, La nuée bleue, 1991, pp. 138-42

Néanmoins, les échantillons circulent entre Krebs, le groupe de Keats et de Kraemer, Aussig et Thann et Mulhouse entre 1931 et 1932. Les propriétés remarquables des pigments issus du procédé au chlore sont interprétées en termes de taille de particule et de nature cristalline (cf. section suivante). Comme pour le lithopone et l'association entre Hanahan et Nichols, les informations sur la taille de particules des pigments issus du procédé au chlore sont mobilisées dans les revendications du brevet couvrant le nouveau procédé. Le brevet français protégeant le procédé au chlore, déposé par les chimistes d'Aussig, est cédé, sur le territoire américain, à Du Pont. Il contient des revendications sur la taille des particules et s'appuie sur les publications de Svedberg et Nichols sur l'ultracentrifugeuse (la Station étant alors l'un des deux seuls laboratoires au monde, avec Uppsala, à détenir une ultracentrifugeuse de type Svedberg). De même, la nature cristalline du pigment obtenu (« rutil ») par le procédé au chlore est détectée par rayons X. Les chimistes d'Aussig affirment que les qualités optiques exceptionnelles du pigment associé s'expliquent par la nature cristalline distincte du pigment obtenu par le procédé au sulfate, et par la plus petite taille des particules produites : 0.33μ en moyenne (en diamètre), dont la distribution s'étale entre 0.1 et 0.6μ ²². Les premiers pigments issus du procédé au chlore sont commercialisés à partir de 1951, et rapidement ce procédé s'est entièrement substitué au procédé au sulfate.

Articulation du réductionnisme – topologie de la recherche

Pour Nichols, l'apport de la quantification de la taille des pigments sur leur brevetabilité n'est qu'un épiphénomène par rapport à ce que l'ultracentrifugeuse, et le programme expérimental qu'elle ouvre, recèlent comme intérêts techniques et industriels sur les pigments. Le groupe des colloïdes en vient rapidement à se concevoir comme un auxiliaire aux pratiques industrielles à vocation théorique, c'est-à-dire explicative et prédictive. Puisque les propriétés des substances dépendent « fondamentalement » de leur microstructure, la détermination précise de ces microstructures permet, dans cette acception, de proposer des critères de comparaison entre des produits qui semblent a priori identiques, ou qui ont des propriétés différentes bien qu'issus d'une formulation identique. Elle permet également d'interpréter sur de nouveaux critères – pensés comme plus objectifs et universalisables – les résultats des nombreuses expériences réalisées dans l'industrie pour tester la durabilité d'une peinture, la qualité d'une nouvelle formulation, l'impact réel d'une modification d'un procédé... En bref, le groupe des colloïdes se propose de « rationaliser » l'ensemble du processus de production et d'innovation sur les pigments. Il se pense comme un contrepoids salvateur à la méthode d'innovation empirique, qui, dans sa vision de la chimie industrielle, domine celle-ci et entraîne un gaspillage de temps et d'argent considérable.

Sans doute Nichols est frappé par la multiplication des panneaux d'exposition pour tester le comportement d'une formulation de peinture ou de vernis dans les conditions réelles d'utilisation. Ces panneaux, en tant qu'épreuve « scientifique » et non de démonstration

²² Paul Kubelka & Josef Srbeek, « Rutile Pigments and process of making the same », U.S. Patent # 2062133, déposé le 20 février 1932 et accordé le 24 novembre 1936

commerciale, émergent significativement au tournant des années 1910 et se multiplient par la suite ; à partir du milieu des années 1920, Du Pont entretient ses propres panneaux d'exposition (cf. chapitre précédent). En 1927, plus de 700 panneaux sont en activité pour tester les laques, peintures et vernis commercialisés par Du Pont, et sont, d'après Stine, « constamment utilisés »²³. La plupart de ces produits contiennent des pigments minéraux ; Patterson, qui est alors occupé principalement par le problème de durcissement des vernis « *Brush Duco* » du fait de la formation de dépôts de pigments, utilise intensément ces panneaux d'exposition. Devant la multiplication des formules testées, dès que l'ultracentrifugeuse est opérationnelle Nichols offre son expertise sur la détermination de la taille des particules afin d'aider à interpréter l'ensemble de ces résultats expérimentaux, et peut-être de réduire le nombre d'expériences :

La détermination de la distribution des tailles de particule des pigments utilisés par le groupe du Dr. Patterson, dans leur étude générale des caractéristiques des films de peinture, fournirait des données importantes pour interpréter les résultats obtenus à partir de leurs tests d'exposition.²⁴

Très rapidement cependant, cette posture de conseil et d'auxiliaire de rationalisation s'est muée en une demande : pour pouvoir réaliser ses propres ambitions théoriques – la corrélation des microstructures et des propriétés –, le groupe des colloïdes a milité pour que les propriétés des peintures et des vernis soient mesurées d'une façon plus « objective ». Ce faisant, il a contribué à amplifier l'essor des nouvelles spécifications sur les peintures, fondées sur les propriétés physiques plutôt que sur l'analyse chimique. C'est effectivement à travers la standardisation accrue des propriétés optiques des peintures que le groupe des colloïdes a pu enfanter un de ses plus beaux succès théoriques : la « *Master Curve* », qui relie taille de particule, indice de réfraction, et absorption de lumière.

« *Rationnaliser* » la production et l'innovation

De même que Bradshaw, en militant pour la centralisation des tests sur les peintures et vernis au sein de la Station et leur « scientification », promouvait une vision des substances qui n'était pas nécessairement celle des chimistes ou employés des usines, Kraemer et Nichols n'ont pas nécessairement la même idée, vis-à-vis de ceux-ci, de ce qu'est une peinture ou de ce qu'il est important d'en dire ou d'en connaître. Le cadre de la chimie colloïdale incline le groupe des colloïdes à appréhender ces substances avant tout comme des « dispersions », un enchevêtrement de petites particules de différentes formes et tailles nageant ou flocculant dans un véhicule liquide : « Les peintures et les laques, les compositions de revêtement et les plastiques “pigmentés”, et divers autres produits industriels similaires possèdent la caractéristique commune d'être des dispersions concentrées de fines poudres. De nombreuses propriétés de telles dispersions sont intimement reliées à l'état de subdivision des particules

²³ Stine, rapport du département de Chimie au Comité Exécutif de 1927, 31 janvier 1928, CRD 16/annual reports 1922-1929

²⁴ Mémoire, Nichols à Tanberg, « Determination of size of particle in pigments and coarse materials in viscous media », 28 novembre 1928, JBN 4/lithopone newark 1928-1931

dispersées », résume Kraemer dans un de ses rapports de 1930²⁵. Bien évidemment, ce n'est pas que les chimistes ou ouvriers travaillant dans les usines ignorent que les peintures sont composées de fines particules solides, ni même que leur « état de subdivision » peut expliquer certaines de leurs propriétés ; la conception des peintures comme des systèmes dispersés est tout simplement moins prégnante dans leur compréhension de ces substances, moins efficace pour leurs activités routinières – que ce soit de production, de contrôle de la qualité, ou d'innovation. La conception des peintures comme une « formulation », c'est-à-dire l'addition d'un ensemble de substances menant au pigment et à la peinture, leur a sans doute paru beaucoup plus simple et naturelle pour guider leurs tâches et interpréter leurs actions, leurs innovations.

Cette différence de représentation de la substance se manifeste notamment dans le vocabulaire : Kraemer met systématiquement entre guillemets le terme « *extenders* » lorsqu'il l'utilise, indiquant par là qu'il prend ses distances par rapport à ce terme, qu'il le problématise. Les « *extenders* »²⁶ sont pourtant d'une importance considérable pour les chimistes spécialistes des peintures, et l'utilisation du terme n'est pas problématique pour ceux-ci comme elle l'est pour Kraemer. Considérer les peintures comme des dispersions de particules conduit à relativiser la différence entre un pigment et un *extender* ; à l'inverse, cette différence prend tout son sens dans les pratiques de fabrication du pigment et de la peinture, où la catégorisation des composés en « pigment » et en « *extender* » est impérative : jamais une peinture composée uniquement d'*extenders* comme la silice, les barytes ou les fibres d'amiante ne recouvrera quoi que ce soit durablement. De même, la différence entre un pigment et un *extender* sur les propriétés optiques de la peinture fait sens également pour ces chimistes, artisans ou ouvriers de la peinture : un *extender* peut jouer sur la teinte ou la profondeur de ton d'une peinture, mais n'influe pas sur sa couleur comme le fait un pigment. Mais c'est sur les propriétés optiques des peintures, qui sont techniquement et commercialement capitales, que la vision du groupe des colloïdes va se retrouver le plus en décalé avec les pratiques des employés des usines.

« Les propriétés optiques sont parmi les plus importantes », écrit ensuite Kraemer, « car elles déterminent l'apparence visuelle de ces matériaux, qui fonde une grande partie de leur valeur ». La vocation d'une peinture est de cacher une surface ; si une fois peinte, on devine encore la surface, alors il faut remettre une couche. Cette propension d'une peinture à couvrir une surface a dominé ce que les professionnels entendaient par « propriétés optiques » ; si l'esthétique est importante, le pouvoir de recouvrement est la condition première de la qualité d'une peinture. Malgré l'importance de cette propriété, sa nature et les moyens de l'exprimer et de la quantifier ne se sont jamais vraiment stabilisés, et les chimistes utilisent bien souvent leurs propres recettes et méthodes dans leur coin pour appréhender ces propriétés optiques. Gustave Thompson, le chimiste de National Lead, raconte que Charles Dudley, un des

²⁵ Kraemer, quarterly report January-April 1930, JBN 4/quarterly reports colloid group

²⁶ Que l'on peut traduire maladroitement par « rallongeur », et qui désigne une substance minérale ajoutée en plus du pigment dans la formulation de la peinture, permettant de réduire son coût ou censée améliorer sa durée de vie, ou affecter sa tonalité. Ils sont aussi désignés comme « *reinforcing pigments* » ou « *fillers* ».

premiers à appréhender « scientifiquement » ces propriétés au cours des années 1890, donne pas moins de trois significations différentes au « pouvoir de recouvrement » (« *covering power* »), c'est-à-dire la capacité d'une peinture à occulter une surface²⁷. Suite à la diversité d'interprétation que ce terme a généré, le comité D1 de l'ASTM, lorsqu'il se forme en 1910, propose de l'abandonner et de lui substituer deux notions : l'opacité (« *opacity* ») et le pouvoir couvrant (« *hiding power* »). Cette distinction est contingente à une époque, et a généré beaucoup de confusion parmi les chimistes, en partie parce qu'il n'était pas toujours très clair de déterminer si ces grandeurs s'appliquaient à un pigment ou à une peinture. De nos jours, cette distinction n'est plus effective et en pratique « opacité » et « pouvoir couvrant » sont utilisés de manière interchangeable.

Au début du siècle cependant, la distinction établie entre opacité et pouvoir couvrant reflète la catégorisation des substances entrant dans la composition des peintures entre « pigment » et « adjuvant ». Les adjuvants – qui sont progressivement rebaptisés *reinforcing pigments* et *extenders* – sont insuffisants pour occulter une surface, au moins durablement. Ils n'ont donc pas d'opacité intrinsèque, contrairement aux pigments. En revanche, ajoutés dans une peinture contenant un pigment donné, ils modifient le pouvoir couvrant de la peinture car ils influent sur l'épaisseur de la couche une fois séchée. La grandeur « pouvoir couvrant » permet ainsi de tenir compte de cette modification du pouvoir opacifiant du pigment par les *extenders* dans la formulation finale. Le pouvoir couvrant en est donc venu à caractériser le pouvoir d'occultation de la peinture dans sa formulation finale. L'opacité a été reliée au pouvoir opacifiant d'un pigment en particulier, utilisé dans un véhicule et mesuré dans des conditions « standard ». Ainsi l'ASTM donne les définitions suivantes. Pouvoir couvrant : « Le pouvoir d'une peinture ou d'un matériau de peinture, tel qu'utilisé, à occulter [« *to obscure* »] optiquement une surface peinte avec celle-ci » ; opacité : « l'obstruction à la transmission directe de la lumière visible provoquée par une substance, les comparaisons étant réalisées avec des sections d'épaisseur égales. L'opacité dans le cas de pigments devrait être considérée en référence à leur opacité dans un véhicule dans des conditions standards »²⁸. La confusion qui a entouré l'utilisation de ces notions se reflète dans l'évolution des termes pour les exprimer : le groupe des colloïdes utilise « pouvoir opacifiant » (« *obscuring power* ») pour opacité, et utilise également, de manière différenciée, pouvoir couvrant (« *hiding power* »)²⁹.

Une grandeur qui semble beaucoup moins problématique que l'opacité, ou plus naturelle, pour appréhender ces propriétés optiques est celle de « force » d'un pigment, ou « force de teinture » (« *strength* » ou « *tinting strength* »). Cette notion de force est une

²⁷ G.W. THOMPSON, « Tests on the opacity and hiding power of pigments », *JIEC*, vol. (1913), pp. 120-123

²⁸ Cité par Thompson, *Tests on the opacity*, *op. cit.*

²⁹ Nichols définit ainsi le pouvoir opacifiant : « Le nombre de centimètres carrés d'une surface à travers laquelle un filament d'arc électrique est complètement invisible, sous des conditions spécifiques : lorsque la colonne de dispersion couvrant la surface contient un gramme de pigments. Pour un spécimen donné le pouvoir opacifiant augmente alors la taille de particule diminue », in Kraemer, « Semi-annual June 1929 report », p.6, JBN 4/Quarterly reports colloid group. Le test de pouvoir couvrant, lui, s'effectue avec des peintures réelles, non-diluées, et lorsque le film est encore humide.

grandeur relative, elle désigne la capacité d'un pigment ou substance colorante à modifier la couleur ou la teinte d'une autre substance colorante. (cf. annexe F pour un exemple de test *hiding power* et *tinting strength*). La grandeur et le test de « force » semblent plus répandus dans les usines que les tests sur l'opacité, peut-être parce que, grandeur relative, elle permet de mieux saisir l'impact d'un pigment ou d'une substance colorante dans une formulation globale. Par exemple, les chimistes d'Aussig qui ont collaboré avec Nichols sur les pigments issus du procédé au chlore ne mentionnent pas dans leur brevet le test d'opacité, mais comparent la qualité des différents pigments produits uniquement à partir du test de force. Ils décrivent de la manière suivante l'application de ce test aux pigments au titane :

La force de teinture des pigments est habituellement comparée en déterminant la quantité de pigment blanc nécessaire pour “illuminer” [« *to “lighten up”* »] jusqu'à un certain point une quantité donnée d'un pigment coloré, par exemple, l'ultramarine, lorsqu'ils sont minutieusement incorporés dans une huile incolore.³⁰

Contrairement à la distinction entre opacité et pouvoir couvrant, qui n'a pas survécu, cette grandeur continue à être utilisée de nos jours, en complément au pouvoir couvrant. Peut-être parce que, en dépit de nombreuses tentatives, les chimistes ne sont pas parvenus à comprendre et à expliciter totalement les relations qui existent entre le pouvoir couvrant et la force de teinture.

De même que Kraemer considère la catégorie *extender* comme problématique, l'ensemble de ces grandeurs pour statuer sur les propriétés optiques est également problématique à ses yeux ; aussi les manipule-t-il parfois entre guillemets, et considère que les méthodes pour mesurer ces grandeurs sont « indirectes », difficilement quantifiables, et à bien des égards archaïques :

Les fabricants de peinture, écrit Kraemer à Stine en 1930, ont été si loin dans la négligence du film de peinture que dans bien des cas ils en sont venus à dépendre de méthodes indirectes pour estimer les pouvoirs couvrants, sans déterminer la corrélation entre le pouvoir couvrant et le test, ou même sans établir la validité du test : des “forces de teinture” sont mesurées, des lectures par cryptomètre sont faites sur des films humides qui ont une composition et une structure assez différente que celle du film de peinture final, ou des “pouvoirs opacifiants” de suspensions diluées sont observées. Ces méthodes ne peuvent pas déboucher sur une description quantitative des conditions optimum du pigment et du medium [véhicule] dans un film de peinture du point de vue du pouvoir couvrant.³¹

La définition et la mesure des propriétés optiques sont ainsi perçues comme des verrous techniques et scientifiques urgents à dénouer pour que l'industrie des peintures continue à progresser, et sur lesquels la compétition est la plus à même de se concentrer dans l'avenir. Le pouvoir couvrant seul doit se substituer à la « force de teinture » et au « pouvoir opacifiant » pour statuer sur la qualité optique d'une peinture. Le pouvoir couvrant devient un « problème », il doit être redéfini « scientifiquement » pour que l'ambitieuse stratégie

³⁰ Kubelka & Srbek, *Rutile pigments and process of making the same*, op. cit.

³¹ Mémoire, Kraemer à Stine, 26 mars 1930, JBN 4/Miscellaneous

d'investissement dans les pigments de Du Pont ait quelque chance de succès : « Je voudrais profiter de cette occasion », écrit Kraemer à Patterson à peu près au même moment, « pour vous exprimer ma conviction que la clé du problème du pouvoir couvrant dans les peintures blanches nous échappera toujours tant qu'une étude fondamentale et minutieuse de la base physique du pouvoir couvrant ne sera pas entreprise.[...] Les réponses aux questions suivantes sont nécessaires afin que le pouvoir couvrant puisse être scientifiquement contrôlé ou amélioré : »³². Kraemer décline ensuite les orientations d'un programme permettant de relier microstructures et pouvoir couvrant, articulant les propriétés « physiques » des peintures, qui font l'objet d'une attention accrue par les chimistes depuis le début du siècle, avec ce que Kraemer appelle « structure physique », c'est-à-dire microstructure (cf. annexe G). Les deux sens de « physique », signifiant toute propriété non-chimique d'une part, et structuration microscopique d'autre part, se lient inextricablement dans le programme du groupe des colloïdes. Patterson étant membre du comité D1 de l'ASTM, ces revendications ont quelque chance d'influer sur la trajectoire qu'empruntera la définition des propriétés optiques.

Mais ce n'est pas uniquement sur des critères scientifiques que Kraemer se permet de juger les méthodes de détermination des propriétés optiques ayant cours dans les usines, ou d'accorder la primauté à accorder au pouvoir couvrant sur les autres grandeurs pour rendre compte de ces propriétés. Le critère économique est la principale motivation pour entreprendre une refonte « scientifique » du pouvoir couvrant. Dans la lettre adressée à Stine en 1930 et destinée à lever des fonds pour cette étude sur le pouvoir couvrant, Kraemer met en avant le risque de saturation du processus d'innovation dans les pigments qui guette les usines et laboratoires de Du Pont, et la fièvre qui s'est emparée des chimistes avec l'introduction des pigments au titane :

Notre propre usine à Newark propose de dépenser des sommes considérables visant à atteindre des améliorations significatives sans aucune assurance que ces améliorations sont possibles avec les matériaux en question. [...] Des centaines ou des milliers d'expériences seront faites en mélangeant l'oxyde de titane avec d'autres matériaux, mais au bout du compte, si aucun moyen n'est trouvé pour évaluer les résultats en termes d'un optimum idéal, un tel travail empirique ne mènera qu'à un gâchis d'argent en essayant l'impossible, ou bien laissera la possibilité qu'un autre découvre ce que le pouvoir couvrant signifie, et réussisse une amélioration révolutionnaire d'une façon relativement facile.³³

La dichotomie « fondamental/appliqué » revêt une signification claire lorsqu'elle s'exprime sur le terrain des pigments, des peintures et vernis. Le « travail empirique » a montré son efficacité pour l'innovation sur les pigments, mais pour combien de temps encore, se demande en substance Kraemer ? Qui sait jusqu'où les qualités optiques peuvent être améliorées, et qui sait si l'effort intense déployé par la recherche industrielle pour améliorer les pigments n'est pas prêt d'atteindre un seuil limite, au-delà duquel il est vain de

³² Mémorandum, Kraemer à Patterson, 17 juillet 1930, JBN 4/Lithopone Newark 1928-1931

³³ Kraemer à Stine, 26 mars 1930, *op. cit.*

s'aventurer ? La recherche « fondamentale » se doit de déterminer les limites théoriques aux propriétés optiques, afin d'orienter les pratiques de la recherche « appliquée » et d'indiquer les directions les plus prometteuses. C'est par le biais d'une compréhension « fondamentale » du pouvoir couvrant que les chimistes parviendront, selon les termes de Kraemer, à « substituer une procédure rationnelle à un empirisme aveugle pour continuer à progresser vers le pouvoir couvrant optimal »³⁴.

Les pigments au titane, qui au tournant des années 1930 commencent à être commercialisés et semblent intrinsèquement plus performants que les pigments au lithopone, déplacent la question de la limite du pouvoir couvrant d'un enjeu scientifique et technique à un enjeu économique immédiat. Au même moment en effet, les stratèges de Du Pont se demandent si le lithopone, bien établi, peut rivaliser techniquement et économiquement avec ces nouveaux pigments au titane, qui pénètrent lentement mais sûrement le marché des pigments blancs. « Il semble que notre expérience accumulée jusqu'à présent », écrit fin 1929 le directeur de Krebs au vice-président de Grasselli, « pourrait nous indiquer si la compagnie New Jersey Zinc a raison d'espérer "étouffer" les pigments au titane grâce au lithopone à force élevée [*hi-strength lithopone*] »³⁵. La limite de force de teinture du lithopone devient alors un paramètre stratégique qui pèse dans la décision d'investir dans les pigments au titane. Si le lithopone peut encore être amélioré jusqu'à approcher ses performances, alors la nécessité d'investir dans le titane se fait moins pressante. Le vice-président de Grasselli, en particulier, n'est pas convaincu que les pigments au titane peuvent rivaliser si facilement et si rapidement avec le lithopone³⁶. Début 1930, la connaissance du pouvoir couvrant maximal auquel peut prétendre le lithopone, et indirectement la compréhension de « ce que signifie » cette propriété optique, se lestent d'enjeux stratégiques importants alors que le nouveau pigment menace les profits confortables de Du Pont sur le lithopone. Ces considérations stratégiques ont sans doute concouru à ce que Stine, le directeur du département de Chimie qui est alors engagé dans des négociations avec les autres compétiteurs sur les pigments au titane, prête une oreille attentive à la plaidoirie de Kraemer. Cette plaidoirie est entendue et le programme de Kraemer rapidement avalisé (cf. section suivante). Dans l'immédiat cependant et en parallèle à ce projet, le développement par l'équipe de Keats d'un procédé de production d'oxyde de titane occupe une bonne partie des ressources du groupe des colloïdes.

La transition vers les pigments au titane

La mobilisation de l'ultracentrifugeuse et des rayons X sur le brevetage du lithopone, puis sur le titane, se poursuit alors que le département de Chimie se lance dans ce procédé en novembre 1929. Les connexions établies entre Krebs d'une part, et le groupe des colloïdes et le laboratoire de Kenney d'autre part, sont reprises par Keats, à qui il est confié la difficile tâche de copier le procédé de CPC tout en le modifiant suffisamment pour prétendre à la

³⁴ *Ibid.*

³⁵ Lettre, Zack Phelps à E.C. Thompson, 28 décembre 1929, WHF 1/Krebs Pigment and Color Co. Titanium Pigments

³⁶ H&S, p. 213

nouveauté. Ces instruments de pointe et l'expertise permettant d'interpréter leurs résultats apportent, selon Keats alors qu'il sollicite à nouveau 50 000\$ en août 1930 pour continuer la mise au point du procédé, « une assistance précieuse » dans cette tâche³⁷. Comment ces outils aident-ils au développement du procédé ? En quoi la quantification de la taille des particules et la détermination de leur nature cristalline est-elle utile, ou indispensable, à cette entreprise de plagiat-démарcation ? Pour comprendre comment la recherche « fondamentale » de Kenney et du groupe des colloïdes s'articule avec la recherche de l'équipe de Keats, pour le coup reconsidérée comme « appliquée », il est nécessaire de rentrer un peu dans les détails du procédé au sulfate.

L'ilménite, un minerai contenant principalement du titane et du fer, constitue la matière première approvisionnant la plupart des industries du titane. La production du pigment associé par le procédé au sulfate comporte trois étapes principales, qui sont les plus décisives dans la qualité du pigment : l'attaque de l'ilménite broyée à l'acide sulfurique concentré, la précipitation des pigments par hydrolyse, et leur calcination à haute température. De toutes les étapes du procédé, l'hydrolyse est la plus délicate et déterminante pour la qualité des pigments produits. C'est en effet au cours de cette étape que l'oxyde de titane en solution précipite en petites particules solides ; les conditions expérimentales dans lesquelles se déroule cette étape – durée de l'hydrolyse, température, pH, concentration des espèces, pression... – influent de façon extrêmement sensible sur les caractéristiques de l'oxyde de titane précipité. C'est principalement sur l'étape de l'hydrolyse que Keats espère se démarquer suffisamment du procédé breveté au sulfate. Habituellement l'hydrolyse s'effectue à partir de solutions très concentrées en oxyde de titane. Keats travaille avec des solutions diluées, ce qui modifie la qualité du pigment produit ; pour retrouver les qualités pigmentaires obtenues à partir de solutions concentrées, Keats utilise des sels de potassium dans les étapes de broyage après la précipitation (fig. 7.2)³⁸.

³⁷ Keats, *Titanium pigments*, 18 août 1930, *op. cit.*

³⁸ Cf. le dossier GDP 10/ summary reports titanium pigments 1929-1931 qui contient le détail des travaux de l'équipe de Keats

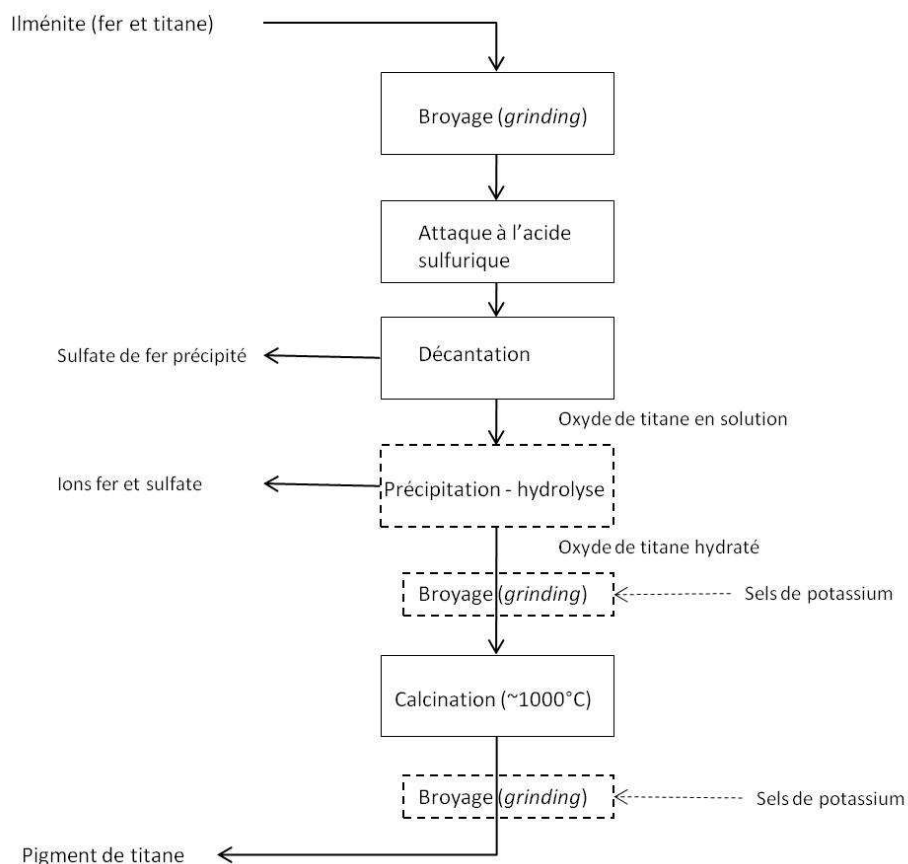


Figure 7.2 — Schéma du procédé au sulfate

Inspiré de A. Chrétien et W. Freundlich, « Titane », in Paul Pascal (dir.), *Nouveau traité de chimie minérale*, Paris, Masson et Cie, 1963, Tome IX, p. 12. Les étapes encadrées en pointillés sont celles modifiées par Keats pour s'affranchir des brevets couvrant le procédé.

L'impact de la modification du procédé sur la qualité du pigment produit est déterminé de manière empirique, en faisant varier les conditions de l'hydrolyse et en observant les modifications du pigment qui en résultent. En mars 1930 un chimiste de l'équipe de Keats, Henry M. Stark, constate que « des variations importantes de rendement et de propriétés des pigments peuvent être détectées suite à des changements infimes dans la manière d'amener la solution à la concentration ou la température désirée ». La modification d'un seul paramètre de l'étape de l'hydrolyse – la dilution – entraîne une multiplication des possibilités expérimentales ; elle ouvre à des changements subtils dans le procédé mais dont ces chimistes arrivent à penser qu'ils influent sensiblement sur le résultat, et qu'il est important d'en comprendre empiriquement l'impact un à un : « Une étude plus complète sera entreprise sur les facteurs tels que : taux d'addition de la solution de titane à l'eau, ordre de l'addition de l'un à l'autre, température de chaque solution au moment du mélange, etc. » écrit Stark par la suite³⁹.

³⁹ Henry M. Stark, « Titanium pigments – raw pigment », Monthly summary report March 1930, 2 avril 1930, GDP 10/ summary reports titanium pigments 1929-1931

Les subtiles démarcations du procédé initial au sulfate, introduites pour se protéger des brevets et l'adapter au contexte des matériaux et appareils utilisés par Du Pont, se déclinent potentiellement à l'infini. D'autant plus que les chimistes de Keats n'utilisent que deux paramètres pour statuer sur la qualité du pigment produit : la force de teinture (appelée simplement « *strength* ») et la couleur, celle-ci traduisant dans les faits la pureté du blanc. Ces deux grandeurs sont quantifiées, mais non « objectives » comme cela leur sera très rapidement reproché (cf. section suivante). Les concentrations diluées en titane lors de l'étape de l'hydrolyse débouchent généralement sur des pigments de moindre force et dont la couleur blanche est moins pure. Le broyage des pigments avant et après calcination avec du sel de potassium permet de corriger ces effets néfastes sur la force et la couleur. Mais ces modifications supplémentaires du procédé amplifient les déclinaisons expérimentales possibles, et rend la compréhension des liens entre les paramètres expérimentaux et la force et la couleur du pigment encore plus complexe.

Afin d'éviter une inflation à l'infini du nombre d'expériences entreprises pour tester, un à un, l'influence des paramètres sur la qualité des pigments, il apparaît rapidement nécessaire de hiérarchiser ces paramètres, en anticipant sur leur influence. Les chimistes de Keats disposent alors de l'expérience patiemment accumulée par leurs collègues chimistes spécialistes des peintures, et qui se transmet sous forme d'aphorismes ou de règles simples. Parmi celles-ci, l'idée que plus fin est le pigment, meilleure est sa qualité, est appropriée par les chimistes de la Station pour orienter leurs pratiques. Aussi, le microscope est mobilisé pour rendre compte de la différence de force entre des pigments produits par hydrolyse concentrée et diluée. C. K. Sloan examine ces échantillons au microscope et constate la validité de cette règle : « L'examen au microscope indique que cette différence est due à la taille de particule ; plus petite est la particule, plus élevée est la force »⁴⁰. Ces constats induisent l'équipe de Keats à broyer plus longtemps les pigments après calcination. Rapidement cependant, l'effet du broyage va être mis en défaut, et la règle liant finesse et qualité du pigment montrer quelques signes de faiblesse : « Le travail préliminaire du Dr. Nichols sur la taille des particules », rapporte Sloan quelques mois plus tard, « indique que certains de nos pigments sont broyés trop finement pour obtenir la force maximale »⁴¹.

La quantification de la taille des pigments dans un problème de développement d'un procédé vient ainsi à affiner la règle de la finesse. Sloan, en particulier, collabore tout au long de 1930 et 1931 avec Kenney et Nichols pour interpréter les analyses des pigments par ultracentrifugeuse et par rayons X. La force est reliée à la taille de particule, et la couleur à la structure cristalline. Les rayons X permettent en effet d'expliquer l'action bénéfique du sel de potassium sur la couleur. L'oxyde de titane peut précipiter sous plusieurs formes cristallines, rutile, « octahédrite » (anatase) et plus rarement brookite. Les rayons X permettent de détecter la présence de ces différentes phases cristallines dans le pigment produit, et les analyses montrent que le sel de potassium prévient la formation de rutile dans le pigment. La pureté cristalline « octahédrite », comme Kenney et Keats dénomment encore la forme anatase, est

⁴⁰ Sloan, « Titanium pigments – finished pigments », Monthly resume report March 1930, *Ibid.*

⁴¹ Sloan, Monthly resume report November 1930, *Ibid.*

interprétée comme la cause de la plus grande pureté du pigment⁴². D'une façon générale, Sloan, membre de l'équipe de Keats, considère la recherche « fondamentale » sur la taille et la structure cristalline des pigments comme un « outil pour étudier les effets de nos variables »⁴³. Ces outils permettent, comme est en train de le formaliser Kraemer à peu près au même moment, d'« expliquer » l'action d'une modification subtile ou grossière d'un procédé, de mieux saisir les relations de cause à effet qui président entre le procédé et le produit ; en bref de « rationaliser », pour reprendre le terme de Kraemer, l'amélioration du procédé :

De nombreuses calcinations ont été effectuées dans les fours rotatifs ce mois-ci pour l'étude de certaines de nos variables dans la production des pigments au titane. Ces variables sont la durée et la température de calcination, et la durée et la consistance du broyage terminal. Beaucoup de temps a été passé avec les membres du groupe de recherche *fondamental* dans une étude des rayons X, de la taille de particule, la microscopie et l'indice de réfraction, tels qu'*appliqués* à nos pigments. Des progrès suffisants ont été atteints, en particulier avec les rayons X et les mesures de taille de particule, pour que des différences dans les forces de teinture puissent être facilement *expliquées*.⁴⁴

Cependant, comme tous les « outils » dont l'utilité est avérée pour progresser dans une entreprise, son appropriation n'est pas neutre quant aux pratiques qui concourent à cette entreprise ; l'outil dont on devient progressivement dépendant bouleverse les habitudes de l'utilisateur, ses modes de pensée. En l'occurrence, la relative symbiose réalisée entre la recherche « fondamentale » et l'équipe de Keats entraîne certaines perturbations dans les pratiques de cette dernière. En effet, au moment même où les tailles des particules de pigment commencent à être spécifiées systématiquement fin 1930, le besoin se fait sentir de mieux définir ce que le chimiste entend par « force » du pigment, et de s'assurer qu'on mesure bien la même chose à chaque fois, et qu'on le mesure de la même manière. Ainsi que le rapporte Sloan début 1931 : « Nous essayons de standardiser notre méthode pour tester la force de teinture du TiO₂, le changement le plus important étant que l'opérateur est prié d'utiliser une quantité fixe d'huile de lin plutôt que de faire appel à son jugement afin de réaliser la même consistance »⁴⁵.

Ainsi se perpétue sur le test de force la tendance à la standardisation des tests sur les peintures à l'œuvre depuis le début des années 1920 (cf. chapitre précédent). La substitution d'une quantité déterminée d'huile de lin, au jugement au cas par cas par la personne réalisant le test de force, s'inscrit dans la tendance plus longue à l'« objectivation » des procédures de test et des grandeurs testées, qui s'exprime avec force au cours des années 1930. Il n'est pas impossible que l'interaction avec le groupe des colloïdes ait accéléré voire provoqué cette standardisation du test de force au sein de l'équipe de Keats. Selon Kraemer, les recherches issues de son groupe ont induit une modification majeure du test de force au sein de Krebs et

⁴² Memorandum, Kenney et Sloan, « X-ray study of titanium pigments », 14 juin 1930, JBN 6/Titanium reports 1930

⁴³ Sloan, Monthly resume report May 1930, *Ibid.*

⁴⁴ Sloan, Monthly resume report January 1931, *Ibid.*, emphase ajoutée

⁴⁵ Sloan, Monthly resume report February 1931, *Ibid.*

de l'équipe de Keats : des volumes se substituent à des poids de pigment pour comparer leur force, évitant ainsi « des conclusions erronées ». C'est en tout cas le récit qu'il en fait à Tanberg en 1932, alors que la Grande Dépression sévit et que Tanberg est prié d'enquêter sur l'utilité de la recherche fondamentale hébergée par Du Pont⁴⁶. La simultanéité des recherches sur la taille des particules de pigment par ultracentrifugeuse et de la standardisation-amélioration des tests statuant sur la qualité d'un pigment révèle le caractère crucial de ces tests pour le groupe des colloïdes. La volonté de s'affranchir davantage du jugement du testeur sur la force s'accompagne d'une volonté similaire pour les autres tests de propriétés optiques, dont le pouvoir couvrant qui est moins répandu. En cherchant à rendre compte du comportement optique des peintures sur des bases microstructurales, le groupe des colloïdes va promouvoir un remaniement des tests pour appréhender ce comportement. Ce faisant, leur standardisation s'exprime parfois sous la forme d'anomalies, c'est-à-dire d'écarts entre la prédiction et la mesure.

Une étude « fondamentale » du pouvoir couvrant

Courant 1930, alors que le groupe des colloïdes travaille intensément avec l'équipe de Keats et les chimistes de Krebs à mettre au point un procédé de fabrication de pigments au titane, le pouvoir couvrant devient une problématique prioritaire du département de Chimie. Le projet de Kraemer d'étudier « fondamentalement » cette propriété est rapidement avalisé par le département : « l'étude fondamentale du pouvoir couvrant » devient formellement un des projets du département de Chimie doté d'une ligne budgétaire spécifique, qui s'étale de 1930 à 1933. Pour ces quatre années les dépenses associées à ce projet dépassent les 19 000\$ (env. 255 000 [2010]\$), ce qui en fait le projet le plus cher de tous les projets « fondamentaux » sur les pigments. Ce projet est complété par une autre étude fondamentale sur le pouvoir couvrant, « adaptation des cellules photoélectriques à la mesure du pouvoir couvrant », qui s'étale entre 1930 et 1932 et s'élève à près de 8000\$ (100 000 [2010]\$). Cumulés, ces deux projets représentent un cinquième des dépenses totales des projets fondamentaux sur les pigments (cf. annexe E). Si ces projets sont attribués d'un point de vue comptable et administratif à la ligne budgétaire de la recherche en physique, en pratique cette focalisation sur le pouvoir couvrant a renforcé les interactions entre le groupe des colloïdes et celui de physique. Dès 1929 en effet, Nichols, Kenney et Cameron (ces deux derniers constituant le groupe de physique) collaborent sur les cellules photoélectriques utilisées dans le microphotomètre, un instrument utilisé pour mesurer les intensités spectrales – c'est-à-dire les différentes composantes lumineuses – émises par les substances colorantes⁴⁷. L'adaptation des cellules photoélectriques sur la mesure du pouvoir couvrant se fait dans la continuité de cette interaction.

Car un des deux piliers de cette étude fondamentale sur le pouvoir couvrant est la mise au point ou le perfectionnement d'instruments permettant de mesurer cette grandeur. Pour Kraemer en particulier, « la substitution d'un empirisme aveugle par une procédure

⁴⁶ Kraemer à Tanberg, 17 août 1932, *op. cit.*, p. 12

⁴⁷ Nichols à Kraemer, 15 juin 1929, *op. cit.*

rationnelle [pour maximiser le pouvoir couvrant] requiert, en premier, des méthodes plus satisfaisantes pour caractériser le pouvoir couvrant des films de peinture secs, préférentiellement d'une façon objective »⁴⁸. L'un des deux enjeux principaux de cette étude est ainsi la détermination « objective » du pouvoir couvrant, c'est-à-dire, comme le résume Bolton devenu directeur du département de Chimie, « la substitution de l'œil humain par la cellule photoélectrique »⁴⁹. Les méthodes et instruments alors en vigueur pour mesurer l'opacité, le pouvoir couvrant et la force de teinture font en effet largement appel au jugement visuel de la personne réalisant le test. « Objectif », ici, n'est pas synonyme de quantification de la propriété, mais traduit davantage l'indépendance du test vis-à-vis des sens humains. Cette volonté de s'affranchir du coup d'œil de l'examineur, expert ou novice, et d'instrumentaliser les tests de propriétés optiques va s'intensifier au cours des années 1930 au sein de la compagnie – et bien évidemment dans l'ensemble du secteur industriel – en particulier à travers la focalisation de la recherche « fondamentale » sur les pigments colorés ; comme nous le verrons, elle ne sera pas sans générer suspicions et résistances dans les laboratoires des départements industriels.

Une détermination quantitative du pouvoir opacifiant a émergé des travaux d'Herman Pfund sur la « cryptométrie » au tournant des années 1920. Le cryptomètre de Pfund mesure en effet la quantité de pigment nécessaire pour couvrir optiquement une surface donnée, elle s'exprime en mètres carrés par gramme, ou en pieds carrés par livre dans le système impérial. Le pouvoir couvrant désigne dans cette acception le poids de pigment nécessaire pour recouvrir une surface de 1 m² ou de un pied carré. Cette mesure du pouvoir couvrant s'est rapidement diffusée au cours des années 1920 ; reflétant les mesures en cours dans les départements industriels liés aux pigments, le groupe des colloïdes exprime ses mesures d'opacité et de pouvoir couvrant en m²/g. Cependant, bien que le cryptomètre permette de quantifier la détermination du pouvoir couvrant, les premiers appareils mis au point par Pfund requièrent, à une étape de la procédure, le jugement visuel pour statuer sur le recouvrement (cf. annexe F). À travers ces projets d'envergure sur le pouvoir couvrant débutés en 1930, Du Pont est sans doute parmi les premiers à ajouter des cellules photoélectriques au cryptomètre, afin de repousser ou de minimiser la part du jugement visuel dans l'ensemble de la procédure de détermination du pouvoir couvrant. C'est à peu près au même moment que Pfund présente à l'ASTM son cryptomètre « de précision », doté de cellules photoélectriques⁵⁰ ; proche de Kenney et consultant de longue date pour Du Pont, la mise au point de ces cryptomètres par Pfund résulte probablement d'une collaboration entre le groupe de physique, le groupe des colloïdes et celui-ci.

Mi-1930, le groupe des colloïdes recrute un physicien de l'université de l'Arizona, Orien E. Schupp, pour travailler spécifiquement sur l'adaptation du cryptomètre aux cellules photoélectriques. Ces cellules convertissent les signaux lumineux émis par le film de peinture

⁴⁸ Kraemer à Stine, 26 mars 1930, *op. cit.*

⁴⁹ Bolton, rapport du département de Chimie au Comité Exécutif de 1931, 20 janvier 1932, CRD 16/Annual reports 1930-1935

⁵⁰ A.H. PFUND, « The photoelectric cryptometer », *Proceedings*, American Society for Testing and Materials, ASTEA, vol. 31, Part II, 1931, p. 876

en signaux électriques, et un circuit électronique permet d'interpréter ces signaux en termes de contraste et de transmission de la surface testée, exprimés en pourcentage. « De manière à ce que les pouvoirs couvrants soient déterminés avec une précision de 1-2% », écrit Schupp dans un rapport de 1931, « des différences de contraste de quelques centièmes de pourcents doivent pouvoir être détectées. Cette sensibilité exceptionnelle nécessite un dispositif d'amplification [électronique] assez compliqué »⁵¹. L'ambition de déterminer le pouvoir couvrant avec une précision de quelques pourcents obéit bien évidemment à d'autres motivations que la passion pour la précision.

Cette recherche de précision est justifiée par l'autre pilier de cette étude fondamentale sur le pouvoir couvrant, à savoir la corrélation de la microstructure des peintures avec leurs propriétés optiques. L'enjeu de cette problématique générale placée au cœur des objectifs du groupe des colloïdes est l'explication et la prédiction du pouvoir couvrant des multiples qualités de peintures ou de pigments manipulés dans les départements industriels de Du Pont. Davantage que la nature chimique des pigments, ce que la plupart des chimistes appréhendent comme leurs propriétés « physiques » ou « colloïdales » constitue une base plus efficace dans cette entreprise : la taille des particules et leur état d'agrégation, l'indice de réfraction des phases cristallines des pigments sont les paramètres « fondamentaux » pour performer dans ces orientations scientifiques. Insérée dans cette vaste ambition du groupe des colloïdes, cette étude fondamentale sur le pouvoir couvrant accélère le recouvrement entre propriétés optiques et propriétés (micro-)physiques ; car la mobilisation technique et industrielle des données sur la taille des particules ne peut faire sens qu'à partir du moment où un certain degré de précision et d'« objectivité » est atteint dans la mesure des propriétés optiques.

Depuis que l'ultracentrifugeuse est opérationnelle le groupe des colloïdes a multiplié les mesures sur de nombreux échantillons de lithopone puis de pigments au titane, et tente de démêler l'écheveau des relations entre pouvoir couvrant, opacité, force de teinture et taille de particule. Comme abordé précédemment, l'urgence de la menace du titane mobilise rapidement l'expertise de Nichols et de l'ultracentrifugeuse pour aider à élaborer la meilleure stratégie vis-à-vis de ces nouveaux pigments, notamment dans les complexes enjeux de protection et de faille qui existent dans les brevets couvrant les procédés associés. Les travaux de recherche de la Station sur la duplication du procédé de CPC sont brutalement arrêtés mi-1931 : le rachat de CPC rend superflu ce travail de duplication, même si les recherches issues de ce travail ont permis de négocier un rachat favorable pour Du Pont. Krebs concentre alors l'ensemble des activités industrielles de Du Pont sur le lithopone et le titane. Les dirigeants de Du Pont savent qu'ils sont également en bonne voie de négociation avec l'autre dangereux compétiteur sur les pigments au titane : National Lead. La situation complexe sur les brevets se débloque, et Krebs se concentre sur la production des pigments au titane qui marchent le mieux : les pigments *extended* (renforcés) au barium et au calcium. Une usine est construite

⁵¹ Schupp repris dans le rapport rédigé par Kraemer, quarterly report April-July 1931, JBN 4/Quarterly reports colloid group

dans le Delaware, et l'usine de CPC située à Baltimore est également reprise pour la production de pigments de titane⁵².

L'arrêt des travaux sur la duplication du procédé de CPC n'entraîne cependant pas la dissolution de l'équipe de Keats, qui continue à travailler sur l'amélioration des procédés utilisés à Baltimore. La collaboration avec le groupe des colloïdes et Kenney se poursuit sur les pigments au titane renforcé, ainsi que sur le développement d'un procédé qui produirait sélectivement des pigments rutile, dont la qualité optique intrinsèque est plus grande que les pigments anatase. Fin 1933, le groupe de Keats comprend toujours dix chimistes⁵³. La décision de produire des pigments de titane renforcés au baryum réaligne les problématiques de la Station sur la façon dont le titane se mixe aux *extenders*, et sur l'impact de ces *extenders* sur la tenue générale de la peinture. Bolton, directeur du département de Chimie, justifie cet alignement en expliquant au Comité Exécutif que « les considérations économiques relatives à cette possibilité attractive [le développement de nouveaux *extenders* plus performants] justifient son exploration »⁵⁴. Patterson prend la tête de ces recherches. Les échantillons, les idées, les résultats, les hommes même circulent intensément entre Baltimore, Newark où sont situés les laboratoires de Krebs, et la Station à Wilmington ; au sein de la Station, la circulation est intense entre le groupe de Patterson, celui de Keats, et celui de Kraemer⁵⁵.

Mais cette circulation n'aplanit pas l'autonomie de ces différents groupes, animés par leur logique et leurs objectifs propres. Comme pour le cas des fibres textiles (cf. chapitre 5), les objectifs se recoupent, mais ne convergent pas. Les ambitions théoriques du groupe des colloïdes les induit à appréhender les propriétés optiques des pigments à travers d'autres grandeurs que la force, qui est la plus répandue parmi son environnement industriel immédiat. En effet, le pouvoir opacifiant se prête bien mieux que la force de teinture au jeu de la relation entre taille de particule et propriété optique. Nichols justifie cette préférence en expliquant que le pouvoir opacifiant est une grandeur « additive », c'est-à-dire que plus il y a de particules, plus grand est le pouvoir opacifiant. Ce qui n'est pas le cas pour la force de teinture et le pouvoir couvrant⁵⁶. Aussi Nichols étudie systématiquement les relations entre taille de particule et pouvoir couvrant, pour les échantillons provenant de Baltimore comme d'Aussig, en plus des relations entre taille de particule et force. Lorsque les pigments rutile sont étudiés plus en détail en collaborant avec l'équipe de Keats, c'est Nichols qui se charge de mettre au point le test sur le pouvoir opacifiant, tandis que Stark réalise les tests de force (table VII.1)⁵⁷.

⁵² H&S, p. 217 ; BARKSDALE, *Titanium*, *op. cit.*, p. 363

⁵³ « Experimental Station – technical staff », 22 novembre 1933, SCS 3/CRD Organization charts

⁵⁴ Bolton, rapport annuel de 1932 au Comité Exécutif, 6 janvier 1933, CRD 16/Annual reports 1930-1935

⁵⁵ Kraemer à Tanberg, 17 août 1932, *op. cit.* ; Kraemer, Quarterly reports 1932, JBN 4/Quarterly reports colloid group ; « Extended TiO₂ pigments – Calcium sulfate semi-works », Monthly summary reports July 1931, GDP 10/Summary reports titanium pigments 1929-1931 ; Nichols, Experimental Station individual quarterly progress reports, 1931-1932, CRD 17/Quarterly reports JB Nichols I&II

⁵⁶ Nichols, « Ultracentrifugal analyses », in Kraemer, Quarterly report April-July 1930, JBN 4/Quarterly reports colloid group

⁵⁷ Mémoire, Nichols à Stark, « Corrections to memorandum of November 30, 1931, on “particle-size and obscuring power of rutile-containing titanium dioxide” », 8 décembre 1931, JBN 5/Pigments UC memos 1931

| Hydrolyse ou traitement | Température de calcination | Contenant en rutile | Rayon moyen | Pouvoir opacifiant (cm ² /g.) | Force de teinture | Couleur |
|--|----------------------------|---------------------|-------------|--|-------------------|---------|
| 180 g./l., Li ₂ SO ₄ | 1000°C 1hr. | 75% | 0,22μ | 1070 | 470% | 11+ |
| 225 g./l. | 850 | > 95 | 0,19 | 2140 | 680 | 6+ |
| 170g./l. | 900 | 100 | 0,47 | 870 | 390 | Gris B+ |
| Concentration TiCl ₄ | 950 1/2h. | 100 | 0,165 | 2140 | - | 13 |

Table 7.1 — Paramètres expérimentaux du procédé au sulfate exprimés en fonction de la taille de particule
 Source : Nichols, Corrections to memorandum of November 30, 1931, *op. cit.*

Cette division du travail sur la détermination des différentes propriétés optiques reflète les préférences sélectives vis-à-vis de ces propriétés : Nichols préfère travailler avec le pouvoir opacifiant, tandis que Stark et les chimistes de Krebs préfèrent la force de teinture. La portée du travail de Nichols n'est pas que descriptive, elle est aussi prédictive : « La conclusion que la force de teinture de l'échantillon d'Aussig pourrait être quelque peu accrue si [la taille de particule moyenne] était d'environ de 0.2μ en rayon tient toujours », résume Nichols à Stark, fixant ainsi un objectif à atteindre en terme de taille de particules⁵⁸.

Très vite cependant, des écarts surgissent entre ce qui est prédit par le groupe des colloïdes et ce qui est constaté dans l'équipe de la Station de Stark, ou par les chimistes de Krebs. Début 1932, James Booge, récemment promu directeur de la division technique de Krebs, écrit à Nichols pour lui demander des explications sur ces écarts. Des échantillons dont la taille moyenne, mesurée par ultracentrifugeuse, est bien inférieure à cet optimal théorique de 0.2 μm présentent pourtant les forces de teinture les plus importantes. En outre, deux échantillons qui ont des tailles de particules nettement distinctes n'offrent pas de différence significative au test de force. « Est-ce que ce fait signifie que notre récente supposition d'une région étroite de taille de particule donnant une force optimale [autour de 0.2 μm] est erronée ? », se demande Nichols alors qu'il répond à Booge en mars 1932⁵⁹. La confrontation des prédictions issues du groupe des colloïdes aux mesures effectuées par d'autres équipes révèle les divergences de méthodes permettant de statuer sur la qualité optique d'un pigment ou d'une formulation. Face à ces écarts qui semblent infirmer ses prédictions, Nichols défend ses conclusions et la portée de son travail, en rappelant que s'il est possible d'établir des corrélations entre taille de particule et pouvoir opacifiant, celle entre taille de particules et force de teinte est beaucoup plus délicate. En outre, l'absence de relation simple entre pouvoir opacifiant et force de teinte complique sa tâche.

A partir de notre expérience, rappelle Nichols à Booge, les mesures ordinaires de force de teinture ne montrent qu'une faible dépendance à la taille de particule et au pouvoir opacifiant, probablement à cause de la floculation, de la différence de consistance, des relations d'espace [entre les particules] et d'autres facteurs en jeu dans les pâtes concentrées. [...] *Nous considérons nos données sur les tailles de particule et le pouvoir*

⁵⁸ *Ibid.*

⁵⁹ Mémoire, Nichols à J.L. Keats et Booge, « Relation of particle-size distribution to tinting strength of titanium dioxide samples », 31 mars 1932, JBN 6/Titanium reports 1930

*opacifiant plus représentatives de la qualité réelle du pigment que la plupart des autres tests, à condition que l'indice de réfraction soit constant.*⁶⁰

Ainsi le test de force est problématique du point de vue de la taille de particule. Sa propension à être quantifié et à décrire la qualité du pigment de manière fiable et reproductible est mise en doute par Nichols : « À présent une telle corrélation [entre taille de particule et force] est d'une signification douteuse étant donné que *les forces de teinture usuelles à Baltimore* [localisation de l'usine de production des pigments au titane] *peuvent varier aussi considérablement que 25 ou 30 points en changeant les conditions du test* »⁶¹. Il est peut-être trop fort de parler de conflit entre le groupe de colloïdes, l'équipe de la Station sur le titane, les chimistes de Krebs et les employés de l'usine de Baltimore. La qualité d'un pigment et la façon de la déterminer divergent cependant clairement entre ces différents personnels de Du Pont. Le succès du groupe des colloïdes est tributaire de la diffusion plus massive des tests des pouvoirs opacifiant et couvrant, avec lesquels il se sent plus à l'aise ; l'utilité des mesures sur la taille des particules nécessite de ne plus se fier exclusivement au test de force pour statuer sur la qualité optique d'un pigment ou d'une peinture. Significativement, ce test de force ne fait pas partie de la batterie de tests physiques inclus dans le laboratoire « quantitatif » sur les peintures et vernis que la Station a élaboré courant 1926 (cf. chapitre précédent). L'appropriation et la centralisation de ce test par le département de Chimie aurait peut-être généré trop de conflits avec les chimistes et employés des laboratoires des départements industriels, et le département de Chimie aurait renoncé à son appropriation. Il se pourrait aussi que ce test soit tellement répandu que sa centralisation dans un seul laboratoire pour toute la compagnie aurait été globalement néfaste à ses activités industrielles, ou perçue comme telle par les responsables du département de Chimie alors qu'ils réfléchissent sur ce laboratoire.

Cet épisode sur les échantillons au titane, qui cristallise les divergences entre différents groupes professionnels de Du Pont, a probablement agi comme une motivation supplémentaire pour le groupe des colloïdes, et Schupp en particulier, à mettre au point rapidement l'instrument permettant de mesurer le pouvoir couvrant à l'aide de cellules photoélectriques. Début 1933, un instrument est opérationnel qui mesure le contraste du film de peinture recouvrant une surface alternativement peinte en noir et blanc. L'extinction de la différence de contraste résultant de ce damier noir et blanc comme surface recouverte signale l'opacité complète réalisée par le film recouvrant. Un basculement significatif corolaire à cet instrument est son utilisation exclusivement sur des films de peinture secs, et non sur des films humides comme cela se pratiquait auparavant. Le pouvoir couvrant d'une peinture peut en effet varier significativement lors du séchage et dépend aussi de la façon dont la peinture a été appliquée sur la surface. Néanmoins, cet instrument ne s'affranchit pas complètement du jugement visuel, et initialement le test nécessite pas moins de vingt observateurs⁶². Kraemer et

⁶⁰ *Ibid.*, emphase ajoutée

⁶¹ *Ibid.*, emphase ajoutée

⁶² Kraemer, quarterly reports, July-September & October-December 1932, January-March 1933, JBN 4/Quarterly reports colloid group ; cf. annexe H pour une description du test de Kraemer et Schupp

Schupp rédige un papier décrivant leur nouvel instrument et la méthode associée, que Schupp présente au meeting de la division « Peintures et Vernis » de la Société américaine de chimie qui a lieu à Washington en mars 1933⁶³.

Cet instrument est rapidement approprié par les chimistes de Krebs ; parmi ceux-ci, Roscoe H. Sawyer participe également au meeting de Washington et présente les avantages de la mesure du pouvoir couvrant sur les films secs, à partir de l'instrument développé par Schupp. Pour ne pas dupliquer les publications issues de ce meeting, et peut-être aussi pour ne pas divulguer exhaustivement les détails de la méthode, seul le papier de Sawyer sera publié⁶⁴. Depuis 1931 d'ailleurs, Sawyer avait déjà travaillé avec le groupe des colloïdes pour déterminer la taille des *extenders* dans les pigments de titane par ultracentrifugeuse, afin, toujours, de maximiser la force de teinture de la formulation finale⁶⁵. Ayant rempli ses objectifs, l'étude fondamentale sur le pouvoir couvrant est arrêtée fin 1933. Une fois l'instrument mis au point cependant, Schupp s'est concentré sur les relations entre taille de particules et pouvoir couvrant issu du nouvel instrument photoélectrique ; le dernier rapport sur ce projet établit systématiquement les dépendances du pouvoir couvrant vis-à-vis de la taille de particule moyenne de l'échantillon examiné⁶⁶.

Plus remarquablement, l'appropriation immédiate de l'instrument par Krebs contribue à donner plus de poids et de visibilité à la grandeur pouvoir couvrant parmi les chimistes des laboratoires et les employés des usines, et à affaiblir l'hégémonie de la force de teinture comme test de qualité optique. Bolton signale dans son rapport annuel de 1933 qu'

en utilisant l'instrument développé l'année dernière pour mesurer le pouvoir couvrant (et adopté par Krebs pour leur travail de développement), on a pu se rendre compte qu'une grande partie de la confusion régnant entre les différentes agences testant les peintures pouvait être attribuée à la variabilité de la performance de l'œil humain en fonction des conditions variées ; ces effets ont été rationalisés à un degré considérable. Les mesures sur les pouvoirs couvrants effectifs [« *actual* »] des films de peinture secs préparés à partir de pigments d'une large gamme de force de teinture démontrent que *la force de teinture ne constitue pas une base fiable pour prédire l'efficacité de recouvrement des pigments*.⁶⁷

Ainsi le pouvoir couvrant est davantage pris en compte parmi les chimistes extérieurs à la Station et travaillant sur les pigments. En 1935 par exemple, Krebs sollicite le groupe de physique de la Station, dirigé par Patterson, pour réaliser une étude sur le pouvoir couvrant des pigments au titanate, des sels de titane qui peuvent contenir d'autres substances métalliques à base de zinc, de baryum ou de calcium. Cette étude, financée par Krebs, cherche à maximiser le pouvoir opacifiant de ces pigments, pour les rendre économiquement

⁶³ Papier intitulé « Determination of hiding power of white paints », Kraemer quarterly report January-March 1933 *op. cit.*

⁶⁴ R.H. Sawyer, « Comparison of wet- and dry-film hiding power tests », *JIEC(an. ed.)*, vol. 6 (1934), pp. 113-6

⁶⁵ Kraemer à Tanberg, 17 août 1932, *op. cit.*, p. 6

⁶⁶ Kraemer, quarterly report October-December 1933, JBN 4/Quarterly reports colloid group

⁶⁷ Bolton, rapport annuel de 1933 du département de Chimie au Comité Exécutif, 7 janvier 1933, CRD 16/Annual reports 1929-1933

compétitifs avec les pigments au titane plus purs⁶⁸. Cette attention accrue au pouvoir couvrant n'a pas marginalisé le test et la notion de force de teinture cependant, qui demeurent cruciaux pour la compréhension et la maîtrise des pigments par les chimistes, en particulier pour les pigments au titane.

La « Master Curve »

Considérée dans une temporalité un peu large, disons à l'échelle de quelques décennies, cette substitution partielle du pouvoir couvrant à la force de teinture reflète une évolution profonde de l'industrie des peintures et vernis. Cette évolution s'inscrit en continuité avec la tendance, décrite au chapitre précédent, à la standardisation des tests et à s'affranchir de la formulation comme mode exclusif de spécification qui émerge au sortir de la Première Guerre mondiale. « L'utilisation de facteurs empiriques pour convertir les forces de teinture obtenues par différentes techniques vers une base commune est une pratique dangereuse lorsque l'on travaille avec des pigments expérimentaux », met en garde Kraemer lors de l'épisode sur les divergences soulevées par les pigments au titane⁶⁹. La faible reproductibilité ou universalité des tests de force est effectivement « dangereuse » du point de vue du groupe des colloïdes dans la mesure où son horizon ultime, sa carotte intellectuelle et scientifique, est l'explication et la prédiction de la force d'un pigment – et des autres propriétés optiques – sur des bases physiques et microstructurales *absolues*, à prétention universelle. Prétendre expliquer les propriétés d'une peinture sur la base objective et quantitative de ses constituants invisibles – les pigments – suppose d'appréhender lesdites propriétés tout aussi objectivement et quantitativement.

Focalisé sur cet horizon scientifique, le groupe des colloïdes en vient rapidement à se retrouver en porte-à-faux avec la réalité des pratiques et des matériaux constituant le gros de la recherche et de la production sur les pigments. Le test de force n'est pas adapté aux questions que se pose ce groupe, parce que les chimistes ne savent pas très bien quelles particules sont passées au crible de ce test. De même les peintures réelles, dont la taille des pigments s'étale sur un large spectre, ne se prêtent pas facilement au jeu de déterminer quelle est la taille de pigment optimale en termes de pouvoir couvrant ou de force. La présence des *extenders* dans les peintures réelles, qui ne sont pas vraiment des pigments mais qui agissent sur leur structuration dans le véhicule et donc sur les propriétés de la peinture, complique encore la tâche. Comme souvent lorsque l'on cherche à prédire, il faut commencer par simplifier ; en l'occurrence, travailler sur des échantillons de pigments dont la distribution de taille est réduite :

Afin de prédire la magnitude d'une propriété d'une dispersion colloïdale à partir de la connaissance des tailles de particule présentes, il est nécessaire de connaître la relation entre la taille de particule et la propriété en question. Puisque les tailles de particules varient énormément, la détermination de cette relation requiert la préparation, par

⁶⁸ Patterson, « Hiding power of white titanates pigments », Major experimental project # 1945, 11 décembre 1935, GDP 7/Project outlines 1935-1937

⁶⁹ Kraemer, Quarterly report April-June 1932, JBN 4/Quarterly reports colloid group

fractionnement, de dispersions spéciales composées de taille de particule aussi uniformes que possible de manière à ce que l'effet de la taille de particule sur la propriété puisse être étudié directement.⁷⁰

Prédire quantitativement, c'est modéliser. Et modéliser, c'est simplifier. Au printemps 1929, Emersion D. Bailey est recruté par le groupe des colloïdes principalement pour réaliser le travail expérimental de fractionnement qui permet de préparer des échantillons de pigment dont la distribution de taille est connue, et la plus réduite possible⁷¹. A l'aide de « *supercentrifuges* » commercialisées par la firme Sharples, Bailey fractionne plusieurs échantillons de lithopone de manière à éliminer la plupart des particules de pigment composant l'échantillon, et de n'en garder que la fraction correspondant à la gamme de taille étroite que l'on souhaite tester spécifiquement. Entre 1929 et 1931, Bailey réalise ainsi un grand nombre d'expériences où il mesure le pouvoir opacifiant en faisant varier l'échantillon du lithopone (le procédé de production), la taille de particule et la composition du véhicule. En outre, il travaille à des concentrations de particules extrêmement diluées par rapport aux concentrations en vigueur dans les peintures, de l'ordre de quelques centièmes de gramme de pigment pour cent grammes de véhicule. Ce faisant, le groupe des colloïdes réalise à quel point il s'éloigne des peintures réelles, et que le paramètre « *particle-size* » sur lequel il se focalise est loin de rendre compte à lui seul des propriétés optiques :

Les données présentées [dans ce rapport] cependant, montrent que la taille de particule seule ne contrôle pas la force de teinture (et probablement pas non plus le pouvoir couvrant), et confirment indirectement la supposition que l'arrangement et l'espacement des particules est aussi d'une importance fondamentale dans les systèmes concentrés. Il est ainsi impossible de prédire les pouvoirs couvrants optimum, même si les pouvoirs opacifiants (ou n'importe quel autre test) donnent une idée des pouvoirs couvrant optimum, pour la raison que la relation entre pouvoir opacifiant et pouvoir couvrant optimum est inconnue.⁷²

Les tests de force et de pouvoir couvrant se posent sur des systèmes concentrés, c'est-à-dire des peintures réelles, où l'état de dispersion des pigments est incertain. Les particules peuvent flocculer et donc la taille de particule primaire n'est plus représentative de l'état de microstructuration des pigments. En conséquence, ces tests n'indiquent que de manière floue la taille de particule de pigment. En revanche, le test de pouvoir opacifiant, où la dilution du pigment est si importante qu'il ne floccule pas, informe directement sur la taille de particule, c'est pourquoi il est préféré par le groupe des colloïdes, et Bailey en particulier, alors qu'il essaie de corrélérer propriété optique et taille de particules.

Cependant, l'urgence des travaux sur le titane à partir de fin 1930 contraint Bailey et Nichols à se concentrer sur les pigments au titane et à mettre entre parenthèses le travail sur les systèmes dilués, éloignés des problèmes industriels immédiats. La diffusion du nouvel instrument photoélectrique pour mesurer le pouvoir couvrant permet d'aplanir les divergences

⁷⁰ Kraemer, quarterly report April-July 1930, *Ibid.*

⁷¹ Kraemer, quarterly report April-July 1929, *Ibid.*

⁷² Kraemer, quarterly report April-July 1930, *Ibid.*

quant à la définition et la méthode pour déterminer la qualité d'un pigment, et sans doute aussi à mieux comprendre les relations entre pouvoir opacifiant et pouvoir couvrant. Débarrassé de l'urgence des pigments au titane et aidé par cet aplanissement, Bailey reprend fin 1933 ses études de pouvoir opacifiant d'un large échantillon de pigments fractionnés, dilués⁷³. S'impose alors une représentation des peintures épurée ; une abstraction dans laquelle les pigments « nagent » librement dans leur véhicule, et qui n'a pas grand-chose à voir avec la réalité des matériaux commercialisés. Le détour par cet état infiniment dilué semble néanmoins nécessaire pour commencer à appréhender mathématiquement les relations entre propriétés optiques et propriétés physiques des peintures. L'interaction de la lumière avec la peinture est alors réduite à l'interaction des rayons lumineux avec les petites sphères solides représentant les pigments, des phénomènes physiques mathématisables (fig. 7.3).

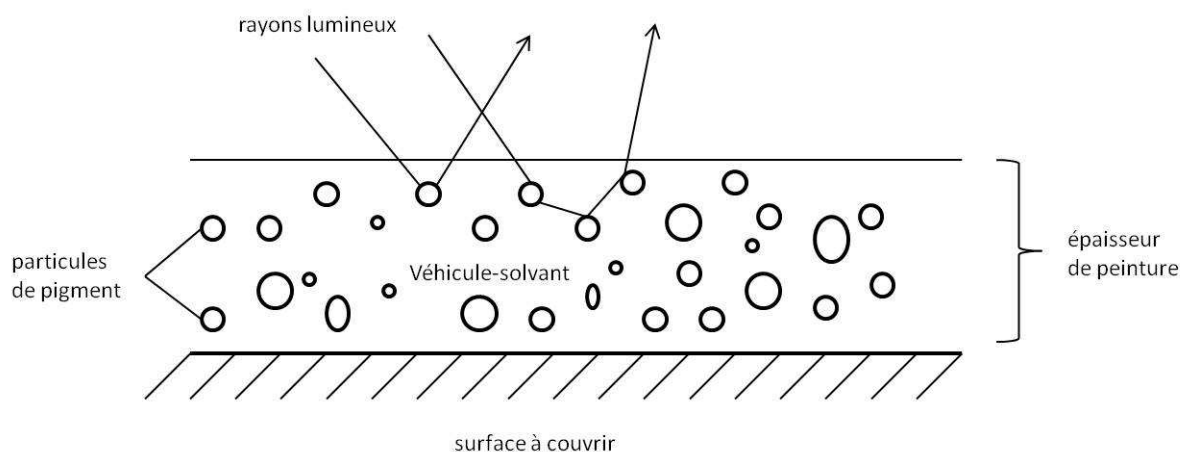


Figure 7.3 — Représentation de la couche de peinture permettant un traitement mathématique de ses propriétés optiques

Avec une telle image de la peinture, le nombre de paramètres à considérer pour prédire son comportement est restreint : « Il est bien connu que la taille de particule et l'indice de réfraction sont les deux propriétés physiques les plus importantes d'un pigment blanc dès lors que la force de teinture et le pouvoir couvrant sont concernés », résume Bailey alors qu'il s'apprête à présenter ses résultats⁷⁴. Celui-ci, néanmoins, met de côté le pouvoir couvrant et la force de teinture, et ne travaille qu'avec le test de pouvoir opacifiant pour exprimer les relations entre ces « propriétés physiques » – taille de particule et indice de réfraction – et les propriétés optiques. Plus précisément, c'est l'absorption de lumière qui est mesurée, c'est-à-dire les différentes composantes lumineuses qui sont retenues par le système dilué lorsque traversé par un faisceau dont le spectre est connu.

Considérant uniquement ces trois paramètres – taille de particule, indice de réfraction, et absorption de lumière – le jeu expérimental et théorique visant à exprimer empiriquement

⁷³ Kraemer, quarterly report October-December 1933, *Ibid.*

⁷⁴ *Ibid.*

et mathématiquement leur interdépendance peut commencer. Moins d'un an plus tard, à l'été 1934, Nichols et Bailey sont fiers de présenter « un résultat extrêmement important » : « la réduction, pour la première fois, de ces trois variables à une courbe "maîtresse" unique, permettant des prédictions fiables de l'absorption lumineuse maximale de n'importe quel système pigment blanc-véhicule, d'un indice de réfraction connu, [et de prédire également] le rayon optimum qui correspond à cette absorption »⁷⁵.

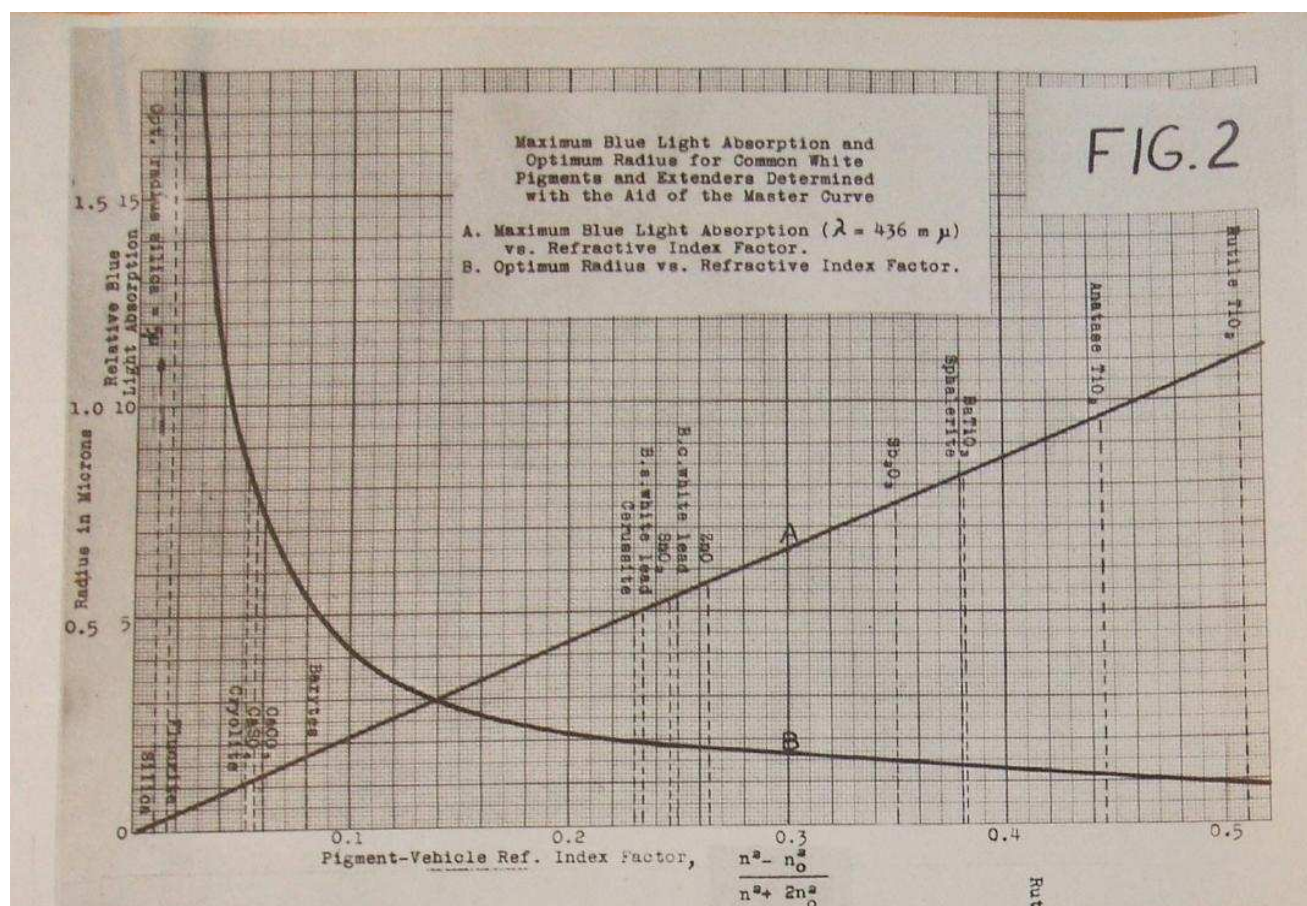


Figure 7.4 — Extrait du rapport de Bailey de l'été 1934 où il introduit les « master curves ». Ces courbes relient l'absorption lumineuse au rayon de la particule et à la différence d'indice entre le véhicule et le pigment. Les échantillons de pigments considérés sont les pigments au titane (anatase et rutile), le blanc de plomb (*white lead*), les barytes et les cryolites. Source : Kraemer, quarterly report June-September 1934, JBN 4/Quarterly report colloid group

L'utilisation de « réduction » par Nichols est ici remarquable. En effet, bien que certains termes relevant du champ sémantique du réductionnisme – scientifique, rationnel, objectif – soient souvent repris par ces acteurs, ceux-ci n'utilisent jamais « réductionnisme », pour autant que les archives consultées le montre. La présentation de la « courbe maîtresse » est un des très rares cas où le substantif « réduction », ou l'adjectif associé, sont employés. Les philosophes des sciences ont distingué deux types de réduction : les réductions homogènes portent sur des phénomènes qualitativement semblables, relevant du même niveau

⁷⁵ Nichols, « Rough draft », 20 août 1934, JBN 7/White pigment and particle size, emphase ajoutée

d'organisation. Les réductions hétérogènes ou micro-réductions mettent en rapport des phénomènes dissemblables : le phénomène expliqué s'inscrit dans un niveau d'organisation supérieur au phénomène explicatif⁷⁶.

En pratique toutefois, si l'on regarde dans le détail comment les différents groupes de Du Pont se divisent le travail et s'assemblent pour continuer à améliorer les peintures et pigments commercialisés, il semble que dans ce cas ces deux types de réduction marchent de concert. La recherche et l'innovation sur les pigments et les procédés se déploient dans une topologie articulant réduction homogène et réduction hétérogène, où celle-ci ne peut survivre sans celle-là. D'une part en effet, la complexité du comportement optique des peintures, des propriétés pour en rendre compte et des tests pour les mesurer, est « réduite » à l'absorption de la lumière pour un système dilué. De l'ensemble des tests et propriétés que les chimistes et artisans spécialistes des pigments ont dégagé dans la longue durée pour comprendre leurs matériaux – force, teinte, opacité, pouvoir couvrant, couleur, gravité spécifique... – Nichols et Bailey ne vont garder, afin de prédire leur comportement, que la propriété d'absorption de lumière, elle-même une simplification du test de pouvoir opacifiant. D'autre part, la complexité microstructurale des peintures est « réduite » à deux paramètres : la taille moyenne des particules de pigments, assimilées à des sphères, et l'indice de réfraction de ces particules. Ainsi, toute une masse de connaissances accumulées depuis que le microscope pénètre significativement le domaine des peintures et vernis au début du siècle, éclairant sur l'état d'agrégation des particules, leur forme, les vides qu'elles laissent et leur immixtion avec le véhicule... sont délibérément ignorées pour progresser dans cette entreprise explicative et prédictive, à prétention quantitative. La « *master curve* » incarne l'ambition de lier ces deux réductions, de faire tenir l'ensemble des connaissances sur les substances composant une peinture afin d'orienter les pratiques :

Par exemple, commente Nichols sur l'utilité de la courbe maîtresse, on pourrait répondre à toute question similaire à la suivante : De combien le pouvoir opacifiant serait diminué si l'on remplaçait un véhicule à l'huile par une résine synthétique ou plastique, en utilisant du dioxyde de titane comme pigment ; et comment devrait-on ajuster la taille de particule d'un pigment de manière à obtenir le pouvoir couvrant optimum pour le nouveau système ?⁷⁷

En septembre 1934, Bailey, Kraemer et Nichols présentent certains de leurs résultats au meeting de la division « Colloïdes » de la Société américaine de chimie, qui a lieu à Cleveland dans l'Ohio. Ils intitulent le papier présenté « La variation de l'absorption de lumière avec la taille de particule d'un matériau suspendu »⁷⁸. Avant de soumettre leur papier au meeting de la Société, Kraemer l'envoie pour approbation aux responsables de Krebs – Booge et Hanahan – afin d'éliminer les informations confidentielles ou stratégiquement

⁷⁶ Elisabeth PACHERIE, entrée « Réductionnisme » du *Dictionnaire d'histoire et de philosophie des sciences* (D. LECOURT ed.), Paris, PUF, 1999, pp. 810-812

⁷⁷ Nichols, « Rough draft », *op. cit.*

⁷⁸ « The variation of light absorption with particle-size of suspended material »

dangereuses à dévoiler⁷⁹. Le fond du papier proposé est exclusivement théorique, et présente les relations mathématiques qui président à l'absorption de la lumière en fonction de la taille de particule. Le thème des pigments n'est touché que très superficiellement : « au cas où la cérusite [minerai de plomb utilisé pour la production des pigments au plomb] serait un exemple trop suggestif des problèmes relatifs aux pigments », propose Kraemer à Booge, « les données le concernant pourraient être supprimées »⁸⁰.

Il n'est pas facile de cerner la rapidité et l'intensité avec laquelle ces courbes « maîtresses » et les prédictions issues du groupe des colloïdes ont performé sur la recherche « appliquée » à Krebs. Les pigments au titane produits en 1935 ont un pouvoir couvrant qui atteint 70% de leur limite théorique pour ce type de pigment ; selon Bolton, cette information est très importante pour Krebs, car elle lui permet de prendre des décisions en termes d'amélioration de procédés en meilleure connaissance de cause⁸¹. En tout cas ses responsables sont suffisamment convaincus de leur potentiel industriel pour refuser que le concept de « courbe maîtresse » et les résultats clés de l'absorption de lumière soient présentés par le groupe des colloïdes à leurs collègues travaillant pour des compagnies en compétition avec Du Pont, au cours des congrès rassemblant les chimistes. Ce dont Kraemer se plaint (subtilement) auprès des responsables du département de Chimie : « Considérant la variété des problèmes pratiques sur les pigments pour lesquels la méthode de transmission [de la lumière] est applicable, nous sommes assurés qu'elle serait utilisée intensément si la procédure, et la courbe maîtresse sur laquelle elle est fondée, étaient rendues publiques »⁸².

Dans les quelques années suivant l'élaboration de la courbe maîtresse, le groupe des colloïdes ne sera pas autorisé à publier sur l'apport de cette courbe pour les pigments. En 1936, à l'occasion de la participation de Kraemer, Bailey et Nichols au treizième symposium national sur les colloïdes (qui a lieu à l'université du Missouri en juin), une publication sur l'application de la méthode de diffusion de la lumière sur les émulsions est autorisée. Cette publication ne mentionne toujours pas la courbe maîtresse et reste muette sur les pigments⁸³. Les principes de l'absorption lumineuse comme méthode de détermination de la taille des particules seront finalement publiés par Bailey en 1946 ; ce dernier, de manière posthume, remercie Kraemer – décédé pendant la guerre – et reconnaît toute la dette qu'il a à son égard⁸⁴.

Désolidarisation du fondamental et des groupes des colloïdes et de physique

Le refus des dirigeants de Krebs et du département de Chimie de publier les détails de la courbe maîtresse témoigne que ceux-ci prennent très au sérieux les possibilités prédictives,

⁷⁹ Lettre, Kraemer à Booge et Hanahan, 24 juillet 1934, JBN 7/UC literature and theory

⁸⁰ *Ibid.*

⁸¹ Bolton, rapport annuel du département de Chimie de 1935, CRD 16/Annual reports 1929-1935

⁸² Kraemer, quarterly report January-March 1935, JBN 4/Quarterly reports colloid group

⁸³ KRAEMER, BAILEY & NICHOLS, « Particle size and optical properties of emulsions », *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 40 (1936), pp. 1149-55

⁸⁴ BAILEY, « Particle size by spectral transmission », *Industrial and Engineering Chemistry. Analytical edition*, vol. 18 (1946), pp. 365-9

issues des travaux du groupe des colloïdes, pour leurs propres intérêts industriels. Peu de temps après la synthèse de l'ensemble des travaux théoriques et expérimentaux sur le comportement des pigments réalisée à travers ces courbes, Keats s'approprie certains des résultats associés et propose de performer en conséquence sur les procédés de Krebs en vigueur dans les usines de production du titane. « Au vu des résultats de ces expériences », propose-t-il à Krebs et au département de Chimie début 1936, « il est évident qu'il y a de la place pour une amélioration considérable de la force de teinture (et du pouvoir couvrant) de l'oxyde de titane commercial à travers un meilleur contrôle de la taille de particule »⁸⁵. Keats rappelle en effet que les études taille de particule-force de teinture par fractionnement ont montré une taille optimale autour de 0.18μ pour les pigments anatase produits, et que la force de teinture pourrait être améliorée significativement si la taille des pigments commercialisés se rapprochait de cet idéal. Assez significativement, en tout cas, pour que l'amélioration proposée soit économiquement rentable. Keats propose ainsi de considérer toutes les étapes du procédé (au sulfate) à travers le prisme *particle-size* et de les optimiser en évaluant systématiquement leur impact sur la taille des particules produites.

Ces questions de recherche, qui ont été portées et associées au groupe des colloïdes en collaboration avec le groupe de physique, deviennent ainsi appropriées par d'autres groupes de la Station. En 1930 et 1931, lorsque Keats et Nichols collaborent sur le procédé au sulfate, la division du travail s'exprime à travers une dichotomie fondamentale/appliquée dont le partage est clair pour tout le monde : l'équipe de Keats se concentre sur le procédé, et celle de Kraemer sur la détermination et l'interprétation de la taille des particules. Six ans plus tard, lorsque les mêmes objectifs et problématiques se reposent sur un procédé similaire et déjà développé, cette dichotomie n'est plus exprimée, et Keats est responsable de l'ensemble des composantes du projet. La détermination de la taille des particules n'est plus intrinsèquement considérée comme relevant de la recherche fondamentale, mais comme une activité d'analyse routinière. Deux chimistes de la Station, qui écrivent quelques années après une histoire de la recherche fondamentale chez Du Pont, expriment ainsi cette diffusion des problématiques « fondamentales », du noyau initial institué par Stine vers d'autres groupes de la Station et de l'ensemble des laboratoires de Du Pont : « Débutant à peu près en 1936, la recherche fondamentale n'était plus concentrée dans quelques groupes, mais commençait à être distribuée plus largement parmi tous les groupes de la Station Expérimentale »⁸⁶.

Cette « distribution » de la recherche fondamentale dans les autres groupes auparavant considérés comme appliqués, cependant, s'accompagne d'une évolution dans la perception de ce qu'elle recouvre – ou pas. Quelle que soit la façon dont le projet de Keats envisage de « rationaliser » le procédé au sulfate utilisé par Krebs, Wise et Fischer ne catégorisent pas ce projet comme « fondamental » (cf. annexe E). Peut-être parce que l'ambition est de performer sur un procédé utilisé industriellement, tandis que les premières recherches du groupe des

⁸⁵ Keats, « Titanium oxide – control of particle size », Major experimental project # 2019, 18 mai 1936, JBN 3/Informal projects 1935

⁸⁶ L.G. Wise and N.G. Fisher, « History, activities, and accomplishments of fundamental research in the Chemical department of the Du Pont Company 1926-1939 inclusive », 14 août 1940, p. 11, CRD 21/History fundamental research 1926-1939

colloïdes visant à optimiser les propriétés travaillaient parfois à partir de pigments non exploités commercialement. Dans ce cas, la distinction fondamental/appliqué ne reflète pas la nature ou les objectifs de la recherche, mais traduit plutôt le fait que la recherche est directement en prise avec des produits ou des procédés massivement utilisés, ou pas.

Quoi qu'il en soit, les attributions administratives et les répartitions budgétaires témoignent de cette évolution de la perception de ce qui est fondamental et de ce qui ne l'est pas (ou plus). Le projet de Keats de 1936, qui se situe dans la droite ligne de sa collaboration avec le groupe des colloïdes quelques années plus tôt sur le procédé au sulfate, est entièrement financé par Krebs. Un autre exemple de problématiques initialement portée par le groupe des colloïdes et de physique, qui se désolidarisent par la suite de ce groupe, est le projet déposé par Patterson en 1935 sur l'optimisation du pouvoir couvrant des pigments titanate. Afin d'améliorer les propriétés optiques des pigments aux sels de titane, Patterson reprend ici la stratégie développée par le groupe des colloïdes, à savoir corrélérer le pouvoir couvrant et la taille des particules. Comme indiqué ci-dessus, le pouvoir couvrant devient une grandeur de travail pour cette entreprise, alors que quelques années plus tôt Patterson, à l'instar de la plupart des chimistes industriels, travaillait davantage avec la force de teinture. L'ambition de Patterson pour ce projet s'écarte toutefois radicalement de l'ambition théorique qui anime généralement le groupe des colloïdes. Il ne s'agit en effet pas de *comprendre* comment sont liés le pouvoir couvrant et la taille des particules, mais d'appréhender cette information de taille comme une des « variables » opératoires manipulées pour maximiser le pouvoir couvrant. Significativement, le projet est également intégralement financé par Krebs⁸⁷.

Mais cette diffusion des problématiques fondamentales hors du noyau des groupes qui les ont initialement portées ne veut pas dire, bien évidemment, que l'interaction de ces groupes avec leur environnement sur ces mêmes problématiques disparaît. Simplement, cette interaction se repositionne sur des thématiques qui semblent industriellement plus éloignées. L'exemple de la transition des pigments anatase aux pigments rutile reflète ce glissement. En 1935 en effet, Kraemer parvient à dégager des fonds sur l'enveloppe réservée à la recherche fondamentale pour continuer les recherches sur le lien entre indice de réfraction, taille de particule, et propriétés optiques des pigments rutile. Bien que financé sur fonds propres, Krebs a largement initié cette recherche du groupe des colloïdes, ainsi que le décrit Kraemer dans sa proposition :

En discutant, avec des représentants de Krebs, de la prochaine étape logique dans notre étude fondamentale des pigments blancs, ils ont affirmé que le plus important problème selon eux, parmi ceux qui leur ont été soumis, est la détermination de l'influence de l'indice de réfraction du pigment sur la limite maximale de la force de teinture et du pouvoir couvrant.⁸⁸

⁸⁷ Patterson, *Hiding power of white titanate pigments*, *op. cit.*

⁸⁸ Kraemer, « Influence of refractive index of pigment upon the maximum attainable tinting strength and hiding power », Major experimental project # 2020, 21 mai 1936, JBN 7/White pigment projects 1933-1937

Aussi, « fondamental », ici, – marqué dans les mots et dans l’attribution budgétaire – ne traduit pas l’autonomie du groupe de recherche qui le porte. Contrairement aux premiers projets portés par ce groupe, l’initiative pour ce projet ne lui est pas endogène mais provient de Krebs. Cette recherche est fondamentale avant tout parce qu’elle concerne un pigment qui n’est pas encore commercialisé, le titane rutile, mais les chimistes de Krebs et de la Station savent qu’il n’est pas loin de l’être et y travaillent d’ailleurs d’arrache pied.

Il est intéressant de comparer ce projet financé sur fonds propres, avec un autre projet de Kraemer sur le titane rutile qui est, lui, financé par Krebs à peu près au même moment. Les ventes de la compagnie sur certains pigments au titane anatase sont alors sérieusement perturbées par un effet indésirable que la peinture associée montre à l’utilisation : la peinture s’effrite et se détache des murs ou de la surface recouverte (« *chalking* »). La méthodologie utilisée pour optimiser les propriétés optiques – la performance sur les microstructures – est reprise pour agir sur cet effet indésirable. Tandis que les chimistes de Krebs essayent de développer des peintures résistantes à l’effritement, Kraemer, en discutant avec Sawyer, est sollicité pour comprendre comment ces traitements agissent sur la taille de la particule, et s’il est possible de les optimiser en jouant sur ce paramètre⁸⁹. Aussi, bien que le travail expérimental s’effectue sur les pigments rutile encore au stade de développement, et que l’approche scientifique et méthodologique est similaire au projet précédent sur le rutile, ce projet n’est pas catégorisé comme « fondamental ». Peut-être parce que l’effritement est alors un problème qui perturbe sérieusement les ventes des pigments au titane sur les marchés « de masse », critiques pour Du Pont. Si cette hypothèse est valide, la recherche est d’autant plus « fondamentale » que son degré d’utilité perçu est plus faible ; la distinction ne s’établirait pas, alors, sur des critères épistémologiques ou scientifiques, mais sur des critères économiques.

⁸⁹ Kraemer, « Fractionation of crystalline rutile », Major experimental project # 2173, 18 octobre 1937, *Ibid.*



Figure 7.5 — Portrait d' Edmond D. Bailey photographé en 1929
Avec l'aimable autorisation du Hagley Museum and Library



Figure 7.6 — Photographie de chimistes impliqués dans les pigments ou les colloïdes organiques, posant devant leur laboratoire à la Station, en 1924

De gauche à droite : John. L. Keats, Cole Coolidge, C.H. Greenewalt, Gordon D. Patterson, H.S. Holt, F.C. Hahn ; avec l'aimable autorisation du Hagley Museum and Library

Epilogue – la stratégie d'entreprise et la science

Entre 1925 et 1940, la production des États-Unis des pigments au titane, tous types confondus, a été multipliée par 25, en passant de 3 600 à 91 000 tonnes par an. Du Pont et National Lead sont les deux acteurs industriels qui ont très majoritairement contribué à cet essor de la production. Alors que les rivalités nationales tournent au conflit militaire généralisé, Du Pont et National Lead se partagent la production domestique et dominent les marchés internationaux des pigments au titane, dans une entente qui se découpe en partie selon les types de pigment : Du Pont domine sur les pigments « purs », et National Lead sur les pigments « composites », c'est-à-dire renforcés au baryum, au plomb ou au calcium. Une situation qui perdurera dans l'après-guerre⁹⁰. A travers ces deux compagnies, les États-Unis sont en effet largement exportateurs de pigments au titane : 1 300 tonnes en 1937 et 3 900 en 1939⁹¹. A partir des années 1950, le procédé au chlore remplace progressivement le procédé au sulfate pour la production des pigments au titane. De nos jours, la consommation annuelle

⁹⁰ BARKSDALE, *Titanium, op. cit.*, pp. 373-5

⁹¹ Williams HAYNES, *American Chemical Industry*, New York, D.van Nostrand Company, vol. 5 (« Decade of new products»), 1954, Appendix II (U.S. exports of drugs, chemicals and their products, 1930-1939), p. 460

de ces pigments pour la Chine seule est de plus d'un million de tonnes⁹² ; Du Pont Titanium Technologies reste parmi les plus importants – voire le plus important – producteurs de pigments au titane « purs ». La forme rutil est la plus répandue lorsque ces pigments sont utilisés dans les peintures, les vernis et les laques ; ces usages comptabilisent, en 1948, les trois-quarts de la consommation totale des pigments au titane⁹³.

C'est en janvier 1941 que les pigments rutil « purs » commencent à être commercialisés par Du Pont⁹⁴. Avant l'introduction du procédé au chlore, les pigments rutil sont obtenus en modifiant les températures de calcination et d'hydrolyse du procédé au sulfate. Ces pigments rutil comportent certains avantages techniques, lorsqu'ils sont utilisés dans la formulation d'une peinture, par rapport aux pigments anatase jusque-là commercialisés. La dissémination de la gamme « *Ti-Pure R* » (R pour rutil) à partir de 1941 représente ainsi le premier aboutissement commercial de plus de dix années de recherches distribuées entre la Station et Krebs, « fondamentales », « appliquées », ou encore « d'investigation générale ». Depuis l'ambitieux programme de Stine initié en 1927, Du Pont s'est approprié de vastes domaines de savoirs chimiques et physiques, ainsi qu'une instrumentation sophistiquée, qui ont contribué à son succès industriel et économique sur les pigments au titane. Parmi ces instruments, Du Pont est assuré d'en détenir l'usage exclusif de certains pendant plus d'une décennie, comme l'ultracentrifugeuse. De même, Du Pont est certainement la première compagnie commercialisant des peintures à utiliser la méthode BET pour mesurer la taille des pigments au titane. L'équipe de Keats, alors qu'elle travaille sur la mise au point du procédé de conversion de l'anatase au rutil, collabore avec Paul Emmett dès 1939 alors qu'il vient d'arriver à l'université Johns Hopkins afin de diffuser cette méthode⁹⁵. Krebs fera par la suite un usage intensif de la BET pour améliorer ses procédés. L'exclusivité de cette instrumentation de pointe, ou leur appropriation rapide par rapport à ses concurrents, est très rapidement comprise par les managers de la recherche de Du Pont comme un avantage comparatif substantiel vis-à-vis des autres grandes compagnies.

Il est difficile d'estimer la part effective qui revient à la recherche « fondamentale » au succès industriel et économique de Du Pont sur les pigments, et en particulier sur les pigments au titane. Si, manipulés par la rhétorique de la science pure/recherche fondamentale parfois distillée par les élites scientifiques, économiques et politiques – peut-être plus rarement de nos jours –, nous sommes plutôt enclins à la surestimer, il ne faut pas non plus la sous-estimer. Cette plongée dans les recherches de Du Pont sur le titane pendant l'entre-deux guerres, qui concourent à son succès économique global, permet une lecture de première main

⁹² « Frbiz Forecasts 2010 paint market trends », *China Weekly News*, 29 juin 2010

⁹³ BARKSDALE, *Titanium*, *op. cit.*, p. 376

⁹⁴ Bolton, rapport annuel du département de Chimie au Comité Exécutif de 1941, 14 janvier 1942, CRD 16/Annual reports 1936-1941 ; « Pur » est utilisé entre guillemets car dans les faits ces pigments ne sont pas composés uniquement de dioxyde de titane. Les « impuretés » résultantes ne sont en aucune manière considérées comme des défauts dont l'art et la science chimiques ne seraient pas parvenues à se débarrasser, mais sont en réalité des agents ajoutés délibérément pour remplir un cahier des charges esthétique et technique. Davantage sur ce point au chapitre suivant.

⁹⁵ O.G. Greager, « Fundamental study of the conversion of anatase to rutil », *Experimental Station Progress report* 40-115, 25 juin 1940, JBN 3/Conversion anatase rutil 1939

sur ce qu'est le « fondamental » et son articulation à l'« appliqué ». L'intensité de la circulation des échantillons, des informations et des chimistes entre ces différents laboratoires et équipes conduit à penser que cette articulation devient progressivement *organique*. Organique, c'est-à-dire que l'ensemble de ces recherches et pratiques de développement constituent une écologie globale, dont les groupes et composantes sont en état d'interdépendance forte. Ainsi que l'exprime Bolton sur le cas des pigments rutile, alors que le procédé au sulfate modifié entre dans sa dernière phase de mise au point :

Dans un travail récent pour Krebs, nous nous sommes concentrés sur l'amélioration de la couleur du "Ti-Pure" R et sur des études exploratoires de la nucléation dans l'étape de l'hydrolyse, *afin de réduire les couts et de renforcer la protection des brevets*. Les informations de base développées lors de notre programme de recherche fondamental sur la détermination et le contrôle de la taille des particules, et sur le mécanisme du procédé de nucléation, ont été d'une assistance considérable pour le travail de développement dans les deux départements [Krebs et le département de Chimie].⁹⁶

La « recherche fondamentale » dans ce cas, ce n'est pas la « science pure ». Globalement, elle se moule dans la stratégie générale des firmes industrielles vis-à-vis de leurs laboratoires, de la recherche ou de « la science ». La vocation de ces laboratoires qui éclosent au début du siècle est tournée vers des finalités industrielles : l'amélioration des produits (ou la diminution des coûts) pour conserver les parts de marché, et la protection par les brevets. La « recherche fondamentale » s'inscrit dans la continuité de la recherche industrielle. Comme le mentionne Bolton ci-dessus, les études sur le mécanisme d'hydrolyse et de précipitation – la « nucléation », étape critique du procédé au sulfate – ne sont entreprises que dans la mesure où les enjeux en termes d'amélioration de procédés et de brevets étendus sont immédiats. Ce mécanisme de précipitation est un processus colloïdal, et en plus de l'ensemble des recherches présentées dans ce chapitre, le groupe des colloïdes entreprend d'importantes recherches sur la nucléation, et interagit fréquemment avec Patterson, Keats et Krebs pour croiser leur recherche « fondamentale » sur la nucléation avec les objectifs de ces équipes – réduction des couts et extension des brevets.

Cette vision d'une dépendance organique des activités industrielles de Du Pont vis-à-vis des recherches fondamentales hébergées en son sein est toutefois une lecture instantanée de l'écologie de la recherche. Cette écologie est dynamique ; dès que le « fondamental » se mêle trop inextricablement avec le développement, alors il cesse de l'être et se reconfigure autour d'autres thématiques. Cette forte sensibilité du statut du fondamental vis-à-vis de son environnement est particulièrement visible dans le cas de l'instrumentation de pointe. Une conflation entre recherche fondamentale et utilisation d'une instrumentation de pointe a souvent été opérée. Krebs cependant, fait un tel usage des instruments qui ont été introduits par la recherche fondamentale, que leur utilisation se fait dans un cadre « service » et non « recherche », facturé par la section de physique à Krebs comme n'importe quel autre service.

⁹⁶ Bolton, Rapport annuel de 1940 du département de Chimie au Comité Exécutif, 9 janvier 1941, CRD 16/Annual reports 1936-1941, emphase ajoutée

Recherche fondamentale et instrumentation de pointe deviennent alors décorrélés (cf. aussi table 4.1).

Il faut toutefois garder à l'esprit que la recherche n'est qu'une des composantes de la stratégie d'entreprise, qu'un des leviers à disposition pour s'insérer et performer dans un secteur. Alors même que cette articulation se met en place, que cette écologie s'implante dans la firme, les grands acteurs, trop grands pour s'acheter entre eux, négocient. En 1933 est signé entre Du Pont et National Lead un accord sur les procédés et les brevets relatifs aux pigments au titane⁹⁷. À peu près au même moment, en 1934, National Lead consolide sa domination internationale sur les pigments au titane renforcés en instituant des *joint-venture* avec certaines grandes firmes chimiques non-américaines, comme Imperial Chemical Industries (U.K.)⁹⁸. De fait, ces accords d'échanges sur les procédés et les brevets dissimulent des partages de marchés internationaux. En 1943, le gouvernement fédéral porte plainte contre Du Pont et National Lead devant la Cour de Justice de New York, estimant que le « *pool* » des brevets et des procédés ont permis de négocier avec les grands acteurs industriels européens en vue d'éliminer la compétition internationale⁹⁹. En 1945, la Cour de Justice de New York condamne Du Pont et National pour violation de la loi Sherman antitrust ; un jugement porté devant la Cour Suprême, et confirmé par celle-ci en 1947¹⁰⁰. Ainsi, la recherche n'est pas le seul moteur de la domination/compétition que se livrent les firmes. À la stratégie légale de domination *via* la recherche, se mêle la stratégie illégale d'entente et d'accords entre les firmes. Le décalage entre l'idéologie du « *free market capitalism* », c'est-à-dire la situation où le marché détermine la compétitivité des produits et dicte la stratégie d'entreprise, et la réalité des pratiques des grands capitalistes pour dominer ces marchés, est évident.

⁹⁷ H&S, p. 217

⁹⁸ HAYNES, *American Chemical Industry*, *op. cit.*, p. 358

⁹⁹ Indictment, *USA v. National Lead et al.*, June 1943, N° C-114-455, SCS 4/Titanium dioxide

¹⁰⁰ BARKSDALE, *Titanium*, *op. cit.* p. 367

Chapitre 8. « FROM AN ART TO A SCIENCE » (II) – VERNIS ET PIGMENTS COLORES DANS LA GRANDE DEPRESSION CHEZ DU PONT : CONSOMMATION DE MASSE ET RECHERCHE INDUSTRIELLE

La science est un mot intéressant. Il prend des significations différentes pour des gens différents. Mais au final, il s'agit d'aider nos clients – le paysan comme le fabricant d'automobile – à réussir.

Ellen Kullman, présidente-directrice générale de Du Pont depuis le 1^{er} janvier 2009¹

Bien sûr, à examiner en profondeur les réflexions et les pratiques des chercheurs de Du Pont sur les peintures, le risque est grand de rebuter le lecteur, peut-être ennuyé voire effrayé par les détails techniques et scientifiques soulevés pour les besoins du récit et de la problématique. Cependant, si une focale plus large est adaptée, si l'on s'interroge sur les grandes tendances qui caractérisent la société et l'économie américaines alors que cette nouvelle écologie de la recherche se déploie chez Du Pont, il est peut-être possible de raconter une histoire plus attrayante au lecteur qui ne serait pas d'emblée passionné par l'histoire de la compréhension et de la maîtrise des pigments. Ce thème des pigments minéraux dans l'entre-deux guerres offre des voies d'accès séduisantes pour pénétrer sur le terrain de l'histoire sociale et culturelle des sciences. Un apparent paradoxe surgit de cette histoire industrielle des pigments au titane : entre 1930 et 1935, alors que la Grande Dépression s'étend et que la catastrophe économique engendre en bien des points de la planète des ravages politiques et sociaux, la production des pigments au titane semble ignorer la crise et continue dans sa lancée inflationniste ; au cours de cette période, la production domestique annuelle croît de 10 000 à 53 000 tonnes². Cet essor des pigments au titane détonne tandis que la production de la plupart des autres commodités chimiques ou intermédiaires n'augmente que très modérément pendant cette période, voire diminue³.

¹ « Science is an interesting word; it means different things to different people. But at the end of the day, it's about progressing our customer's – farmer or automobile manufacturer – ability to succeed ». Interviewée par Vinod MAHANTA, « Necessary to develop new products to create opportunity : Ellen Kullman, Dupont », *The Economic Times*, 3 avril 2010

² Jelks BARKSDALE, *Titanium. Its occurrence, chemistry and technology*, New York, The Ronald Press Company, 1949, p. 374

³ Williams HAYNES, *American Chemical Industry*, New York, D. van Nostrand Company, 1954, vol. V, Appendix II, « U.S. production of industrial chemicals, 1931-1939 ». Les autres pigments minéraux ne connaissent pas une telle croissance ; par exemple, la production du noir de carbone passe de 127 000 à 160 000 tonnes entre 1931 et 1935, celle du sulfate de zinc de reste constante à 17 000 tonnes. Cette forte croissance de production pendant les pires années de la dépression ne se restreint pas au titane cependant, elle se manifeste également pour d'autres commodités : l'acétate de cellulose (1 300 à 4 700 tonnes entre 1933 et 1935), et le sulfate d'ammonium, utilisé pour les engrais (13 000 à 100 000 tonnes entre 1931 et 1935).

L'historien Williams Haynes remarque que l'industrie des peintures et vernis a réussi à ne pas sombrer avec son principal partenaire économique, l'industrie de la construction, durement touchée pendant les premières années de la crise dans l'attente des grands programmes volontaristes du New Deal : « La stagnation de l'industrie de la construction, un symptôme caractéristique des mauvais temps, marque le début des années 1930 ; mais la séquence logique – prostration de l'industrie des peintures et vernis – n'a pas suivi »⁴. La bonne résistance de l'industrie des peintures et vernis à la crise semble très pertinente et judicieuse à saisir du point de vue de l'histoire sociale et économique, et se mêle, comme nous le verrons dans ce chapitre, avec l'histoire des sciences. En effet, les tendances de cette industrie à courtiser le consommateur, à fabriquer et commercialiser des produits pour le citoyen américain plutôt que pour le partenaire industriel, déjà largement à l'œuvre au cours des années 1920 comme exposé au chapitre 5, s'amplifient au cours des années 1930.

Certaines transitions exposées au chapitre précédent – l'attention nouvelle sur le pouvoir couvrant plutôt que sur la force de teinture, la mesure du pouvoir couvrant sur des films de peinture secs plutôt qu'humides – acquièrent alors une nouvelle signification à la lumière de ce contexte. Ces évolutions pour statuer sur la qualité et la performance d'une peinture ou d'un pigment représentent en effet un déplacement vers le produit final ; la qualité est mesurée sur le produit tel que l'utilise le consommateur : la peinture ou vernis une fois appliqués et séchés, virtuellement insensibles à la nature et la « force » des différents pigments et *extenders* qui les composent. Dans cette veine, le chimiste E.E. Ware de Sherwin-Williams, une des plus importantes firmes de vernis, relie la modernisation de l'industrie associée à l'essor de la vente au détail : « L'amélioration des procédés et produits apportée par ces influences combinées a engendré une stabilisation générale de l'industrie dans la mesure où elle visait la consommation au détail [« *retail consumption* »] »⁵. Les recherches de l'industrie pour étudier « scientifiquement » les propriétés des produits à partir du début du siècle, à travers la Section Scientifique de l'Association des fabricants de peinture et vernis et le comité D1 de l'ASTM, constituent ces « influences combinées » que met en avant Ware. Recherche et stratégie marketing se rencontrent pour séduire le grand public, un processus dans lequel « l'utilisateur industriel » n'a eu que peu de poids selon Ware.

Ce chapitre est exploratoire. Il regarde comment science, innovation et marketing se reconfigurent dans ce contexte de crise économique en prenant le cas des peintures et vernis au titane. Pap N'Diaye, dans son étude sur Du Pont, rappelle que l'innovation n'est pas confinée à la sphère de la production et plaide pour étudier spécifiquement le rôle des consommateurs et des publicitaires dans le processus d'innovation⁶. Ce chapitre s'inscrit dans cette problématique ; il est exploratoire car les archives du département marketing n'ont pas été consultées, ce qui limite sa portée. Les archives consultées permettent néanmoins d'envisager certaines pistes.

⁴ HAYNES, *American Chemical Industry*, vol. V, *op. cit.* p. 345

⁵ E.E. WARE, « The modern trend of the paint industry », *JCE*, vol. 11 (1934), pp. 437-40, citation p. 438

⁶ Pap NDIAYE, *Du nylon et des bombes. Du Pont de Nemours, le marché et l'état américain 1900-1970*, Paris, Belin, 2001, chapitre 1, « Comment écrire une histoire de l'industrie chimique »

« *The great egalitarian force* » : science, marketing, et mouvements de consommateurs

Les enfants de la dépression

Au cours de l'année 1933, les New-Yorkais et les Américains en visite à New-York ont eu l'occasion de se rendre à une exposition organisée par la Société américaine de chimie, mettant en scène de nombreuses nouveautés commercialisées par l'industrie chimique, et spécialement destinées au grand public. Cette exposition est la quatorzième édition d'une série d'expositions nationales de chimie industrielle, promues par la division de chimie industrielle de la Société. Pour cette édition, les organisateurs ont choisi un titre à la fois accrocheur et explicitement proche des préoccupations des Américains : « *Children of the depression* » [« Les enfants de la dépression »]. Ces « enfants » désignent les produits récemment mis au point par les laboratoires industriels, et sont ainsi présentés comme la nouvelle génération de produits sur lesquels la relance de la consommation intérieure est censée s'épanouir. Cette mise en scène des produits des grandes compagnies dans une exposition grand public est loin d'être isolée dans le paysage culturel et des expositions de l'Amérique des années 1930. La même année en effet, l'Exposition Universelle de Chicago abrite un « Hall des Sciences », qui comprend notamment les nouveautés commercialisées par des firmes comme Union Carbide and Carbon, Merck & Co., et bien sûr Du Pont. Dans la foulée de l'Exposition Universelle, le Musée de la Science et de l'Industrie est ouvert de manière permanente à Chicago. En 1934, la bibliothèque municipale de Newark (ville dotée d'une longue histoire d'implantation des usines chimiques) expose également une variété de produits chimiques fabriqués dans le New-Jersey. En 1936 c'est le Musée de New-York de la Science et de l'Industrie qui ouvre ses portes; Du Pont et ses produits occupent une place telle dans ce musée que son président Lamot du Pont et Charles Stine inaugurent officiellement la partie du musée qui leur est consacrée en mars 1937⁷.

Près de 33 000 visiteurs sont venus parcourir les allées de l'exposition de chimie industrielle de 1933, plus ou moins convaincus de la qualité et de l'utilité des quelques 200 produits exhibés. Du Pont y expose, parmi une multitude d'autres produits qu'il commercialise, son vernis « *Brush Duco* », spécialement conçu pour le revêtement intérieur et extérieur des habitations⁸. Comme nous le verrons, ces vernis constituent un débouché important des pigments au titane. Ces entreprises de mise en scène promues par l'industrie chimique font partie de la stratégie des départements marketing des grandes firmes répondant au nouveau contexte économique induit par la Grande Dépression. Une campagne publicitaire agressive amalgamant science, innovation et qualité se propage à travers les médias de masse, plus ou moins récents, – radio, télévision et presse écrite – et bien sûr à travers ces

⁷ David J. RHEES, « Publicité institutionnelle, relations publiques et expositions. Le cas de Du Pont », in Brigitte SCHROEDER-GUDEHUS (ed.), *La société industrielle et ses musées. Demande sociale et choix politiques 1890-1990*, Paris, Archives Contemporaines, 1992, pp. 191-210 ; HAYNES, *American Chemical Industry*, vol. V, *op. cit.* pp. 399-401

⁸ Anonyme, « Children of depression – chemistry in 1933 », *JIEC*, vol. 26 (1934), pp. 3-10

expositions et musées destinés au grand public, afin de performer sur les habitudes de consommation des Américains. Comme l'exprime un commentateur des « enfants de la dépression », « cette exposition est composée de plus d'une centaine de produits nouveaux ou grandement améliorés par la recherche, et commercialisés, à cause de ou en dépit de, la dépression. La sélection de ces produits s'est effectuée uniquement sur la base de leur nouveauté, issus de la recherche et de la commercialisation. Les valeurs purement scientifiques ont été dans tous les cas asservies à l'importance commerciale »⁹.

L'organisation des « consommateurs »

La figure du « consommateur » est une invention des professionnels de la publicité, hébergés par les grandes compagnies industrielles et motivés par l'extension sans fin des territoires et des populations où se vendent leurs produits. Au tournant du siècle, le marketing de masse et la production de masse s'articulent progressivement dans un même mouvement et engendrent des évolutions économiques et sociales colossales au sein du vaste territoire américain¹⁰. Comme abordé rapidement au chapitre 6, les « consommateurs » américains, ou leurs représentants, se sont rapidement organisés afin de défendre leurs intérêts propres – qui ne sont pas forcément ceux des grandes compagnies – notamment à travers le *Pure Food and Drug Act* et le mouvement des *home economists*. L'historien Charles McGovern propose une périodisation des mouvements de consommateurs dans laquelle une reconfiguration profonde se déploie avec la Grande Dépression. À partir de la fin des années 1920, les consommateurs organisés ou les activistes se revendiquant de cette étiquette s'opposent plus frontalement aux pratiques commerciales du *big business*, et en particulier aux pratiques publicitaires et de marketing. Ces mouvements de consommateurs militent pour une régulation politique des produits de grande consommation, et la crise économique génère une situation favorable à un interventionnisme étatique accru sur la consommation¹¹.

La « science » est un ressort mobilisé à la fois par ces mouvements de consommateurs et par les professionnels de la publicité, avec toutefois des conceptions et des attentes totalement différentes vis-à-vis de celle-ci. Tandis que la recherche industrielle et l'image du scientifique inventant de nouvelles merveilles sont parfois mises au premier plan du discours publicitaire, les mouvements de consommateur perçoivent cette recherche et ce même scientifique comme leur principal allié pour poursuivre leurs intérêts, y compris la dénonciation des publicités mensongères à prétention scientifique. Lorsque le physicien Frederick J. Schlink et l'économiste Stuart Chase fondent en 1929 le *Consumer Research*

⁹ *Ibid.* p. 4

¹⁰ Susan STRASSER, *Satisfaction guaranteed. The making of the American mass market*, New York, Pantheon Books, 1989 ; David A. HOUNSHELL, *From the American system to mass production, 1800-1932*, Baltimore et Londres, The Johns Hopkins University Press, 1984 ; Les analyses et le cadre interprétatif de Alfred D. CHANDLER Jr. ont constitué un point de départ historiographique essentiel à ces travaux sur l'émergence de la société américaine « de masse », voir surtout *The visible hand : the managerial revolution in American business*, Cambridge, The Belknap Press of Harvard University Press, 1977 [Traduction française de Frédéric Langer, *La main visible des managers : une analyse historique*, Paris, Economica, 1988]

¹¹ Charles F. MCGOVERN, *Sold American. Consumption and citizenship, 1890-1945*, Chapel Hill (NC), The University of North Carolina Press, 2006

Inc., il s'agit de dégager des fonds pour abriter ou financer des études sur la qualité des produits, de substituer les marques par des spécifications techniques, et de détecter les publicités frauduleuses ; en bref, la vocation du *Consumer Research* est, selon ses fondateurs, de « substituer la science à la magie et à la persuasion ». La carrière de Schlink (1891-1955) s'inscrit dans le mouvement de standardisation qui accompagne le boom économique des années 1920. Travaillant au Bureau des Normes entre 1913 et 1919, il intègre en 1921 l'*American Engineering Standard Committee* (AESC), qui est d'ailleurs dirigé par un autre physicien du Bureau, Paul Agnew. C'est au cours de son expérience à l'AESC, alors qu'il rencontre Chase (1888-1985), que Schlink acquiert la conviction que les intérêts des producteurs et ceux des consommateurs divergent dangereusement étant donné la réalité des pratiques commerciales en vigueur. Cette conviction débouche sur une action plus militante, qui contribue à donner au mouvement de standardisation une préoccupation accrue envers les intérêts des consommateurs¹².

Initialement porté par Schlink, Chase et Edith Copeland, une *home economist*, le *Consumer Research* est progressivement rejoint par un personnel qualifié, et se concentre sur la diffusion d'informations et de recommandations sur un grand nombre de produits. Ses bonnes relations avec le Bureau des Normes et d'autres laboratoires universitaires et commerciaux lui permettent d'initier des tests sur les produits, tout en refusant toute compromission avec un produit ou une compagnie en particulier. Cet organe indépendant perçoit son action avant tout comme la défense du David consommateur contre le Goliath industriel et publicitaire. L'Amérique s'est détachée de ses campagnes et de sa République des villages ; la nouvelle ère de la consommation a engendré de nouveaux dominants manipulant les foules. Le *Consumer Research* est un instrument de justice sociale accordé aux nouvelles réalités de la société américaine ; la science est son arme la plus efficace dans cette lutte :

Pour le CR [*Consumer Research*], la science a remplacé des terres vastes et peu coûteuses, ainsi qu'une vie agraire dans une vision républicaine, en tant que garantie de justice et d'équité. La science est la grande force égalisatrice [« *The great egalitarian force* »] stabilisant les relations entre le consommateur et la grande compagnie, l'individuel et le capital. De même que les entreprises dépeignent la science comme du progrès incarné dans de nouveaux produits, les consommateurs ont avancé que la science diminuerait, plutôt qu'augmenterait, l'écart entre l'individu et la grande compagnie. À travers l'évaluation impartiale et le test des annonces publicitaires, la science offre au consommateur un moyen de réduire la grande compagnie à l'échelle humaine. La traduction des données techniques dans un langage ordinaire permet à tous les consommateurs de se protéger. La science est potentiellement le langage véritablement démocratique : dans l'idéal objective, transparente, incapable d'être interprétée de travers.¹³

¹² *Ibid.*, pp. 164-84

¹³ *Ibid.* p. 208

Suivant l'exemple du CR, les laboratoires orientés sur la satisfaction du consommateur vont se multiplier, dans un contexte où le consommateur apparaît davantage comme une solution que comme un problème. La crise économique a en effet révélé l'importance de la consommation pour la bonne tenue de l'économie américaine. La relance par la consommation intérieure est une des stratégies envisagées par l'administration Roosevelt alors que celle-ci essaye de donner une substance à son New Deal. L'institution en juin 1933 de la *National Recovery Administration* est une des premières mesures phares du New Deal, et vise à réguler les pratiques commerciales, les prix et les salaires. Cet organe gouvernemental reconnaît en théorie trois catégories d'acteurs qu'il est censé accorder en vue d'enrayer la crise : les entreprises, les syndicats et les consommateurs¹⁴. En pratique, la *National Recovery Administration* est dominée par les entreprises – bien que les grands patrons aient souvent critiqué son existence même – et son directeur exécutif fait comprendre aux acteurs censés représenter les consommateurs que les intérêts de ces derniers ne sont pas une priorité. Le CR, sur lequel le New Deal s'appuie par ailleurs, se désolidarise rapidement de cette administration¹⁵.

Le Bureau des Normes est initialement pressenti, en particulier par les « consommateurs », pour endosser la fonction d'un laboratoire indépendant, dédié aux tests et à la recherche orientée par les pratiques des consommateurs vis-à-vis de leurs biens. Mais le Bureau s'est historiquement construit en adéquation avec les intérêts industriels, et selon son historien Rexmond Cochrane, « n'a jamais été pleinement content des ses relations avec les groupes de consommateurs ». En conséquence, le Bureau a progressivement ignoré les demandes des organisations de consommateurs à tester tel produit en particulier, pour tel usage. Ce qui a enclin ces organisations à se tourner vers les laboratoires industriels : « Les efforts de Schlink et d'autres », poursuit Cochrane, « visant à obtenir des résultats utiles et certifiés à partir du Bureau en envoyant des produits de consommation aux laboratoires [du Bureau], devaient être rejetés. Ils étaient priés de s'adresser aux laboratoires de test commerciaux »¹⁶.

Vernis et culture de la consommation : le basculement vers les peintures domestiques

Ce désengagement du Bureau, et plus largement l'échec de l'institution d'un laboratoire entièrement orienté sur le consommateur, n'a pas empêché les mouvements de consommateurs, et le CR en particulier, de peser sur les laboratoires commerciaux. Ces derniers écoutent les recommandations de ces mouvements leur demandant d'effectuer les tests de qualité, dans les conditions les plus proches possibles de l'utilisation du

¹⁴ Michael A. BERNSTEIN, *The Great Depression. Delayed recovery and economic change in America, 1929-1939*, Cambridge (MA), Cambridge University Press, 1987, pp. 184-206

¹⁵ MCGOVERN, *Sold american, op. cit.*, pp. 248-53

¹⁶ Rexmond C. COCHRANE, *Measures for progress : a history of the National Bureau of Standards*, Washington (D.C.), U.S. department of Commerce, 1966, p. 328

consommateur : les chaussures sont maltraitées, les machines à laver remplies à ras bord, et les voitures exposées à des conditions climatiques extrêmes...¹⁷

L'industrie des peintures et vernis s'est alignée sur cette tendance à « penser usage » dans l'élaboration et la spécification des produits, ne serait-ce que parce ses produits recouvrent un grand nombre d'articles de grande consommation, comme, d'ailleurs, les machines à laver et les voitures. Le consommateur n'a que faire de savoir si sa voiture s'abîme vite parce son revêtement est inefficace ou parce que le métal utilisé pour la carrosserie est de mauvaise qualité. Un produit est de bonne ou de mauvaise qualité, quelle que soit la diversité des matériaux ou des industries qui ont coopéré pour aboutir à ce produit. L'attention nouvelle portée à la qualité et la durabilité du produit fini a accéléré les coopérations inter-sectorielles. Par exemple le *Forest Products Laboratory*, un laboratoire gouvernemental situé à Madison (Wisconsin), héberge un grand nombre de panneaux d'exposition pour tester la durabilité des peintures et vernis. À partir de la fin des années 1920, les industries forestières et des peintures collaborent plus intensément pour déterminer les causes (le bois ou le revêtement ?) de la mauvaise tenue du bois enduit, ou peint, face aux intempéries, et proposer des programmes de recherche et d'amélioration en conséquence¹⁸. En 1929, pour le développement des résines synthétiques « glyptales », Du Pont collabore avec les grandes compagnies ferroviaires américaines, avec la compagnie de transport maritime *U.S. Lines*, et avec Coca-Cola pour tester la performance de ses résines sur les coques des navires, les rails et les produits de grande consommation comme les canettes de soda¹⁹. Impliquée dans une large gamme de produits, l'industrie des peintures et vernis s'est ainsi trouvée au cœur d'enjeux considérables sur la qualité et la durabilité des biens. Comme l'exprime le chimiste de Sherwin-Williams E. E. Ware, une des compagnies les plus importantes de cette industrie,

le laboratoire du chimiste des peintures et le laboratoire de l'utilisateur industriel [des peintures] sont équipés de toute sorte d'appareils spéciaux, à la fois mécaniques et chimiques, grâce auxquels ils essayent de dupliquer les conditions de service. Les tests du fabricant d'automobiles pour la résistance à l'essence, au cambouis, à l'eau saumâtre et aux agents abrasifs ; le fabricant de réfrigérateurs pour la résistance aux changements de température, d'humidité, à la crasse des ménages [« *household grease* »], au dioxyde de soufre, et à la décoloration ; le fabricant de meubles pour la résistance à la chaleur, à la moisissure et à d'autres influences des ménages, incluant même l'alcool ; et ainsi de suite pour l'ensemble des industries. Chaque industrie et chaque superintendant ou opérateur technique a sa propre idée de la façon dont il peut s'assurer, par des méthodes accélérées, que le revêtement qu'il applique à son produit va tenir et décorer tout au long de sa vie.²⁰

Ware présente ici sa vision de la modernisation de l'industrie des peintures durant les trois dernières décennies ; à l'instar de Schlink, dans cette vision la science est le moteur de

¹⁷ MCGOVERN, *Sold american*, op. cit., p. 192

¹⁸ Frederick L. BROWNE, « History of wood research finishing from 1922 to 1963 », in Thomas M. GORMAN & William C. FEIST, *Chronicle of 65 years of wood finishing research at the Forest Products Laboratory*, Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-60, Madison, WI: US Department of Agriculture, 1989

¹⁹ Stine, Rapport annuel de 1929 au Comité Exécutif, 15 janvier 1930, CRD 16/Annual reports 1922-1929

²⁰ WARE, *The modern trend*, op. cit. p. 438

cette modernisation et permet d'assurer la satisfaction du consommateur et la rationalisation des produits et procédés. L'organisation de l'industrie et son adaptation aux revendications Progressistes a enfanté la Section Scientifique et les autres laboratoires de tests des peintures ; cette « scientification » de l'industrie, a, selon Ware, « convaincu le fabricant de peinture qu'une coopération intelligente entre la recherche et la publicité pouvait être mutuellement bénéfique au producteur et au consommateur »²¹. L'expansion plus récente de la recherche industrielle sur les peintures, et la prise en compte des intérêts du consommateur par ces laboratoires, parachève cette tendance initiée par les pionniers Edwin Ladd et Henry Gardner, qui ont « condamné les mauvaises pratiques du passé », et « éduqué le public consommateur de peintures à propos de la faible valeur protectrice de l'huile de paraffine et de l'eau ». Le temps de la publicité mensongère et de l'ajout frauduleux de substances délétères est révolu ; l'industrie s'est métamorphosée grâce à la science, qui rapproche les producteurs des consommateurs. « Quelle que soit la composition [du tableau du futur de l'industrie des peintures] », conclut Ware, « nous sommes assurés d'un produit de beauté et d'utilité ; car la fabrication de peinture a très certainement progressé d'un art à une science »²².

Mais offrir des produits de bonne qualité, testés et certifiés par des procédures « scientifiques » et « rationnelles », n'est pas la seule façon de satisfaire le consommateur. Ou plus exactement, la qualité du produit, apparente ou certifiée par des normes, n'est pas le seul critère qui influence sa décision d'achat. Un fait bien connu des services de vente et de marketing qui mobilisent d'autres registres que la spécification technique pour favoriser l'acte d'achat. Plus subtil, mais tout aussi rapidement exploité par ces services, est le fait que cette spécification ou procédure « scientifique » puisse être efficace non pas en tant que garant de la qualité du produit, mais en elle-même, comme l'exemple d'un adhésif développé par Du Pont le suggère. Que Grasselli, la compagnie récemment rachetée par Du Pont et fabricant des peintures, se soucie, au début des années 1930, de la satisfaction des utilisateurs de ses produits, cela ne fait pas de doute. Grasselli commercialise un adhésif au silicate de sodium principalement utilisé pour assembler des cartons ondulés, mais ses clients se plaignent que cet adhésif ne résiste pas aux moisissures, et que les joints assemblant les pièces du carton se détachent lorsqu'ils sont exposés à l'humidité. Selon Bolton, Grasselli a chargé la Station de développer du silicate de sodium résistant à l'eau, et de tester les prototypes d'adhésif qui en résulteraient « pour les applications pratiques »²³.

Les recherches sur le silicate de sodium à la Station s'étalent sur plusieurs années. Patterson prend la direction de cette recherche, et Orion Schupp, le même qui a développé un appareil de mesure du pouvoir couvrant avec Kraemer entre 1931 et 1933, se penche sur le silicate alors qu'il rejoint le groupe de Patterson en 1935. « Il semble logique », écrit Schupp alors qu'il expose ses recherches à Patterson, « qu'un programme de la Station, tout en étant de nature fondamentale, devrait servir à orienter les autres études sur les adhésifs au silicate

²¹ *Ibid.* p. 437

²² *Ibid.* p. 440

²³ Bolton, Rapport de 1930 au Comité Exécutif, 14 janvier 1931, CRD16/Annual reports 1930-1935

dans la direction la plus productive »²⁴. A l'instar de nombreux autres chercheurs ou directeurs de recherche, Schupp assimile la recherche « fondamentale » à la mobilisation d'une instrumentation de pointe : « Nous entreprendrons une étude sur les caractéristiques colloïdales du silicate afin de déterminer si l'ultramicroscope, les rayons X, le plastomètre ou tout autre outil pourrait donner des informations de valeur ». Mais l'équipe de Patterson a déjà pris des photographies aux rayons X des échantillons de cartons ondulés assemblés au silicate, et les a envoyés à Grasselli. Ces photographies ont effectivement fourni des informations « de valeur », mais peut-être pas de la manière dont la Station s'y attendait.

Schupp en effet prend soin de préciser à Patterson que les analyses par rayons X ont été utiles à Grasselli, « à la fois dans les études techniques et dans les services de vente » : « Les contacts [des chimistes de Grasselli] avec les usines, les laboratoires de tests du Forests Product Laboratory, et les services de vente, leur ont permis d'utiliser les informations fournies par ces photographies de bien des façons. [...] L'utilisation de la méthode à rayons X fournit ainsi des informations techniques utiles et génère en même temps un effet psychologique définitivement favorable aux consommateurs à qui les photographies ont été montrées »²⁵. Cette anecdote où les photographies du carton ondulé par rayons X sont mobilisées par les services de marketing de Grasselli pour gagner la confiance du « consommateur » est éloquent, et doit être interrogée et disséquée. Premièrement, il faut noter ici que, à l'instar de Ware, Schupp utilise le terme de « consommateur » plutôt que, ou en parallèle à, « client ». La catégorie du « consommateur », qui est une invention des services marketing et publicité des grandes firmes, s'exporte largement hors de ces services et devient également une catégorie active pour les chercheurs industriels. L'effet bénéfique des rayons X, non en tant qu'outil de recherche, mais outil de vente n'est peut-être pas complètement anticipé par Schupp, mais celui-ci en fait un argument supplémentaire pour justifier son programme à Patterson. La figure du « consommateur » n'est pas restreinte aux services qui lui sont historiquement dédiés ; elle est une réalité concrète qui existe au sein de la compagnie à travers la collaboration des branches recherche et vente. Deuxièmement, la prise en compte du « consommateur » par les chercheurs s'inscrit, dans ce cas, dans une dichotomie « technique/psychologique » reflétant la manière dont ces derniers perçoivent l'utilité de la recherche. Lorsque les chimistes de la Station s'adressent aux chimistes de Grasselli, la nature de l'échange est « technique » ; lorsque les chimistes s'adressent aux « consommateurs », c'est-à-dire aux clients de Grasselli qui ne représentent ni une grande entreprise ni le gouvernement, la nature de l'échange est « psychologique ». Troisièmement, cet exemple souligne la proximité des laboratoires industriels, en l'occurrence ceux de Grasselli, avec le consommateur ne représentant que lui-même.

Il n'y a pas de doute que dans l'esprit des acheteurs qui interagissent avec les chimistes de Grasselli, les photographies par rayons X du carton ondulé assemblé aux silicates

²⁴ Memorandum, Schupp à Patterson, « Adhesive properties of sodium silicate – trip to Cleveland, November 23-24, 1936 », 28 décembre 1937, GDP 12/Chronological files 1936-1939

²⁵ *Ibid.*

représentent « la science » avec tout ce qu'elle véhicule de rigueur ou de magie²⁶. Peut-être même que ces chimistes ont présenté ces photographies comme un résultat de la recherche « fondamentale » de Du Pont, amplifiant encore l'effet « psychologique » de celles-ci. Comme l'ont perçue ou voulue les acteurs comme Schlink ou Ware, la science rapproche effectivement le consommateur de la grande compagnie ; mais elle n'est pas toujours une « grande force égalisatrice », l'arbitre des relations entre des intérêts divergents. L'interprétation des figures de diffraction par rayons X nécessite une certaine expérience ; il est probable qu'à l'œil et l'esprit non-exercés, un chercheur ou un responsable des ventes pourra faire dire à peu près n'importe quoi à ces figures. La recherche ne met pas nécessairement le consommateur sur un pied d'égalité avec le producteur. Il se pourrait même, en mobilisant des outils que seules une longue formation et pratique permettent de maîtriser, qu'elle augmente l'impuissance du consommateur. Il manque ici cruellement le point de vue des services publicitaires et de ventes de Du Pont. Cet exemple sur le silicate de sodium est-il davantage qu'anecdotique ? La mobilisation de la recherche à des fins « psychologiques » et non « techniques » est-elle consciente et délibérée, largement répandue et planifiée, ou au contraire le fruit des interactions ponctuelles entre clients et vendeurs ? Quel est le rôle exact des chercheurs et leur apport effectif dans cette stratégie de mobilisation non-technique de la recherche ? Un examen approfondi des archives de ces services permettrait de mieux comprendre comment la recherche et le marketing s'articulent ; les matériaux récoltés ici sont insuffisants pour analyser cette articulation dans le détail.

Cependant, il est clair que l'utilité non-technique de la recherche est un phénomène assez massif au sein de la compagnie dans l'entre-deux guerres ; le cas des rayons X appliqué aux silicates n'est pas qu'anecdotique. En 1923, le département des Peintures, en même temps qu'il décide de frapper ses produits du logo du Du Pont – « *Du Pont* » écrit en rouge dans un ovale cerclé de rouge –, accorde une place prépondérante au chimiste et à l'ingénieur chimiste dans les messages publicitaires vantant les peintures et vernis commercialisés par ce département. Cependant cette mobilisation publicitaire de la « science » intervient alors que le département n'effectue presque aucune recherche sur ses produits²⁷. Ainsi, recherche et produits sont corrélés comme argument de vente, mais pas nécessairement dans leur mise au point. Cette corrélation/décorrélation perdure par la suite mais sous de nouveaux rapports, alors qu'à partir de la seconde moitié des années 1920 les peintures et vernis font l'objet de nouveaux tests sur leurs propriétés physiques. Ces tests physiques comprennent l'examen *in situ* de la tenue générale et de la durabilité des peintures et vernis en conditions d'utilisations réelles, sur des panneaux d'exposition disséminés un peu partout sur le continent. À partir du milieu des années 1920 en effet, Du Pont multiplie ses panneaux d'exposition, et travaille régulièrement avec le Forest Products Laboratory de Madison (cf. chapitre 5).

Aussi, au tournant des années 1930, quand le département des Peintures, rebaptisé *Fabrics & Finishes*, anticipe sur la commercialisation des peintures issues d'une nouvelle

²⁶ « The miracles of science » remplace « better living through chemistry » comme slogan officiel de Du Pont dans l'après-guerre.

²⁷ H&S, p. 139

formulation de véhicule à la résine glyptale, plus de 700 tests sur panneaux d'exposition ont été accumulés sur ces peintures²⁸. La plupart de ces tests physiques ont été centralisés à la Station, et ces tests sur panneaux d'exposition sont également élaborés et suivis par les chimistes de la Station. Le développement des peintures glyptales, commercialisées sous l'appellation générique « DuLux », et visant principalement le marché des peintures domestiques (*house paints*), a donc donné lieu à d'intenses collaborations entre le département de Chimie et le département *Fabrics & Finishes*. Mais le service de vente de ce département a rapidement saisi tout le parti qu'il pouvait tirer de cette masse de tests pour ses intérêts immédiats – non le développement du produit en soi, mais son image. Selon Bolton en effet, « Philadelphie [site d'implantation du département *Fabrics & Finishes*] a trouvé que nos [la Station] panneaux d'exposition offrent des arguments de vente très efficaces, et dans cette perspective nous avons fourni des panneaux, des photographies, et des données sur les propriétés physiques pour la brochure de promotion des ventes élaborée par Philadelphie pour l'exploitation du DuLux »²⁹.

Il n'est donc pas surprenant que lorsque Du Pont lance la gamme de peintures DuLux pour application en extérieur en mai 1931, les services de vente mettent d'abord en avant la durabilité de ces peintures, en argumentent cette ligne publicitaire sur la base des nombreux tests réalisés par les chimistes de la Station, et ceux du département de production, qui dispose également de son service de recherche. Une stratégie publicitaire efficace, dans la mesure où les consommateurs, à travers les mouvements comme le CR, ont été « éduqués » – comme l'exprime le chimiste Ware de National Lead – à exiger des normes et des chiffres pour s'assurer de la qualité d'un produit. Cependant, en dépit de cette masse de tests effectifs alimentant une avalanche de chiffres et de données « objectives » dans les brochures de vente, les débuts de la commercialisation de ces peintures sont un échec retentissant. Les peintures se dégradent sous l'effet de l'accumulation des moisissures sous le film, et se détachent rapidement des murs. Du Pont doit financer la rénovation des maisons affectées par ces dégradations. Le responsable des services de vente, W. M. Zintl, admettra quelques années plus tard que l'avidité de Du Pont à commercialiser le premier des peintures glyptales a été responsable de cet échec technique, qu'il attribue à une campagne de tests préalables insuffisante³⁰. Une leçon sans doute aussi pour les consommateurs, pour lesquels il devient immédiat que les « *facts and figures* » présentés pour rendre le DuLux aguichant n'impliquent pas nécessairement sa qualité globale. Ici, la même dichotomie technique/psychologique soulevée par Schupp sur le silicate de sodium s'exprime à une échelle plus massive sur les peintures DuLux, et traduit une décorrélation entre le message publicitaire et la réalité des tests. Il est néanmoins surprenant qu'en dépit des nombreux tests qui ont été effectués, et qui

²⁸ Bolton, 1930 Annual report of the Chemical department to the Executive Committee, 14 janvier 1931, CRD 16/Annual reports 1930-1935

²⁹ *Ibid.*

³⁰ W.M. Zintl, *History of the Du Pont paint business*, Wilmington (DE), E.I. du Pont de Nemours & Co., 1947, cité par Harriet STANDEVEN, « The development of decorative gloss paints in Britain and the United States c. 1910-1960 », *Journal of the American Institute for Conservation*, vol. 45 (2006), pp. 51-65

ont sans doute montré d'une manière ou d'une autre l'effet délétère et rédhibitoire des moisissures, la commercialisation du DuLux ait quand même été précipitée.

Les peintures DuLux représentant un débouché important des pigments au titane, pour lesquels un apparent paradoxe a été soulevé en introduction, étant donnée leur bonne résistance à la crise économique, il est judicieux d'étudier leur trajectoire en détail. L'étude comparative sur les peintures décoratives entre le Royaume-Uni et les États-Unis, réalisée par l'historienne de l'art Harriet Standeven, est particulièrement révélatrice de la spécificité des États-Unis sur les produits de grande consommation³¹. Un marché intérieur colossal offre à cette nation des perspectives économiques favorables par rapport aux autres pays industrialisés. Du Pont est le premier acteur industriel à commercialiser dans la seconde moitié des années 1920 des vernis nitrocellulosiques de grande consommation labélisés « *Brush Duco* », qui précèdent l'apparition des résines synthétiques employées dans le DuLux. En 1930, environ 250 compagnies aux États-Unis commercialisent des vernis imitant le Duco, alors qu'en Grande-Bretagne la vente de ces vernis est encore très limitée : « Ces laques utilisées au pinceau semblent beaucoup plus répandues aux États-Unis qu'en Grande Bretagne, probablement à cause de l'énorme marché des peintures vendues au détail aux États-Unis »³².

Le Duco, commercialisé par Du Pont à partir de 1923, est un vernis utilisé dans un premier temps comme enduit de finition pour les automobiles. Les principaux acheteurs du Duco sont donc les grandes compagnies automobiles comme Ford et General Motors (cf. chapitre 5). Initialement le Duco est composé de résines semi-synthétiques à base de nitrocellulose. Un des avantages décisifs des résines semi-synthétiques sur les résines naturelles est leur temps de séchage comparativement beaucoup plus court. La nitrocellulose étant un des principaux composés des explosifs, l'effort de guerre de la Première Guerre mondiale a décuplé les capacités industrielles de production de cette substance, principalement autour de deux acteurs dans le camp des Alliés : Du Pont pour les États-Unis et les *Nobel Industries Limited* pour le Royaume-Uni. Les vernis nitrocellulosiques comme le Duco assurent ainsi un débouché important à la nitrocellulose dans l'économie d'après-guerre, une transition que ces deux acteurs ont conjointement négociée : Du Pont s'accorde en effet avec les industries Nobel sur la commercialisation des vernis nitrocellulosiques au milieu des années 1920. En 1926, les industries Nobel fusionnent avec les autres grandes compagnies chimiques anglaises pour former le conglomérat ICI (*Imperial Chemical Industries*)³³. La production du Duco par Du Pont est alors de 625 000 gallons (environ 900 tonnes)³⁴.

Cette même année cependant les résines alkydes, alors appelées « glyptales », commencent à se substituer aux résines nitrocellulosiques dans la formulation du Duco. Ces résines glyptales sont des résines synthétiques de type alkydes, issues de la condensation entre

³¹ STANDEVEN, *The development of decorative gloss paints, op. cit.*

³² *Ibid.* p. 55

³³ *Ibid.* p. 54

³⁴ Stine, rapport annuel de 1926 au Comité Exécutif, 20 janvier 1927, CRD 16/Annual reports 1922-1929

un acide carboxylique gras et un alcool, pour former un polyester. Elles sont caractérisées par une meilleure durabilité que les résines semi-synthétiques. Cet avantage est rapidement mis sur le compte des propriétés physiques d'élongation et de viscosité exceptionnelles de ces résines synthétiques³⁵, propriétés récemment testées dans le nouveau laboratoire « quantitatif » des propriétés physiques des peintures et vernis que la Station vient d'instituer. C'est Patterson, alors qu'il est chargé de l'amélioration des vernis Duco à partir de 1926, qui réalise en premier la portée des résines synthétiques pour les vernis. « Doué de prescience », selon Standeven³⁶, il entreprend une importante campagne de tests de durabilité des résines synthétiques sur panneaux d'exposition à partir de 1927. C'est alors qu'il réalise que les pigments « titanox » – oxyde de titane additionnés d'un peu d'oxyde de zinc – se marient beaucoup mieux avec les résines synthétiques que le lithopone. Le lustre des vernis est mieux conservé et la décoloration moins importante avec les pigments titanox³⁷. En conséquence, les vernis Brush Duco contiennent des résines synthétiques et des pigments au titane dès 1926. Rapidement les résines glyptales font l'objet de statistiques de ventes spécifiques vis-à-vis des résines semi-synthétiques. Mais les clients de Du Pont pour ces résines restent restreints aux acheteurs industriels, et en particulier les fabricants automobiles. Selon Stine en effet, 300 000 gallons (environ 430 tonnes) de résines glyptales ont été commercialisées pendant les dix premiers mois de 1929, et les acheteurs sont composés « d'environ dix compagnies automobiles »³⁸.

Cette situation change courant 1930, alors que la crise économique est déclenchée. La commercialisation des peintures glyptales « DuLux » pour les applications domestiques (« *house paint* ») coïncide avec une forte augmentation de la production des résines glyptales : la production est presque doublée entre 1929 et 1930, et passe d'environ 500 à 965 tonnes³⁹. Bolton – récemment promu directeur du département de Chimie – écrit début 1931 qu'« en dépit du mauvais contexte pour les affaires, il est significatif que le développement du glyptal ait permis à Philadelphie [site de production des résines glyptales] de s'assurer de nouveaux débouchés dans ce domaine compétitif », et que « le département de Production [accorde] une attention grandissante à l'utilisation des résines glyptales dans des produits spécifiques »⁴⁰. La diversification des débouchés qui accompagne cette augmentation de la production des résines glyptales au titane – des revêtements automobile aux peintures domestiques puis aux produits de grande consommation comme les frigidaire, les machines à laver... – nécessite un remaniement des catégories d'acheteur : à partir de 1932, Bolton utilise la dichotomie domaine industriel/domaine des peintures domestiques (« *industrial field/house paint field* ») pour catégoriser les débouchés des peintures DuLux⁴¹. Plus généralement, Ware utilise la

³⁵ Stine, rapport annuel au Comité Exécutif de 1928, 18 janvier 1929, CRD 16/Annual reports 1922-1929

³⁶ « *Blessed with foresight* », STANDEVEN, *development of decorative gloss paints*, *op. cit.* p. 57

³⁷ Cf. les rapports de Patterson rédigés entre 1926 et 1928 dans le dossier GDP 8/Pigment research – summary reports dispersions 1926-1927

³⁸ Stine, Rapport annuel de 1929 au Comité Exécutif, *op. cit.*

³⁹ Bolton, Rapport de 1930 au Comité Exécutif, *op. cit.*

⁴⁰ *Ibid.*

⁴¹ Bolton, Rapport de 1932 au Comité Exécutif, 6 janvier 1933, CRD 16/Annual reports 1930-1935, voir aussi Fig. VIII.1

dichotomie utilisateur industriel/consommateur au détail (« *industrial user/retail consumer* »), même si les peintures DuLux ne se vendent pas toutes au détail, et s'écoulent également à travers les corps professionnels des maîtres-peintres. À partir de 1931 cependant, le département *Fabrics & Finishes* lance d'importantes campagnes de publicité pour promouvoir les peintures DuLux⁴². Certaines de ces publicités manifestent cette dichotomie *industry/home* (fig. 8.1).

Le « secteur domestique » est alors éminemment stratégique aux yeux de ce département. Un de ses chimistes, C.F. Rassweiler, raconte la substitution progressive des pigments au plomb par les pigments au titane pour l'habitat. Dotés d'un pouvoir couvrant supérieur, les peintures au blanc de titane nécessitent moins de couches que le blanc de plomb pour recouvrir une surface donnée en blanc, ce qui permet de réduire les coûts de main-d'œuvre et de matériaux⁴³. Mais le pouvoir couvrant supérieur du titane est en lui-même insuffisant pour assurer son utilisation massive dans la construction. Les peintures blanches se salissent plus vite que les autres, les saletés s'accrochent aux murs et donnent en quelques mois un aspect délabré aux maisons peintes en blanc. La formulation d'un pigment et d'un véhicule adaptés à une utilisation extérieure a constitué un enjeu essentiel pour assurer l'implantation des peintures au titane au cours des années 1930. L'effritement progressif des peintures devient alors un atout pour l'utilisation extérieure : la décomposition de la peinture entraîne les salissures, contribuant ainsi à préserver la propreté du mur peint. Cette décomposition (« *chalking* ») doit cependant être maîtrisée et uniforme. « Non seulement les particules de pigment libres se désagrègent avec la pluie, et emmènent les poussières avec elles », décrit Rassweiler, « mais les pigments semblent plus blancs à l'état libre à la surface que lorsqu'ils sont encastrés dans le film »⁴⁴.

Depuis 1930, des tests de décomposition sont effectués dans des conditions réelles d'utilisation, c'est-à-dire que des maisons sont réquisitionnées pour tester la tenue générale des peintures au titane, en plus des panneaux d'exposition en extérieur. La maîtrise du *chalking* devient un goulet technique conditionnant le succès de ces pigments – et des peintures DuLux en particulier – vers les applications pour l'habitat. Ce phénomène de *chalking* concentre rapidement l'attention du département de Chimie, ainsi que l'exprime Bolton début 1934 :

L'impossibilité pour les pigments au titane de prévenir la décomposition excessive ou le « *chalking* » des surfaces lors de leur utilisation dans la durée représente un frein important des pigments au titane dans le secteur des peintures domestiques.⁴⁵

La recherche « fondamentale » est également mobilisée sur le *chalking*. Signe que la vision des substances portée par le groupe des colloïdes s'est assez largement diffusée au sein de la compagnie, les chimistes du département *Fabrics & Finishes* espèrent que l'intensité de

⁴² Cf. ci-dessus et Standeven, *development of decorative gloss paints*, *op. cit.* p. 58

⁴³ C.F. RASSWEILER, « New products and problems in construction painting », *JIEC*, vol. 27 (1935), pp. 1294-1297

⁴⁴ *Ibid.* p. 1297

⁴⁵ Bolton, Rapport de 1933 au Comité Exécutif, 5 janvier 1934, CRD 16/Annual reports 1930-1935

la décomposition est corrélée à la taille des particules de pigment. Dès 1928 Nichols préconisait que les études « *particle-size* » permises par l'ultracentrifugeuse viennent en aide aux études empiriques de la tenue des pigments sur les panneaux d'exposition, dirigées par Patterson ; c'est-à-dire de réduire le nombre de tests sur panneaux en aidant à l'interprétation des résultats⁴⁶. Cette perspective ouverte par Nichols s'est matérialisée quelques années plus tard. Courant 1936 en effet, le laboratoire de ce département a demandé à Kraemer d'étudier la corrélation entre taille de particule et *chalking* dans certains vernis pigmentés au titane, dans l'espoir de trouver une solution simple au problème de l'effritement des peintures⁴⁷. Les tests d'exposition sont alors systématiquement interprétés en fonction de la taille des particules, et les minerais d'ilménite issus de l'Inde et du Canada sont également discriminés en fonction de la taille de particule de pigments qu'ils engendrent. Ces tests sur panneaux d'exposition montrent que les formulations composées uniquement d'oxyde de titane ont un *chalking* incontrôlable, trop élevé. Les formulations « mixtes », composées d'un peu de baryum ou de magnésium résistent mieux au *chalking* et à la poussière⁴⁸.

Signe également que le groupe des colloïdes s'est gardé de réduire l'ensemble des phénomènes à une relation taille de particules-propriétés, Kraemer est dubitatif vis-à-vis des présupposés des chimistes qui ont commandé cette étude : « Honnêtement », écrit-il à John Marshall du département *Fabrics & Finishes*, « nous considérons l'hypothèse que la taille de particule puisse être le facteur déterminant [du *chalking*] avec scepticisme »⁴⁹. Avec raison semble-t-il, car l'état de surface des particules de titane s'est avéré plus déterminant que leur taille pour ce phénomène : une petite quantité d'agents pour neutraliser les acides, comme l'antimoine ou le baryum, adsorbés à la surface des pigments, est introduite dans la formulation des peintures au titane et permet de réduire leur tendance au *chalking*. D'autres substances comme les alumino-silicates composent également les pigments au titane pour réduire leur décoloration et leur tendance à jaunir à l'usage⁵⁰. Parvenant progressivement à mettre au point un produit de qualité pour l'habitat, la consommation des peintures DuLux connaît une forte croissance au cours des années 1930 : la production par Du Pont passe de 1 millions de gallons en 1933 à 6 millions en 1936⁵¹ (environ 1500 à 9000 tonnes), ce qui représente près de dix fois les quantités de vernis industriels vendus aux fabricants automobiles en 1926. En 1941, les débouchés du DuLux se sont en plus largement ouverts aux produits de grande consommation : 75% des réfrigérateurs et 35% des machines à laver sont revêtus des enduits DuLux commercialisés par Du Pont⁵². Les économistes et historiens de l'économie ont longuement étudié l'impact de la Grande Dépression sur la demande

⁴⁶ Cf. chapitre précédent, Nichols à Tanberg, 28 novembre 1928, JBN 6/UC 1938-1939

⁴⁷ Lettre, Kraemer à John Marshall (*Fabrics & Finishes Department*), « Non-Chalking TiO₂ », 5 novembre 1936; et letter, Kraemer à H.T. Hucks, « Non-chalking titanium oxide », 3 décembre 1936, GDP 11/Pigments general 1935-1938

⁴⁸ J.H. Peterson, « White titanate pigments and fundamental study of chalking », Experimental station weekly report, 5 novembre 1937, GDP 11/Pigments general 1935-1938

⁴⁹ Kraemer à John Marshall, *op. cit.*

⁵⁰ Bolton, Rapport annuel de 1940 du département de Chimie au Comité Exécutif, 9 janvier 1941, CRD 16/Annual reports 1936-1941

⁵¹ STANDEVEN, *development of decorative gloss paints*, *op. cit.* p. 58

⁵² Zintl, *History of the Paint department*, *op. cit.*, cite par H&S p. 638 fn. 43

intérieure américaine et les habitudes de ses consommateurs. La forte déflation qui caractérise la crise économique a augmenté significativement le pouvoir d'achat des Américains qui ont pu conserver leur emploi. Mais en considérant la période de l'entre-deux guerres dans sa globalité, la crise n'a constitué qu'un interlude dans la tendance plus longue des ménages américains à accorder une proportion croissante de leurs revenus aux biens d'équipements et à leur maison. Entre 1932 et 1953, la proportion des ménages équipés par exemple d'un réfrigérateur passe de 12 à 82%, et d'une machine à laver de 27 à 70%⁵³.

⁵³ BERNSTEIN, *The Great Depression, op. cit.*, chapitre 6, « The effective demand problem of the interwar period. II: cyclical and secular changes in final demand »

Figure 8.1 — Publicités pour le Dulux parues dans le magazine Life du 15 novembre 1937 (à gauche) et du 10 mai 1937 (à droite)

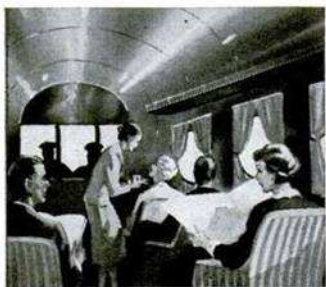
DU PONT PAINTS
for
EVERY PURPOSE
in Home and Industry



Night and day, month in, month out, the **Dulux** finish on transport planes keeps these ships sleek and smart as they flash from coast to coast.



Aground or aloft, gleaming **Dulux** fights the attacks of fair weather and foul. The fine appearance pleases passengers . . . and its economy delights line officials.



Inside and outside, **Dulux** has proved its right to be called the finest aircraft finish—for beauty, for durability, for lower maintenance costs.



Paints..Varnishes
Enamels..Lacquers
DUCO-DULUX
REG. U. S. PAT. OFF. REG. U. S. PAT. OFF.

DU PONT PAINTS
for
EVERY PURPOSE
in Home and Industry

She's glad it's
DULUX
on her refrigerator



Proud Owner who is glad she asked for **Dulux** finish on her refrigerator. She's one of three million.



Time Slides By... Days, months, years . . . **Dulux** still gleams with new-snow-in-the-sun whiteness.



Household Accidents fail to dim its beauty, because **Dulux** is so tough . . . and so easily cleaned.



Paints..Varnishes
Enamels..Lacquers
DUCO-DULUX
REG. U. S. PAT. OFF. REG. U. S. PAT. OFF.

Noter la catégorisation des applications : « in Home and Industry » (« à la maison et dans l'industrie»). Noter aussi que la publicité pour les applications domestiques s'adresse à des femmes (« She's glad it's Dulux on her refrigerator », « Elle est heureuse que Dulux recouvre son réfrigérateur »). Le genre a structuré l'histoire du marketing de masse, comme le résume McGovern (*Sold American, op. cit.*, p. 36) : « Il serait impossible de comprendre l'histoire de la consommation de masse sans admettre que le fait que des hommes s'adressent à des femmes est essentiel »

Les pigments rutile, commercialisés à partir de 1941, ont un meilleur pouvoir couvrant et une meilleure résistance au *chalking* que les pigments anatase. Ils sont ainsi rapidement substitués à l'anatase dans les peintures domestiques au titane et en particulier dans la gamme Dulux. Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, le service marketing de Krebs a choisi de nommer ces pigments sous l'appellation commerciale « *Ti-Pure R* ». Ces pigments contiennent cependant quelques pourcents d'alumino-silicates pour limiter la décoloration et le jaunissement des peintures. Ces « impuretés » d'alumino-silicates sont ainsi délibérément ajoutées dans la formulation du pigment pour répondre à un cahier des charges technique et esthétique ; elles ont une fonction, et leur présence ne résulte en aucune manière d'une faille dans le processus de « purification » des minerais d'ilménite. Plus généralement, certaines formulations de la gamme *Ti-Pure* contiennent d'autres ajouts, en plus des alumino-silicates, comme de l'antimoine ou de l'oxyde de zinc. Encore une fois, ces ajouts sont délibérés et permettent à la formulation de remplir certaines fonctionnalités orientées sur des usages spécifiques. En dépit de leur appellation commerciale *Ti-Pure*, donc, ces pigments ne sont pas « purs » de titane. Ce qui est mélangé dans le processus du développement scientifique et technique est nié dans l'étiquette, dans le symbole, dans la représentation de masse. Ici encore, recherche et marketing sont décorrélés. La représentation du produit nie sa composition, ne reflète pas son histoire, c'est-à-dire les prouesses d'inventivité et de mélange qui ont concouru à sa mise au point.

Cet exemple de la commercialisation des pigments rutile témoigne des limites des mouvements de consommateurs dans l'entre-deux guerres, et du CR en particulier, alors qu'ils se sont employés à redéfinir les pratiques de consommation et publicitaires. « Le CR a milité pour que la signification des biens soit limitée à leurs ingrédients, prix et fonctions. Pour les publicitaires, les biens forment et informent la perception que les consommateurs ont d'eux-mêmes », résume McGovern sur les conflits qui ont opposé ces mouvements de consommateurs aux stratégies publicitaires dans ces tentatives de redéfinition⁵⁴. Le CR a porté une autre vision de la consommation que celle qui est en train de s'épanouir dans l'Amérique de l'entre-deux guerres, et qui contribue à diviser la société en classes et tribus. Pour le CR, un produit est ce qu'il contient et ce qu'il permet de faire, ni plus ni moins. La signification des objets est réduite à leur dimension technique, utilitaire. Cette réduction au technique est supposée limiter la puissance de la publicité dans les orientations de la consommation, redonner une souveraineté aux citoyens américains dans leurs habitudes de consommation. Dans cette redéfinition, les sciences et les techniques ne sont plus seulement le moteur de la mise au point des produits, mais l'arbitre entre des intérêts perçus comme divergents, le moyen par lequel cette souveraineté du consommateur est conquise. Mais les capacités scientifiques et techniques colossales de Du Pont, mobilisées pour mettre au point les nouveaux pigments au titane, ne s'est pas toujours accompagnée d'une meilleure transparence sur les produits. Les stratèges marketing de Du Pont ont estimé, sans doute à raison, que les « consommateurs » préfèrent être leurrés et acheter des pigments « purs », que lucides et bien informés sur la composition des pigments qu'ils manipulent.

⁵⁴ MCGOVERN, *Sold American*, op. cit. p. 194

Pourquoi « pur » ? La dichotomie pur/impur comme vision du monde et des objets, a souvent généré les plus grandes attractions et répulsions. Dans le cas des pigments au titane, cette appellation fait sens dans la tradition de l'industrie des peintures et vernis, qui s'est construite au tournant du siècle sur la dichotomie pigment mixte/pigment pur comme exposé au chapitre 5. Ambitionnant de se substituer au blanc de plomb, le blanc de titane s'inscrit dans cette tradition, et témoigne de l'inertie de cette dichotomie. L'historien Christian Warren s'est demandé pourquoi les États-Unis ont mis tant de temps à interdire les peintures au plomb, responsables d'une importante morbidité, en particulier parmi les enfants, *via* le saturnisme. L'histoire américaine de la régulation des pathologies liées au plomb ne peut pas se réduire à la confrontation entre des enjeux sanitaires et l'avidité des grandes compagnies du plomb. On ne peut pas comprendre cette histoire en supposant que la main-mise du grand capital sur les institutions politiques et médicales en constitue son ressort principal. « L'échec de l'Amérique à développer une opposition efficace au plomb, contrairement à d'autres nations, suggère que la responsabilité est plus profonde », prévient Warren. Cette responsabilité [« *blame* »] est à explorer

dans les racines mêmes de la société américaine : dans les structures sociales et les réalités démographiques qui ont entravé la main-d'œuvre américaine et ont contraint sa vision et son pouvoir potentiel ; dans l'idéologie du travail libre qui a asservi le peintre à ses traditions et interdit son association avec ses pairs ; dans le système de classes relativement fluide et le système politique démocratique qui a sapé le pouvoir des élites à imposer une législation paternaliste ; et dans une bourgeonnante et vigoureuse culture des consommateurs qui exigeait plus – mieux, plus vite, et tout de suite – et achetait ce que les plus importants publicitaires vendaient.⁵⁵

Dans la perspective de la transition du blanc de plomb au blanc de titane qui s'amorce dans les années 1930⁵⁶, il est remarquable que les acteurs étudiés ici, et qui ont permis cette transition, ne mettent à aucun moment en avant les enjeux sanitaires des pigments. Le titane est présenté comme *techniquement* ou *esthétiquement* supérieur au plomb, et jamais comme une alternative aux pathologies liées au plomb, qui sont pourtant déjà largement détectées. Le blanc de plomb « pur » est synonyme de qualité, d'authenticité et ne devient qu'à partir des années 1970 l'objet d'un véritable enjeu sanitaire. La dichotomie pigment mixte/pigment pur a été artificiellement perpétuée par National Lead et Du Pont. National Lead commercialise sa gamme de pigments au titane sous l'appellation générique « *Titanox* », tandis que Du Pont utilise l'appellation « *Ti-Pure* ». En pratique, cependant, les pigments de Du Pont sont aussi

⁵⁵ Christian WARREN, « Toxic purity : the progressive era origins of America's lead paint poisoning epidemic », *The Business History Review*, vol. 73 (1999), pp. 705-736, citation pp. 734-5

⁵⁶ En 1935, selon le *Biennial Census of Paint Manufacturers*, la consommation intérieure de blanc de plomb est de 53 000 tonnes, celle de lithopone de 146 000 tonnes (cité par C.K. Sloan, mémorandum à Patterson, « Annual consumption of dry colors and pigments », 8 février 1938, GDP 11/Pigments general 1935-1938) ; La même année la production de pigment au titane est de 53 000 tonnes (*Barksdale, op. cit.* p. 374), la consommation intérieure est alors un peu moins élevée que celle de blanc de plomb, les États-Unis étant déjà largement exportateurs de pigments au titane (cf. chapitre précédent). Dès 1939 cependant, la production de blanc de titane a rejoint celle du blanc de plomb, et les exportations des pigments au titane sont deux fois supérieures à celles des pigments au plomb (HAYNES, *American chemical industry, op. cit.* Appendixes II & IV, p. 420 & 460)

composites que ceux de National Lead, au moins pour certains d'entre eux⁵⁷. La commercialisation du blanc de titane s'est moulée dans ces stéréotypes, ce qui a permis sa diffusion au sein de cette « culture bourgeonnante et vigoureuse des consommateurs ».

Colorimétrie et pigments colorés

Mais le blanc, qu'il soit de plomb ou de titane, ne représente qu'une fraction de la consommation des pigments et des peintures. Un monde uniformément blanc serait bien triste. Les goûts et les couleurs ne se discutent pas, et les consommateurs américains personnalisent leur(s) maison(s) en les protégeant et les décorant avec une multitude de couleurs, parfois vives, jaunes-orangées⁵⁸. Les « jaunes de chrome » [« *chrome yellows* »], pigment composés de chromate de plomb, sont les favoris des Américains pour obtenir ces teintes vives. Le célèbre écrivain britannique Aldous Huxley (1894-1963) a intitulé son premier roman *Crome Yellow* ; il paraît en 1921 et constitue, prélude à la maturité d'Huxley, une satire des modes et des mœurs de son temps. En choisissant ce titre, Huxley a fait preuve d'une anticipation remarquable, car à partir de la fin des années 1920 les usages du jaune de chrome se multiplient et la demande pour ces pigments augmente fortement. Comme le résume E.R. Allen, le chimiste responsable de la recherche sur les couleurs à Krebs, dans une synthèse de 20 ans de recherche sur les couleurs dans ce département de Du Pont :

En 1929, une étude plus vigoureuse et exhaustive est lancée afin de réviser et de moderniser l'ensemble des jaunes de chrome et leur formulation. La demande augmentait à taux surprenant de la part des consommateurs [« *consuming trade* »], pour les nombreuses modifications des propriétés visant aux différents usages des consommateurs.⁵⁹

Dans cette synthèse rédigée dans l'après-guerre, Allen rappelle que très rapidement après son rachat par Du Pont en 1929, Krebs collabore intensément avec le département *Fabrics & Finishes* de Du Pont, à la fois dans les programmes de recherche et en lui fournissant les pigments colorés incorporés dans les vernis que ce département commercialise. Significativement, la *joint-venture* formée avec CPC⁶⁰ en 1931 pour développer les pigments au titane change le nom de la compagnie Krebs : de *Krebs Pigment & Chemical Company*, la nouvelle joint-venture issue de l'achat de CPC s'intitule *Krebs Pigment & Color Corporation*. Les enduits et vernis de finition commercialisés par le département *Fabrics & Finishes* comprennent également des gammes jaunes, orangées et vertes, dont les pigments sont fabriqués par Krebs à Newark (New-Jersey). Ces vernis colorés – dont certaines gammes du Dulux – se diffusent rapidement dans les produits de grande consommation, comme les réfrigérateurs. En 1961, le magazine *True Story*, dont le lectorat

⁵⁷ BARKSDALE, *Titanium*, op. cit., pp. 367-373: « Types of pigments and trade names »

⁵⁸ Carolyn M. GOLDSTEIN, *Do it yourself. Home improvement in twentieth century America*, New York (NY), Princeton Architectural Press, 1998

⁵⁹ E.R. Allen « Twenty years of research on color at Newark, 1928-1948 », p. 55, 17 mai 1949, GDP 1/History files-papers and addresses 1931-1949 (« Demands were increasing at a surprising rate from the consuming trade for numerous modifications in properties for the different consumer usages »)

⁶⁰ *Commercial Pigments Corporation*, voir le chapitre précédent

est principalement composé de femmes de la classe ouvrière, raconte l'histoire d'un jeune homme qui demande en mariage sa fiancée en lui promettant un réfrigérateur jaune. L'historienne Shelley Nickles, qui rapporte cette anecdote dans une étude plus large sur la recomposition des classes et des comportements de consommation dans l'Amérique de l'après-guerre, note que le jaune a alors une signification particulière dans la culture américaine, et pour ce segment des consommateurs, incarnant « le style branché et une meilleure vie »⁶¹. Culturellement, une des dimensions symboliques du jaune est effectivement celle de la prospérité et de la richesse. En particulier si la teinte est vive et chaude, cette couleur s'oppose au gris de la vie quotidienne, et a souvent été mise en scène dans les publicités⁶². Dans cette perspective, l'historien Michel Pastoureau note qu'en ce qui concerne la couleur « tous les problèmes, qu'ils soient chimiques ou techniques, idéologiques ou symboliques, artistiques ou oniriques, se posent toujours tous à la fois, jamais isolément »⁶³.

Ainsi, les Américains consomment massivement du jaune de chrome, sans doute le pigment coloré le plus abondamment utilisé avant son interdiction progressive à partir des années 1970, car il contient du plomb. Dès 1935 en effet, selon le *Biennial Census of Paint Manufacturers*, la consommation intérieure des jaunes et oranges de chrome atteint 18 000 tonnes, ce qui représente la moitié de l'ensemble des pigments colorés⁶⁴. En outre, cette consommation de 18 000 tonnes de jaune de chrome représente, à ce moment, environ un tiers de la consommation de blanc de zinc. Reflétant cette domination du jaune-orange de chrome dans les pigments colorés, les dépenses de recherche à Krebs se concentrent sur ces pigments : sur les 1,6 millions de dollars dépensés entre 1928 et 1948 pour la recherche sur les pigments colorés inorganiques, environ 37% leur sont dédiés⁶⁵.

Deux problèmes en particulier focalisent l'attention de ces recherches : « Dans ce domaine intensément compétitif, la teinte [*strength*] et la résistance à la décoloration [*lightfastness*] sont les deux propriétés les plus importantes »⁶⁶. Les chimistes de la Station, et la recherche « fondamentale » en particulier, vont être mis à contribution sur ces problèmes, dont les dépenses sont au demeurant modestes comparativement aux sommes totales engagées par Newark sur ces pigments. Puisqu'il est connu que la profondeur de teinte des pigments au chrome, leur variation entre le jaune et l'orange, est largement déterminé par la taille des particules de chromate de plomb précipitées, le groupe des colloïdes est chargé de l'optimisation des teintes en fonction des tailles de particule. Entre 1934 et 1936 deux projets « fondamentaux » mais financés par Krebs occupent le groupe de Kraemer sur le jaune de chrome : « analyse des pigments colorés par ultracentrifugeuse », et « Préparation de petites particules de chromate de plomb » (cf. annexe E). Déterminées par ultracentrifugeuse, les tailles de particules de pigments s'étalent entre 35 « millimicrons » (« *Victoria Pure Blue* ») et

⁶¹ (« *up-to-date style and a better life* ») Shelley LICKLES, « More is better : mass consumption, gender, and class identity in postwar America », *American Quarterly*, vol. 54 (2002), pp. 581-622, citation p. 606

⁶² Michel PASTOUREAU, entrée « Jaune » du *Dictionnaire des couleurs de notre temps. Symbolique et société*, Paris, Bonneton, 1992, pp. 105-6

⁶³ *Ibid.*, p. 11

⁶⁴ Cité par C.K. Sloan, *Annual consumption*, *op. cit.*

⁶⁵ Allen, *Twenty years of research*, *op. cit.* p. 9 (dollars courants)

⁶⁶ *Ibid.* p. 57

1080 millimicrons (« *Orange yellow* »), et la taille des pigments jaunes au chrome s'étale entre 132 et 490 millimicrons⁶⁷.

À l'instar de l'ambition qui anime ce groupe sur les pigments blancs et de la méthodologie mise en œuvre quelques années plus tôt, Kraemer cherche à contrôler finement, quantitativement, la relation entre teinte et taille de particule, et à adapter les procédés de production en fonction de la profondeur de teinte voulue. « La question est, à présent », résume Kraemer à Nichols en septembre 1935, « jusqu'où la relation entre teinte et taille de particule peut être extrapolée dans la gamme des tailles les plus petites, et de combien la teinte peut être améliorée en réduisant la taille de particule ? »⁶⁸. Quels que soient les résultats obtenus par le groupe des colloïdes, selon Allen, ces résultats sont restés pour Krebs assez marginaux : « En 1936, les tentatives visant à utiliser les résultats de la Station relatifs aux jaunes d'une teinte supérieure grâce à de très petites tailles de particules, n'ont pas engendré de résultats pratiques »⁶⁹.

Mais un autre programme « fondamental » de la Station, la colorimétrie, s'est cependant révélé plus nécessaire aux activités de Krebs. Ces recherches colorimétriques visent à standardiser les couleurs et à instrumentaliser leur détermination, ce qui est compris par les chimistes de Krebs comme de la Station comme une « objectivation » des propriétés optiques des pigments colorés. Lorsqu'Allen envoie sa synthèse à Patterson en 1949, avec lequel il a longuement collaboré, celui-ci lui explique que le spectrophotomètre, un instrument développé par la Station, « est enfin [« *at long last* »] une partie intégrale de la standardisation à Newark »⁷⁰. En 1948 donc, alors qu'Allen dresse le bilan de 20 ans de recherche sur les couleurs à Newark et que l'instrument s'est largement substitué à l'homme pour statuer et définir les couleurs et la profondeur des teintes chez Du Pont, l'adoption d'unités photométriques vient de se normaliser au niveau international⁷¹. Cette normalisation est l'aboutissement d'un demi-siècle de recherches et de coopérations entre les laboratoires et les organismes de normalisation, principalement anglo-saxons à travers le *National Bureau of Standards* américain et le *National Physical Laboratory* britannique. Le Comité International de l'Eclairage (CIE) est institué à Paris, siège du Bureau International des Poids et des Mesures, en 1913. Les recherches et normes colorimétriques continueront par la suite à se fédérer sous l'appellation CIE, mais le centre de gravité de ces recherches bascule dans l'entre-deux guerres vers le monde anglo-saxon.

Comprendre la vision, la perception des couleurs, modéliser le fonctionnement de la rétine, pour substituer des grandeurs physiques, instrumentalement mesurables, à la physiologie visuelle. Dupliquer et remplacer l'œil et l'esprit qui captent et interprètent les

⁶⁷ Kraemer, Quarterly Progress Report Colloid Group, 1^{er} avril au 30 juin 1934, JBN 4/Quarterly progress report colloid group

⁶⁸ Mémoire, Kraemer à Nichols, « Fine particle size lead chromate », 30 septembre 1935, GDP 11/Pigments general 1935-1936

⁶⁹ Allen, *Twenty years of research*, op. cit. p. 57

⁷⁰ Lettre, Allen à Patterson, 26 juillet 1949, GDP 1/History files papers and addresses

⁷¹ Rexmond C. COCHRANE, *Measures for progress. A history of the National Bureau of Standards*, Washington (D.C.), U.S. Department of Commerce, 1966, p. 337

stimuli visuels : telle est l'ambition qui anime certains physiciens et opticiens américains et britanniques dans l'entre-deux guerres et qui débouche sur la norme internationale CIE en 1948. Psychologie de la perception, philosophie, épistémologie, et physique se condensent, en particulier dans la figure du psychologue-physicien de Harvard, Leonard T. Troland (1889-1932). Entre 1910 et 1915, il étudie la physique théorique et l'optique au MIT, en même temps que la philosophie et l'épistémologie à Harvard, notamment avec le grand Bertrand Russel⁷². Sa thèse de doctorat à Harvard, qu'il termine en 1915, tente de relier mathématiquement la formation des images dans les épreuves photographiques avec la surface rayonnante, sa longueur d'onde, la durée et l'intensité de l'exposition. De 1916 à sa mort en 1932, il enseigne la psychologie à Harvard. Mais ces recherches sont loin de se restreindre à la « tour d'ivoire » académique, puisqu'en 1925 il devient directeur de la recherche à *Technicolor Inc.*, la compagnie à l'origine des premières images animées en couleur. Troland a également joué un rôle clé dans l'histoire de la norme CIE : il est nommé en 1920 secrétaire du comité de colorimétrie nouvellement institué par la Société américaine d'optique (*American Optical Society*). En 1922 ce comité émet un rapport préconisant notamment de réduire la complexité de la perception des couleurs à l'excitation issue de trois couleurs (rouge-vert-bleu), connues depuis comme les couleurs « primaires ». En 1931, le CIE se réunit à Londres et définit un « observateur standard », ou un « œil normal » pour statuer sur les couleurs, en se fondant sur le rapport du comité de colorimétrie de la Société américaine d'optique⁷³.

Quelques années plus tard, à partir de 1934, le groupe de physique de Patterson tente d'adapter les résultats issus de cette réunion du CIE aux problèmes qui se posent dans les départements industriels de Du Pont sur la détermination des couleurs. Au chapitre 4, nous avons retracé la mise en place de ce groupe de physique, et le rôle clé joué par Kenney dans ce groupe, notamment en circulant entre le MIT et Du Pont et en s'assurant le service de consultants universitaires comme Herman Pfund. Kenney fait jouer ses réseaux au MIT et parmi les physiciens universitaires pour assurer le développement d'un « spectrophotomètre » adapté aux besoins de Du Pont, et de Krebs en particulier, en collaborant avec Pfund et Arthur C. Hardy, du laboratoire de mesure des couleurs du MIT. Comme il le présente dans le projet « fondamental » sur la « mesure de la couleurs des pigments » :

La colorimétrie est fondée non sur la mesure des sensations de couleur mais sur la mesure des stimuli équivalents. L'équivalence des différents stimuli physiques a été définie et convenablement exprimée par le Système de Coordonnées et de l'Observateur Standard CIE. Nous manquons toujours, cependant, de l'expression quantitative des tolérances. De combien et de quelle façon peuvent varier ces stimuli de manière à ce que cette variation soit significative ? Cette information n'est pas disponible. Elle est nécessaire pour la plupart des applications quantitatives de mesure de couleur. [...] La réflexion [dans ce

⁷² J.G. BEEBE-CENTER, « Leonard Thompson Troland : 1189-1932 », *The American Journal of Psychology*, vol. 44 (1932), pp. 817-820

⁷³ William D. WRIGHT, « Golden jubilee of colour in the CIE—The historical and experimental background to the 1931 CIE system of colorimetry », in János Schanda (ed.), *Colorimetry: understanding the CIE system*, New York (NY), Wiley Interscience Publishers, 2007, pp. 9-24

projet] est placée sur les informations essentielles pour la tolérance, en déterminant les spécifications tri-stimuli [rouge, vert, bleu] pour un certain nombre d'échantillons obtenus des différents laboratoires [de Du Pont], et en corrélant ces données avec le jugement visuel pratique de ces laboratoires. Les spécifications tri-stimuli peuvent être obtenues soit grâce au spectrophotomètre du professeur Hardy, soit à partir du nouveau colorimètre expérimental du professeur Pfund.⁷⁴

Mais la dissémination du spectrophotomètre suppose des modifications assez profondes des pratiques ayant cours dans les laboratoires et les usines de Du Pont pour le contrôle et le travail sur les couleurs. En donnant plus de poids à l'instrument plutôt qu'au jugement du chimiste ou de l'employé, il est clair que le spectrophotomètre remet en cause certaines prérogatives et compétences détenues par une frange du personnel, patiemment développées au cours d'une longue pratique. La substitution du spectrophotomètre à l'« observateur expérimenté » pour statuer sur la qualité d'une couleur est défendue par Kenney à travers deux arguments : 1) l'adéquation de la couleur des produits commercialisés par Du Pont à des standards de qualité (« *matching* ») occupe un temps de travail grandissant dans les laboratoires ; l'automatisation de la procédure de vérification permettrait de gagner un temps considérable. 2) La détermination « objective » des couleurs est vouée, ultimement, à dépasser en fiabilité et en sensibilité le jugement visuel de l'« *expert color matcher* »⁷⁵. Kenney s'attache ainsi à déterminer les spectres d'absorption de nombreux vernis Dulux et Duco, et à montrer que leur comparaison avec des échantillons de couleur standard est statistiquement plus fiable que les comparaisons établies par les « experts » en poste dans les usines et laboratoires de Du Pont.

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent sur les pigments au titane, la profondeur de teinte des pigments blancs est déjà quantifiée, graduée sur une échelle de un à dix ; elle l'est aussi probablement pour les pigments colorés. La dépendance de la détermination des couleurs vis-à-vis des sens physiologiques de l'observateur n'implique pas nécessairement l'absence de quantification de ces grandeurs. Les couleurs sont déjà mesurées sur une échelle. Kenney, en militant pour la diffusion du spectrophotomètre, remet en cause ce mode de mesure et les critères de qualité qu'ils portent : « Evidemment, on ne peut attacher que peu de signification à l'affirmation, fondée sur une seule observation, qu'un échantillon est légèrement plus clair qu'un autre. Un autre observateur pourrait affirmer que cet échantillon est une bonne correspondance [« *a good match* »] ou dire qu'ils diffèrent en propreté »⁷⁶. Cette redéfinition des critères de détermination des couleurs, avec le bouleversement des pratiques qu'il suppose, n'a pas manqué de générer suspicion et rejet parmi les chimistes dont le travail routinier se fonde sur ces critères. Kenney indique que la diffusion du spectrophotomètre parmi les laboratoires de Du Pont a été freinée principalement pour deux raisons : « un manque de confiance dans la fiabilité des mesures physiques par rapport au

⁷⁴ Kenney, « Color measurement of pigments », Major Experimental Project # 1787, 13 août 1935, GDP 7/Project outlines 1935-1937

⁷⁵ Mémoire, Kenney à Patterson, « Summary of color tests on finishes », 19 octobre 1936, GDP 12/Chronological files 1930-1936; Mémoire, Kenney à Patterson, « Study of color formulation », GDP 12/Chronological files 1936-1939

⁷⁶ Kenney à Patterson, 19 octobre 1936, *op. cit.*, souligné par Kenney

jugement visuel, et [parce que] le point-de-vue, de l'aveu général, est celui du physicien plutôt que de l'«*expert color matcher*»⁷⁷.

En interagissant avec les clients de Du Pont sur les peintures et vernis colorés, Kenney a trouvé un allié pour propager cette évolution vers la colorimétrie dans les laboratoires de Du Pont. Un schéma humoristique issu du groupe de physique montre celui-ci en prise avec un client et manipulant le spectrophotomètre pour répondre à ses besoins (fig. 8.2). De même que les photographies par rayons X des cartons ondulés ont exercé un « effet psychologique favorable » sur les consommateurs, la présentation de données « objectives » sur les couleurs des échantillons a certainement pu séduire certains acheteurs. « Il nous semble possible de spécifier une couleur physiquement, à travers une tolérance physique définie avec une précision telle qu'elle peut être statistiquement satisfaisante au client », écrit Kenney à Patterson pour présenter les avantages de la colorimétrie⁷⁸.

⁷⁷ Kenney à Patterson, 9 décembre 1936, *op. cit.*

⁷⁸ Kenney à Patterson, 19 octobre 1936, *op. cit.*

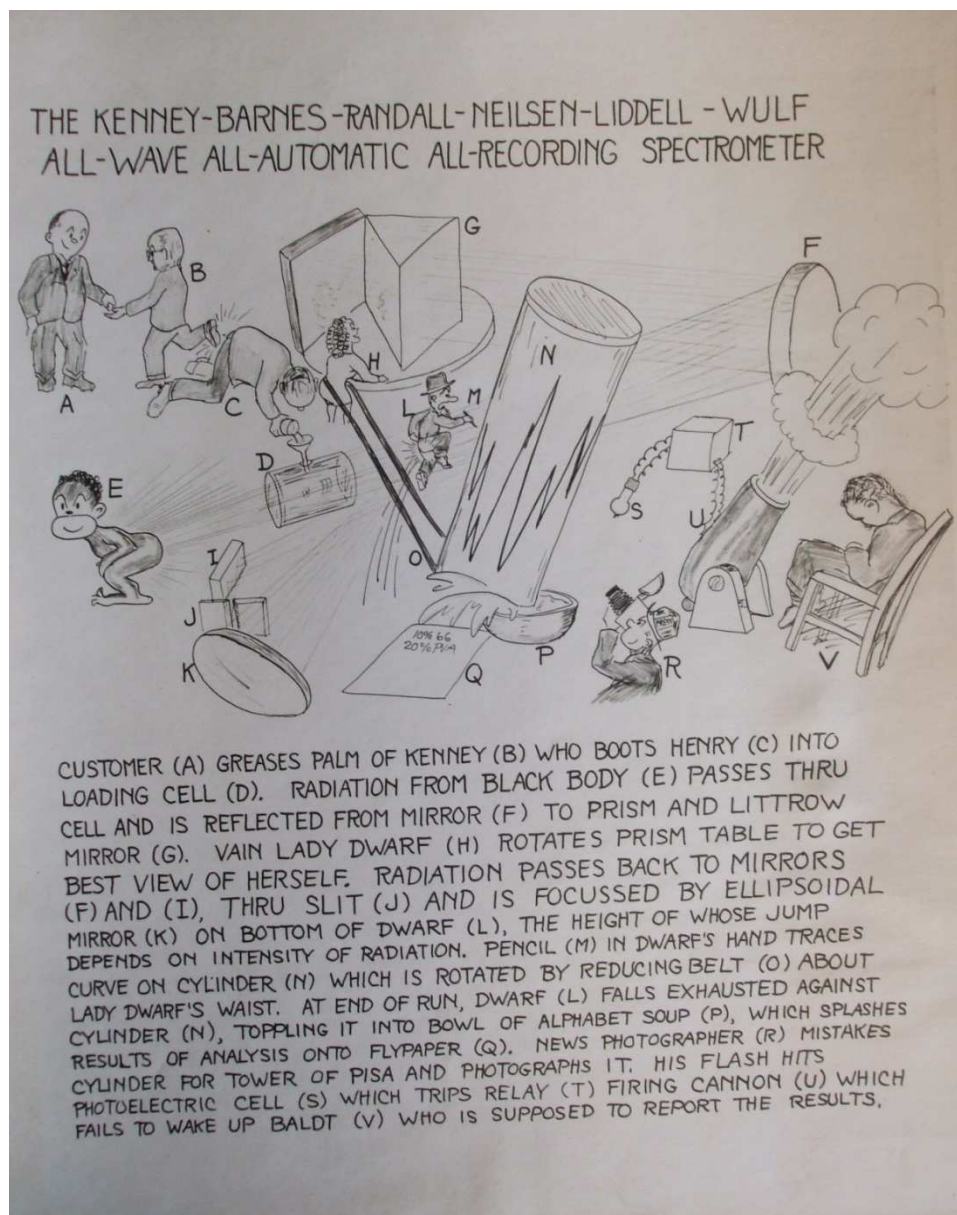


Figure 8.2 — « The Kenney- etc. all-wave all-automatic all-recording spectrometer », non-daté
Avec l'aimable autorisation du Hagley Museum and Library. En début de chaîne: « The customer greases the palm of Kenney »: « Le client graisse la main de Kenney ». Le jeu de mot douteux sur le « corps noir » (*black body*) témoigne de la réalité de Du Pont : une firme, jusqu'à assez récemment, quasi-uniformément blanche et masculine. Cet aspect n'est pas abordé dans cette thèse, mais les divisions raciales de la société américaine se révèlent avec plus d'acuité encore chez Du Pont, comme l'a analysé plus en détail Pap N'diaye

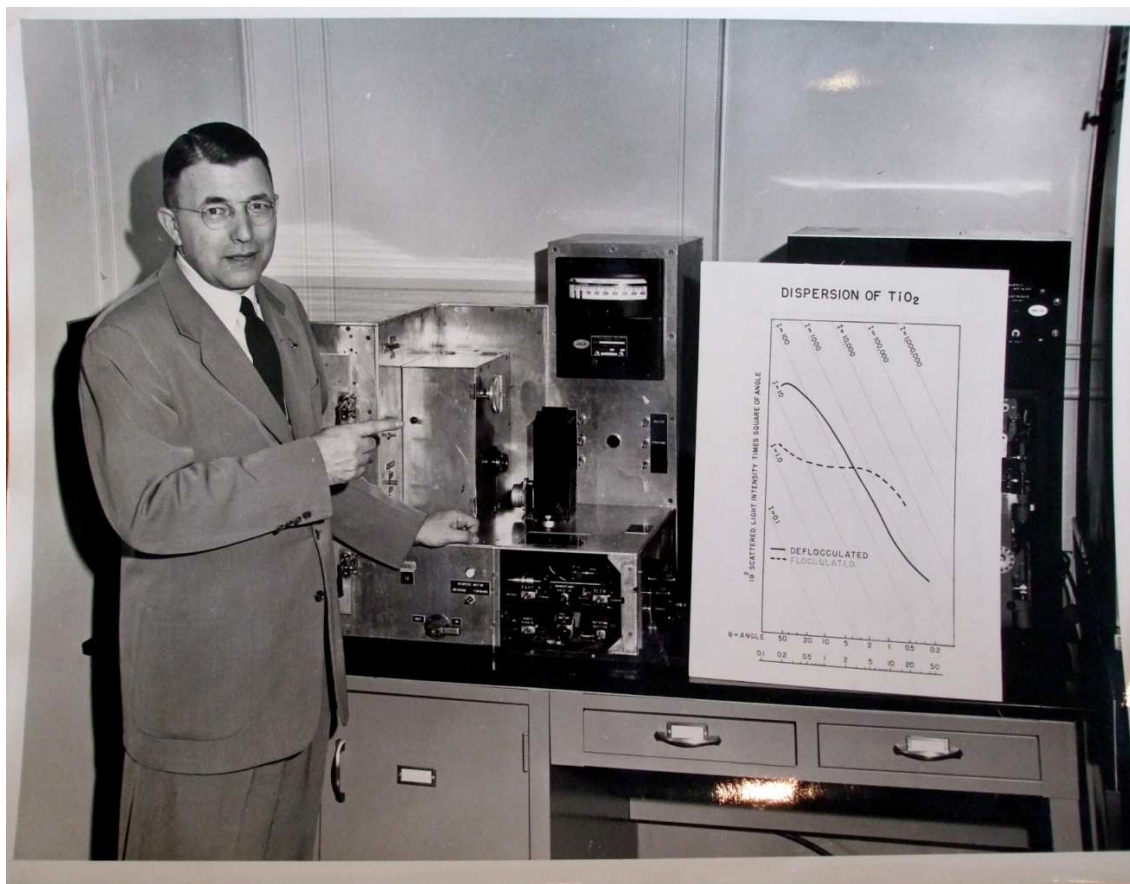


Figure 8.3 — Arthur Webster Kenney posant devant l'appareil de mesure de dispersion des pigments, non-daté
Avec l'aimable autorisation du Hagley Museum and Library

CONCLUSION

En février 1966, un jeune homme né dans un petit village de descendants d'esclaves de la Jamaïque, Robert Nesta Marley, part rejoindre sa mère qui a émigré quelques années plus tôt aux États-Unis, dans le Delaware, pour des raisons économiques. Apprenti-musicien, le jeune Marley a déjà des refrains plein la tête et des accords de *ska* et de *reggae*, en gestation à la Jamaïque, plein les doigts ; aux États-Unis, il espère gagner suffisamment d'argent pour enregistrer ses compositions. Arrivé à Wilmington, il travaille brièvement dans une usine automobile, à l'hôtel Du Pont, et dans les laboratoires de Du Pont comme assistant¹. Bob Marley (1945-1981), et la firme chimique qui l'a employé, constituent deux icônes caractéristiques du XX^e siècle, mais néanmoins antithétiques à bien des égards. Dans son titre *Survival* (1979) en particulier, Marley lâche un couplet ravageur contre tout ce que Du Pont incarne, la science, le progrès technique². Des paroles qui résonnent avec plus d'acuité encore quand on sait que l'apport de Du Pont a été décisif au succès du projet Manhattan, puis à l'essor de l'industrie électro-nucléaire américaine dans l'après-guerre³.

Selon son biographe Tim White, le monde de Bob Marley « était un monde dans lequel l'opinion, la mémoire, l'interprétation et la croyance étaient souvent tenues en plus haute estime que le simple fait »⁴. Mais cet univers dans lequel évoluait la star Jamaïcaine, qui valorise la mémoire, l'opinion et les croyances, n'est peut-être pas complètement en opposition avec le « monde » de l'industrie des peintures ou de Du Pont. Il ne faut pas pousser trop loin la conflation Du Pont/science, en opposition à la conflation Marley/croyance. Après tout, Edwin Ladd, le chimiste du Dakota du Nord à l'origine des premières lois sur l'étiquetage des peintures de 1905, a conçu son action comme une défense de la « pureté » des peintures, visant à prévenir la présence d'« adultérants » – tout ingrédient autre que l'huile de lin, la terpentine, et les pigments au plomb ou au zinc – dans les formulations. C'est le même chimiste qui met en place les premiers panneaux d'exposition « scientifiques » pour tester la durabilité des peintures en conditions réelles d'utilisation, c'est-à-dire à l'extérieur. Les résultats de ces panneaux d'exposition conduisent les chimistes à reconsidérer l'adhésion culturelle à la notion de pureté en tant que premier critère de qualité, partagée par tous les acteurs des peintures, fabricants comme peintres et utilisateurs, comme une « doctrine fallacieuse », selon l'expression d'un chimiste d'une grande compagnie de pigments au plomb.

Un autre « fait scientifique » qui a mis du temps à émerger et être reconnu comme tel est celui des pathologies générées par l'ingestion de plomb, en particulier le saturnisme.

¹ Timothy WHITE, *Catch a fire: the life of Bob Marley*, New York (NY), Holt Paperbacks, 2006, p. 207

² « *In this age of technological inhumanity/ Scientific atrocity (survivors)/ Atomic mis-philosophy (Black survival)/ Nuclear mis-energy (survivors)/ It's a world that forces lifelong insecurity (Black survival)* »

³ Pap NDIAYE, *Du nylon et des bombes. Du Pont de Nemours, le marché et l'état américain, 1900-1970*, Paris, Belin, 2001

⁴ WHITE, *Catch a fire*, *op. cit.*, p. xii

Comme l'a montré Christian Warren, des intérêts économiques mais également des facteurs culturels freinent la diffusion et la prise en compte des constats, parfois alarmants, des études épidémiologiques et toxicologiques. « En 1910, l'Amérique était une nation de *white-leaders* »⁵, résume cet historien pour exprimer le rapport des Américains vis-à-vis du plomb, qui reste longtemps synonyme de qualité, plus longtemps qu'en Europe. Cette adhésion culturelle au plomb alimente la « doctrine de la pureté ». Lorsque le blanc de titane s'est progressivement substitué au blanc de plomb, Du Pont et les autres grandes compagnies ont repris la dichotomie pigments mixtes/pigments purs pour commercialiser les nouveaux pigments au titane, sachant pertinemment qu'aucun de leurs pigments n'était chimiquement « pur », voire même que la différence entre les pigments mixtes et purs étaient dans certaines formulations minime. Mais le blanc de titane prend progressivement la place du plomb comme synonyme de qualité. Il y a quelques années encore, avant que la controverse sur la toxicité des nanoparticules n'émerge, le blanc de titane était largement considéré comme chimiquement inerte, et donc physiologiquement inoffensif. Récemment cependant, en avril 2006, le Centre International de Recherches sur le Cancer a classé l'oxyde de titane dans la catégorie 2B des agents pathogènes, c'est-à-dire « potentiellement carcinogène pour l'homme »⁶. Que l'oxyde de titane soit inoffensif, est-ce un fait ou une croyance ?

Aussi, si l'industrie des peintures et vernis s'est dans un premier temps opposée aux lois sur l'étiquetage au début du siècle, c'est-à-dire s'est montrée assez réticente à afficher la composition de ses produits, ce n'est pas par crainte de devoir mentionner la présence de plomb. Ce serait même plutôt l'inverse : ces lois s'opposent aux pratiques de commercialisation de peintures « pures » – de plomb ou de zinc – qui sont en réalité « adultérées », pratiques dès lors considérées comme frauduleuses. Ces lois catalysent l'organisation de l'industrie, qui éprouve un intérêt accru vis-à-vis de la science et de la recherche : la « Section Scientifique » de l'association américaine des fabricants de peintures est instaurée dans la foulée de la promulgation de ces lois. Cette section coordonne les études sur panneaux d'exposition, met en place un laboratoire aligné sur les intérêts de l'ensemble du secteur industriel, et fournit la plupart des chimistes qui iront travailler à la section « peintures et vernis » du Bureau des Normes. On peut ainsi penser que ces lois perturbent le tissu socio-économique assurant la production et la diffusion des peintures et vernis en profondeur, au-delà de la simple répression des fraudes. Le secret de la formulation des produits et des procédés pour les produire, ainsi que le contrôle sur la transmission de ces savoirs, sont en effet déterminants pour assurer la compétitivité économique des exploitations. À titre d'anecdote historique, on peut mentionner l'exemple du bleu de Prusse, inventé par le pharmacien Johan Konrad Dippel au début du XVIII^e siècle. Refusant de livrer son secret de fabrication, il garde le monopole de sa commercialisation et amasse une fortune considérable.

⁵ *White-lead* est l'expression anglaise pour blanc de plomb; Christian WARREN, « Toxic purity : the Progressive Era's origins of America's lead paint poisoning epidemic », *The Business History Review*, vol. 73 (1999), pp. 705-736

⁶ IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Carbon Black, Titanium Dioxide and Non-Asbestiform Talc. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, Vol. 93. Lyon : International Agency for Research on Cancer. (2006)

Mais en 1724 un chimiste parvient à percer son secret et publie la composition de la nouvelle couleur, ce qui entraîne la ruine de Dippel⁷.

Il apparaît donc que les chimistes ont depuis longtemps été en prise avec cette industrie, ils ont pénétré et interagi en profondeur avec les matériaux de la couleur et des revêtements de finition depuis des siècles. Les savoirs des chimistes s'inscrivent, lorsqu'ils décrivent ces matériaux, « entre le laboratoire et le marché » au moins depuis le début de l'ère moderne (XV^e-XVI^e siècles)⁸. Pourquoi, alors, la période 1900-1930 semble-t-elle particulièrement saillante aux yeux de ces chimistes, au point d'avoir été décrite comme une transition « d'un art à une science » en ce qui concerne cette industrie ? Il est vrai que la chimie – ou la science ? – des peintures et vernis des années 1930 n'est plus celle qui prévalait au XIX^e siècle, et les acteurs contemporains de cette période ont bien conscience de ce saut qualitatif dans la science des peintures. En soi, cependant, ce saut est insuffisant pour comprendre l'entrain et l'admiration de ces chimistes pour cette période ; les nouveaux rôles et attentes socio-économiques auxquels sont confrontés les chimistes et dans lesquels ces évolutions scientifiques s'inscrivent permettent sans doute de mieux saisir la *success-story* que ceux-ci récitent au cours de cette période.

L'Amérique du tournant du siècle est une société, selon l'expression de l'historien Robert Wiebe, « en quête d'ordre »⁹ : son industrialisation à marche rapide et le nouveau pouvoir des « trusts » industriels ou financiers s'accompagnent de la désintégration des « îlots communautaires » (*island communities*) qui ont structuré la vie politique jusque là, au profit de vastes territoires urbanisés. Ces bouleversements menacent la société américaine d'atonie ou de chaos ; le gouvernement fédéral se dote d'une emprise accrue sur la société, et tente de juguler les effets de l'industrialisation. L'expertise scientifique « désintéressée » est un des instruments des réformes progressistes qui sont entreprises pour s'adapter à ce nouvel ordre industriel. Un nouveau rôle social émerge pour le chimiste, ou tout au moins occupe une place grandissante : le chimiste n'est plus seulement l'acteur de la découverte ou de l'amélioration d'une formulation ou d'un procédé. Il devient également l'agent du bien commun, il peut représenter et défendre les intérêts du « consommateur », une nouvelle catégorie politique et économique. Ce sont des chimistes qui sont à l'origine du *Pure Food and Drugs Act* de 1906, ainsi que des lois sur l'étiquetage des peintures. Ces nouvelles législations portées par les chimistes sont caractéristiques de ce que les historiens ont appelé « l'ère Progressiste » (« *The Progressive era* »), du nom d'un ensemble de réformes mises en œuvre pendant les mandats des présidents Theodore Roosevelt (1901-1909), William Taft (1909-1913), et Woodrow Wilson (1913-1921).

Ainsi, la « scientification » de l'industrie des peintures et vernis se déploie initialement au sein de l'ère Progressiste ; les bouleversements scientifiques et techniques qui

⁷ Michel PASTOUREAU, *Bleu. Histoire d'une couleur*, Paris, Seuil, 2000, pp. 132-134

⁸ Ursula KLEIN, E.C. Spary (eds.), *Materials and expertise in early modern Europe. Between market and laboratory*, Chicago (IL), University of Chicago Press, 2010, voir en particulier la contribution de Agustí NIETO-GALAN, « Between craft routines and academic rules: natural dyestuffs and the “art” of dyeing in the eighteenth century », pp. 321-354

⁹ Robert H. WIEBE, *The search for order, 1877-1920 The making of America*, Londres, Mac Millan, 1967

accompagnent l'évolution de l'industrie des peintures et vernis portent la marque de cette ère. Pénétrant plus en profondeur ce milieu industriel alors que les consommateurs, ou leurs représentants auto-désignés, réclament d'avantage de régulations, les chimistes y importent leurs techniques d'analyse, s'appliquant à déterminer la composition des produits qu'ils contrôlent ou qu'ils cherchent à améliorer. Mais l'ère Progressiste, cependant, attend davantage de ces chimistes ; elle exige des critères et des méthodes pour statuer sur l'efficacité et la durabilité des formulations – en bref sur leur qualité. Les lois sur l'étiquetage inclinent les chimistes diplômés des universités et leurs employeurs industriels ou gouvernementaux à étudier le lien entre composition et qualité avec plus de « scientificité ». La route empirique tracée pour répondre à ces questionnements – la mise en place de panneaux d'exposition à grande échelle – montre rapidement que le lien entre composition et qualité est flou, équivoque. Mais il a fallu un certain temps pour admettre que les techniques d'analyse chimique du XIX^e siècle sont insuffisantes pour statuer sur la qualité d'un produit, alors qu'il devient difficile de nier que certains pigments ou formulations « adultérés » se révèlent en pratique, à grands renforts de panneaux scientifiques, plus résistants que bien des pigments « purs ». Les chimistes tournent leur attention sur d'autres propriétés de ces substances, qu'ils appellent, par opposition, les propriétés « physiques » : viscosité, perméabilité, temps de séchage... D'autres tests sont élaborés pour appréhender ces propriétés, ci-possible quantitativement. Les propriétés optiques des pigments et des peintures deviennent également considérées comme des propriétés physiques ; à la notion ancienne de « force » d'un pigment s'ajoute celle d'opacité, et les compétences des chimistes s'élargissent pour redéfinir et quantifier ces notions. La qualité d'un produit, qui parle aux consommateurs, se redéfinit sur la base des propriétés physiques des substances, qui parlent aux chimistes.

L'utilisation plus systématique du microscope reflète la prégnance d'une approche originale pour répondre théoriquement à ces questionnements. La route théorique pour envisager le lien entre composition – ou formulation – et qualité s'aligne sur l'étude des microstructures. Elle permet de faire face plus sereinement à un constat qui s'avère incompréhensible dans le cadre de la chimie du XIX^e siècle : comment expliquer que deux formulations de composition identiques ou similaires puissent présenter des propriétés physiques si différentes ? Armés de leur microscope, ces chimistes avancent que les peintures « pures » ne sont pas nécessairement les plus résistantes, leur préparation à partir de pigments les plus fins et uniformes – selon ces chimistes, c'est un gage de qualité largement répandu même si infondé scientifiquement – ne donne pas les meilleurs résultats. Les manuels de chimie des peintures portent la marque de cet infléchissement vers les microstructures ; à la description des méthodes d'analyse des peintures et des pigments ceux-ci présentent, dans une proportion croissante, des photomicrographies de pigments ainsi que la façon de les interpréter.

Ainsi, ces chimistes ne s'intéressent plus exclusivement aux propriétés chimiques des peintures et vernis, c'est-à-dire à leur réactivité, leur combinaison avec d'autres substances, ce qui peut sembler paradoxal. Ou peut-être que les significations de « chimique » et

« physique » évoluent à grande vitesse au tournant du siècle. Au cœur de ces bouleversements s'inscrit la chimie colloïdale, qui se propose précisément d'étudier les propriétés physiques des substances visqueuses comme les peintures et vernis. Au début du siècle, les chimistes des peintures et vernis ont pris la chimie colloïdale comme cadre théorique à ces nouvelles recherches, qui s'alignent sur les propriétés physiques. La chimie colloïdale se révèle en effet très pertinente à leur entreprise de définition et de quantification de ces propriétés, en particulier les propriétés optiques. « On peut approcher le domaine de la chimie colloïdale de deux côtés différents », écrit Hermann Staudinger en 1950. « La position usuelle de la question jusqu'ici partait du point de vue physique. On traitait des capacités physiques des systèmes colloïdaux, lesquels, évidemment, présentent des particularités qu'on ne rencontre ni dans le domaine "macroscopique" ni dans le domaine moléculaire. Ainsi on présentait le maximum de propriétés différentes des corps, par exemple le pouvoir couvrant d'un pigment minéral, de même que l'optimum d'une catalyse hétérogène se produit pour une dispersion du catalyseur à l'état colloïdal »¹⁰. L'autre « côté » de l'approche des colloïdes, selon Staudinger, est l'approche, par opposition, chimique : sa théorie macromoléculaire fait des colloïdes des substances chimiques comme les autres, capables d'être représentées par des molécules et dont le comportement et les propriétés peuvent être expliqués par ces entités.

Au début du siècle cependant, il est clair que le concept de molécule est inapproprié pour les chimistes qui travaillent sur les pigments minéraux. La chimie colloïdale en revanche, qui traite des petites particules, leur semble plus séduisante ; elle offre une approche théorique et expérimentale plus pertinente que la chimie organique pour comprendre le lien entre microstructures et pouvoir couvrant, ainsi que les autres propriétés physiques. Ce n'est pas un hasard si, dans l'entre-deux guerres, l'explicitation de ce lien constitue l'objectif principal d'un groupe de recherche industriel qui s'identifie avant tout à la chimie colloïdale, plutôt qu'à la chimie des peintures et vernis. À la fin des années 1920, seul Du Pont a les capacités financières suffisantes et les ressources scientifiques, instrumentales et industrielles pour envisager sérieusement d'établir ce lien, sur des bases théoriques et expérimentales robustes. La transition vers les pigments au titane assure un débouché immédiat à ces recherches en cas de succès, qui visent à transformer une théorie – l'interaction de la lumière avec des petites particules – en un outil prédictif pour orienter le développement des pigments. Autour du groupe des colloïdes de Du Pont se nouent, sans doute de la manière alors la plus aboutie, quantification des microstructures et quantification des propriétés. Les tests de pouvoir couvrant développés conjointement entre ce groupe et les usines de production de pigments de Du Pont sont encore en vigueur au sein de l'ASTM, c'est-à-dire qu'ils ont acquis un statut référentiel dans l'industrie. C'est également le groupe des colloïdes de Du Pont qui est à l'origine d'une méthodologie de quantification des microstructures des matériaux polymères, et de tests de propriétés des fibres textiles développés conjointement avec le département des fibres textiles de Du Pont. Le fait que ce groupe est à l'origine de tests et de méthodes de quantification des microstructures sur des matériaux apparemment

¹⁰ Hermann STAUDINGER, *Organische Kolloidchemie*, Braunschweig, Vieweg & Sohn, 3^{ème} édition 1950 [traduction française par Henri Gibello, *Chimie des colloïdes organiques*, Paris, Dunod, 1953, p. 337]

aussi éloignés que les peintures et les fibres textiles témoigne du caractère transversal de la chimie colloïdale, et du rapport alors théorique que ces industries ont entretenu vis-à-vis de celle-ci. L'intérêt accru des chimistes et de l'industrie chimique pour les propriétés physiques des substances est particulièrement visible chez Du Pont, qui met en place, en même temps que le groupe des colloïdes, un groupe dédié à la physique et à l'instrumentation de pointe. Le recouvrement entre « physique » et « colloïdal » est clair alors que le groupe de physique finit par absorber le groupe des colloïdes.

Tout au long des années 1930, ces deux groupes ont milité conjointement pour une « objectivation » de la mesure des propriétés des substances, signifiant par là l'affranchissement de la dépendance au jugement de l'observateur, ou de l'agent effectuant la mesure, et la détermination de ces propriétés sur des critères absolus. Le groupe des colloïdes en particulier a conçu son action comme une rationalisation et une objectivation des performances des fibres textiles et des peintures et vernis. Souhaitant infléchir les pratiques industrielles de détermination de la qualité et des propriétés des substances vers plus d'objectivité, ces groupes de recherche « fondamentaux » ont cherché à substituer le plus possible l'instrument aux sens physiologiques pour mesurer ces propriétés et statuer sur la qualité des produits. Pour parvenir à leurs fins, ces acteurs ont mobilisé une dichotomie homme/machine, ou subjectif/objectif ; Kenney en particulier conçoit son action comme une lente mais inexorable substitution de « la détermination physique » au « jugement visuel », intrinsèquement plus fiable. Dans les détails de cette substitution cependant, faits, interprétation des faits, mémoires et opinions se mêlent plus que s'opposent pour parvenir à cette objectivation. Le physicien et l'expert en adéquation des couleurs et en pouvoir couvrant travaillent de concert pour élaborer des tests fiables, fondés sur des instruments dont la manipulation laisse le moins de place possible à l'interprétation. Le philosophe Michel Serres propose une philosophie du corps comme substrat essentiel à toute connaissance, concevant l'instrument comme échappatoire des connaissances qui saturent le corps et l'esprit, un « réceptacle de comportements objectivés » :

La connaissance croît avec la science, certes, mais jusqu'aux rendements décroissants, où, plus nous savons, moins nous connaissons. Or donc, nous inventâmes la parade à cette décroissance : par périodes, nous déchargeons cette masse dans des choses ; nous la perdons ; nous vidons nos schémas corporels dans des appareillages qui deviennent, dès lors, des économies de gestes, de postures et de mouvements, des réceptacles de comportements objectivés.¹¹

La longue pratique de visualisation des substances, les postures et la façon de manipuler les instruments, le jugement des observateurs concourent à l'objectivation recherchée. La diffusion des nouveaux appareils pour mesurer la force de teinture, le pouvoir couvrant et la couleur des formulations a certes généré des réticences au sein des usines. Comme un responsable de la recherche sur les couleurs chez Du Pont le résume au responsable du groupe de physique : « le fait [que ces appareils] représentent un nouveau mode de pensée [*a new*

¹¹ Michel SERRES, *Variations sur le corps*, Paris, Le Pommier, 1999, p. 112

type of thinking] a entraîné des résistances »¹². Mais ces appareils permettent des économies de gestes et de mouvements ; ils ne s'opposent pas à la longue maturation du jugement et au travail d'acclimatation quasi-corporel pour saisir la qualité d'une substance. Plutôt que d'interpréter cette tendance à l'instrumentalisation des mesures comme une substitution aux sens corporels, il est peut-être plus adéquat d'y voir une objectivation de ces sens, qui ne se construit pas par opposition, mais dans le prolongement de ceux-ci. Dans le cas de la genèse du test d'opacité des peintures, la substitution de l'œil par l'instrument suppose d'abord la multiplication des observateurs et des postures (cf. annexe H). Ceci peut sembler paradoxal, mais l'histoire de l'établissement du « fait scientifique » et de la « civilité de la preuve » a toujours été traversée par une telle tension entre objectivité et subjectivité, et a souvent multiplié les observateurs humains pour arriver à produire des faits objectifs¹³.

Comme tout travail de recherche, la finalisation de cette thèse relève d'une part d'arbitraire. Nous envisageons à présent un ensemble de pistes, d'hypothèses et d'interprétations pouvant guider des recherches futures s'inscrivant dans la continuité de cette thèse. Nous proposons de revenir sur cette question de l'objectivité dans l'entre-deux guerres, de poursuivre chronologiquement l'histoire de la chimie colloïdale dans l'après Seconde Guerre mondiale, et notamment de la mettre en perspective avec le récent mouvement des nanosciences et nanotechnologies, avec lequel la chimie colloïdale présente des similarités frappantes.

Ouverture 1 : recherche fondamentale, marketing et consommateurs : une même « culture de l'objectivité » ?

Selon les historiens Lorraine Daston et Peter Galison, le savoir objectif – au sens contemporain du terme de proposition ou savoir indépendants de son émetteur – s'est imposé comme critère majeur de scientificité à partir du milieu du XIX^e siècle¹⁴. Au cours des deux derniers siècles l'objectivité elle-même a été de plus en plus assimilée à la production et la manipulation de chiffres pour décrire le monde et agir, c'est-à-dire à la quantification comme épistémologie et mode de gouvernement des choses et des hommes¹⁵. Les groupes des colloïdes et de physique, ainsi que les autres équipes de recherche de Du Pont avec lesquels ceux-ci ont plus ou moins intensément collaboré, peuvent dans cette perspective être considérés comme l'incarnation d'une « culture de l'objectivité », selon l'expression de Theodore Porter. Mais cette culture de l'objectivité semble dépasser les milieux scientifiques et techniques, et en vient à caractériser également, comme nous l'avons vu, les mouvements de consommateurs qui y voient un rempart contre les fausses promesses publicitaires, et d'une manière générale contre le pouvoir des grandes compagnies.

¹² Lettre, E.R. Allen à G.D. Patterson, 26 juillet 1949, GDP 1/History files paper and addresses

¹³ Dominique PESTRE, « Pour une histoire sociale et culturelle des sciences. Nouvelles définitions, nouveaux objets, nouvelles pratiques », *Annales HSS*, mai-juin 1995, n°3, pp. 487-522, en particulier pp. 507-510

¹⁴ Lorraine DASTON et Peter GALISON, *Objectivity*, New York (NY), Zone Books, 2007

¹⁵ Theodore M. PORTER, *Trust in numbers. The pursuit of objectivity in science and public life*, Princeton (NJ), Princeton University Press, 1995 ; Alain DESROSIÈRES, *La politique des grands nombres. Histoire de la raison statistique*, Paris, La Découverte, 1993

Cet aspect a été à peine ébauché dans cette thèse, mais suffisamment pour admettre que les impératifs endogènes à la mise en œuvre industrielle des produits de masse sont insuffisants pour comprendre et expliquer la diffusion de cette culture de l'objectivité au sein de Du Pont. Après tout, selon le responsable de la recherche sur les couleurs à Krebs, le laboratoire de physique de la Station « n'a rien produit d'exceptionnel [pour le développement des couleurs à Krebs], bien que des techniques aient été développées qui se révèlent utiles »¹⁶. Ainsi, les déterminants et les ressorts de cette culture de l'objectivité dans l'entreprise semblent constituer un terrain de recherche et une problématique particulièrement féconds. En particulier, au niveau de Du Pont, on peut envisager d'analyser en détail l'articulation du département ou des services marketing avec le département de chimie. Il est significatif que l'ancien directeur de la recherche au sein de la compagnie, Charles Stine, participe en personne à l'inauguration des musées et des expositions des produits de Du Pont destinées au grand public au cours des années 1930¹⁷. En outre, dès les années 1920, les services marketing choisissent de positionner la figure du chimiste-chercheur au cœur des messages publicitaires. L'exemple de la mobilisation des résultats des panneaux d'exposition – à prétention objective – pour la commercialisation et la publicisation des peintures suggère que ce fil peut être exploré plus en détail. Il se pourrait que cette culture de l'objectivité caractérise la société entière, les consommateurs ou citoyens ayant appris à – ou été « éduqués » à – exiger des chiffres avant d'adhérer à toute proposition ou message, même s'ils se révèlent parfois trompés par ces chiffres¹⁸.

Ouverture 2 : De la justification de la science – l'érosion de la « science » des colloïdes comme un changement de « régime » scientifique et technique

Dans l'historiographie comme dans les récits des chimistes contemporains, la science des colloïdes a connu son heure de gloire il y a un peu moins d'un siècle, et occupe depuis une position modeste dans le paysage des sciences physiques et biologiques. Son histoire est celle d'une succession de phases d'émergence au XIX^e siècle, d'essor dans le premier tiers du XX^e, puis de déclin dans l'après-guerre, reflétant une moindre fécondité et visibilité scientifiques. « Les années triomphantes sont probablement 1925/1926, quand Zsigmondy, Svedberg et Perrin indépendamment, puis Langmuir en 1932, ont reçu un prix Nobel dans cette discipline », écrit une grande figure de la chimie colloïdale en 2004 pour les vingt-cinq ans de l'Association Internationale des Scientifiques des Colloïdes et Interfaces¹⁹. Peut-être qu'en considérant ainsi l'étude des colloïdes en tant que discipline scientifique, on est incliné à cette lecture émergence-maturité-déclin de son histoire. Mais les sciences et les techniques peuvent

¹⁶ E.R. Allen, « Twenty years of research on color at Newark, 1928-1948 », 17 mai 1949, GDP 1/History files-papers and addresses 1931-1949, p. 23

¹⁷ David J. RHEES, « Publicité institutionnelle, relations publiques et expositions. Le cas de Du Pont », in Brigitte SCHROEDER-GUDEHUS (ed.), *La société industrielle et ses musées. Demande sociale et choix politiques 1890-1990*, Paris, Archives Contemporaines, 1992, pp. 191-210

¹⁸ Charles SEIFE, *Proofiness : the dark arts of mathematical deception*, Viking Books, 2010

¹⁹ Egon MATJEVIC, « The silver anniversary of the international association of colloid and interface scientists (IACIS): how did it start! », *Colloids and Surfaces A*, vol. 250 (2004), p. 13

se déployer autrement que par des « disciplines » reconnues ; les activités des chercheurs, ingénieurs et techniciens s'inscrivent souvent hors des matrices disciplinaires structurant le territoire des sciences « dures ». Récemment, l'historien et sociologue Terry Shinn a proposé un modèle d'organisation sociale et intellectuelle de la production et de la diffusion des sciences, dans lequel quatre « régimes » coexistent de manière interdépendante : les régimes disciplinaire, utilitaire, transitaire, et transversal²⁰. Ce modèle déclinant quatre régimes permet de mieux saisir la complexité sociale des sciences que la traditionnelle dichotomie science pure (ou « fondamentale ») / science appliquée, sur laquelle est fondée le modèle linéaire. On ne peut pas analyser et encore moins comprendre les activités de l'ensemble des professionnels se considérant comme « scientifiques » en essayant de les réduire ou bien à la production de nouvelles connaissances sur la nature, ou bien à l'« application » de ces connaissances à l'amélioration de produits, appareils ou procédés. Entre ces deux cas-limites, il existe une foule d'activités scientifiques qui ne sont orientées ni sur la connaissance *per se*, ni sur un produit ou procédé déterminé, ou une application circonscrite ; les régimes transitaire et transversal permettent de rendre compte de ces activités hors des cadres disciplinaires ou utilitaires. Ces régimes sont interdépendants, c'est-à-dire que leur évolution est aussi déterminée par les échanges et circulations qu'ils parviennent à instaurer entre eux – ou non.

Dans cette perspective, il peut être intéressant de considérer l'histoire des savoirs sur les colloïdes, et leur mise en œuvre en tant que matériaux stratégiques, non comme celle d'une discipline scientifique, mais comme un ensemble de pratiques scientifiques et techniques se déployant à travers des formes de division du travail scientifique, technique, instrumental, métrologique... circonscrites, identifiables à des « régimes » distincts. Après tout, certains chimistes industriels ont commencé à appréhender sérieusement les gommes, les caoutchoucs, les colles... comme « colloïdaux » bien avant la phase de disciplinarisation de la chimie colloïdale dans l'entre-deux guerres. Cette lecture conduit à considérer l'histoire des colloïdes dans l'après-guerre non comme un déclin, mais comme un basculement de régime, une distribution de l'étude des colloïdes fluctuant entre les différents régimes de production et de diffusion des sciences. L'après-guerre viendrait consacrer l'échec des chimistes qui se sont auparavant définis sur l'étude des colloïdes à installer de manière pérenne un régime disciplinaire ; les autres « régimes », moins visibles et prestigieux, ont absorbé la totalité des pratiques associées. C'est une hypothèse de recherche, non un résultat validé.

Au cours des « années triomphantes » de la chimie colloïdale, ce domaine a entretenu un rapport théorique, « fondamental » vis-à-vis des matériaux qu'il s'est proposé d'étudier. Ce qui est bon pour la chimie colloïdale est bon pour la compréhension des peintures, des caoutchoucs, des médicaments... ; et ce qui est bon pour la compréhension de ces matériaux est bon pour leur mise en œuvre industrielle, pour les « applications ». En 1927, la section

²⁰ Terry SHINN & Pacal RAGOUET, *Controverses sur la science. Pour une sociologie transversaliste de l'activité scientifique*, Paris, Raisons d'agir, 2005 ; Terry SHINN, « New sources of radical innovation : research-technologies, transversality and distributed learning in a post-industrial order », *Social Science Information*, vol. 44 (2005), pp. 731-764 ; –, « The transverse science and technology culture : dynamics and roles of research-technology », *Ibid.*, vol. 41 (2002), pp. 207-251

« peintures et vernis » de la Société américaine de chimie organise un colloque sur « l'application de la chimie colloïdale aux peintures ». Les acteurs ayant milité pour la disciplinarisation de la chimie colloïdale ont essayé d'instaurer un petit espace où cette discipline *constitue sa propre justification*. Wilder D. Bancroft, à peu au moment où il met en place un enseignement en chimie colloïdale *undergraduate* (c'est-à-dire au niveau de la licence) à l'université de Cornell, et tandis qu'il accorde plus de place à ce domaine dans son *Journal of Physical Chemistry*, écrit que « le développement de la chimie colloïdale pure et appliquée sera accéléré, et l'empreinte produite sera plus grande si les articles de cette veine [chimie colloïdale] sont publiés ensemble »²¹. Bien que ces acteurs, pour parvenir à instaurer ce petit espace, aient vanté les applications de ce domaine, paradoxalement ces applications n'en constituent pas sa finalité, mais un résultat dérivé. Cependant, étant donné que ni Bancroft ni John Mathews, de l'université du Wisconsin, ne sont parvenus à réaliser l'« Institut de Chimie Colloïdale » qu'ils ont essayé de mettre sur pied, on peut se demander si la chimie colloïdale s'est effectivement incarnée dans un « régime disciplinaire » dans l'entre-deux guerres.

Quoi qu'il en soit, nous avons défendu dans cette thèse que la recherche « fondamentale » sur les colloïdes chez Du Pont, entre 1927 et 1938, peut difficilement être perçue comme l'hébergement d'un programme disciplinaire académique dans un milieu industriel. Le chimiste des colloïdes Victor Cofman, qui a un temps fait parti du groupe « fondamental » sur les colloïdes, a bien saisi la nuance entre « science pure » et « recherche fondamentale » que les managers de la recherches de Du Pont perçoivent dans l'entre-deux guerres : « Le point important en ce qui concerne la recherche fondamentale appliquée [*sic*] est de poser clairement le problème de telle manière à ce qu'une fois résolu, il soit applicable au sujet en question » (cf. chapitre 4). Dans cette conception, un programme fondamental débouchant sur un succès scientifique *doit* (et non *peut*) s'inscrire également dans un tissu plus large de succès techniques, industriels et économiques. « Recherche fondamentale » signifie une recherche considérée comme à la pointe des développements scientifiques, mais dont les impacts industriels et économiques sont d'emblée garantis en cas de succès. Nuance que capture l'expression utilisée par Sabine Clarke dans son étude sur la signification de cette expression dans l'entre-deux guerres au Royaume-Uni : « *Pure science with a practical aim* », qui est un bel oxymoron²². Cette nuance est peut-être parmi les facteurs qui ont poussé Elmer Kraemer à quitter la compagnie en 1938, pour rejoindre non pas un institut ou groupe s'affichant « colloïdes », mais la « Fondation de recherche en biochimie », ce qui donne une idée de la visibilité déclinante de la chimie colloïdale à la veille de la Seconde Guerre mondiale. Ceci dit, il est indéniable que la chimie colloïdale dans l'entre-deux guerres, et en particulier au sein du groupe des colloïdes de Du Pont, manifeste un rapport théorique, transversal aux matériaux et aux substances.

²¹ Cité par John W. SERVOS, *Physical Chemistry from Ostwald to Pauling. The making of a science in America*, Princeton, Princeton University Press, 1990, p. 311

²² Sabine CLARKE, « Pure science with a practical aim. The meaning of fundamental research in Britain, circa 1916-1950 », *Isis*, vol. 101 (2010), pp. 285-311

Par contraste, quelques décennies plus tard, les praticiens des colloïdes auront une toute autre vision de la chimie colloïdale, sa nature et sa finalité. Le chimiste britannique Eric Rideal, un des derniers « résistants » militant pour l'autonomie disciplinaire de la chimie colloïdale dans l'après-guerre, fait ce constat au début des années 1960 : « L'usage répandu, de nos jours, des dispersants et des détergents pour les systèmes aqueux amène la plupart des chimistes, ingénieurs, biologistes et médecins à penser que de tels produits et leurs applications sont l'intérêt principal et la justification du champ de la chimie des surfaces ; et aussi que le domaine de la science représenté par la chimie des surfaces est distinct et séparé de celui de la chimie colloïdale »²³. La disparition des départements et des laboratoires définis sur la chimie colloïdale « fondamentale » ou « pure » dans l'après-guerre, qui reflète la désintégration du régime disciplinaire associé, ne signifie pas que les colloïdes ne sont plus étudiés, ou ne sont plus l'objet d'intenses intérêts techniques et industriels. Bien que le territoire des substances « colloïdales » se soit largement réduit, en se coupant des matériaux polymères, une frange importante des substances et matériaux est toujours appréhendée comme telle. Elle draine de nombreux professionnels de la science, mais avec d'autres ambitions que ceux qu'elle attirait dans l'entre-deux guerres.

Eric K. Rideal (1890-1974) est un des principaux architectes de la « science » des colloïdes au Royaume-Uni. Il obtient une chaire de « physique colloïdale » à la prestigieuse université de Cambridge en 1930, et y institue le *Colloid Science Laboratory* trois ans plus tard. En 1943, il parvient à transformer son laboratoire en un département autonome de l'université, le *Department of Colloid Science*. En 1946, alors que le département de chimie de Cambridge est relogé dans un bâtiment neuf, Rideal refuse d'y transférer son département, par crainte d'y perdre son indépendance institutionnelle et disciplinaire. Restant dans des locaux désuets, son département périclite, et il en vient à regretter ses velléités d'autonomie pour la science des colloïdes. Avec une poignée d'étudiants et un collègue, il quitte Cambridge peu après pour la *Royal Institution* de Londres, entraînant la fin du département de science des colloïdes de Cambridge²⁴. Par la suite, à partir de 1955, Rideal anime le groupe d'activité des surfaces de la Société de Chimie Industrielle de Londres, et c'est à travers ce groupe qu'il se rend compte que les professionnels en prise avec la chimie colloïdale²⁵ ont un rapport massivement utilitaire vis-à-vis de celle-ci. Sans doute nostalgique de son prestige dans l'entre-deux guerres, il s'oppose à cette vision utilitariste des colloïdes, et écrit à un responsable de l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée (IUPAC en acronyme anglais) dans ce sens. Ainsi continue-t-il son plaidoyer :

Ce champ de connaissance [chimie colloïdale et des surfaces] est issu des efforts de scientifiques créatifs tels que Laplace, Kelvin, Graham, Gibbs, Freundlich, Devaux ; Langmuir, Hardy, Harkins, Frumkin, McBain, Hartley and deBoer. Leurs recherches,

²³ E.K. Rideal, « Proposal for action by IUPAC », in lettre à G.M. Schwab, 11 avril 1961, CHF, IUPAC records, VIII.F.1

²⁴ D.D. ELEY, « Eric Keightley Rideal. 11 avril 1890 — 25septembre 1974 », *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, vol. 22 (1976), pp. 381-413

²⁵ La chimie des surfaces a également acquis une certaine autonomie vis-à-vis de la chimie colloïdale, mais en pratique les deux domaines sont souvent mis dans le même sac.

ainsi que celles de bien d'autres, étaient entreprises principalement pour la poursuite de la connaissance et non en tant qu'efforts subordonnés à des programmes de science appliquée ou cherchant à développer des produits. [...] Ces notions [les produits et les applications constituent la justification de la chimie colloïdale] sont factuellement et historiquement des distorsions. Afin de rectifier ces méprises courantes, la Société américaine de chimie a récemment changé le nom de son ancienne division de Chimie Colloïdale en une division de Chimie des Colloïdes et des Surfaces. [...] Afin d'éviter le point de vue à court terme et d'encourager une croissance saine dans ces domaines de la chimie, nous proposons que l'IUPAC institue une division de Chimie des Colloïdes et des Surfaces, dont l'étendue couvrirait tous les aspects fondamentaux [« *basic* »] du sujet.²⁶

Faisons une hypothèse : une des signatures du régime disciplinaire serait l'adhésion, par ses membres, à une vision de leur discipline orientée sur la production de nouveaux savoirs. « *Knowledge for its own sake* ». Dans cette acception, la finalité première de la discipline scientifique, sa justification intellectuelle, culturelle, politique,... est la connaissance. En catalyse, John Turkevich, qui a participé à l'introduction du microscope électronique dans l'étude des catalyseurs et en particulier appliqué au projet Manhattan (cf. chapitre 2), a acquis une conception de son domaine analogue à celle que Rideal porte à la chimie colloïdale. Organisant un colloque Américano-Japonais sur la catalyse en 1971, Turkevich écrit à Paul Emmett que les intervenants devraient garder en tête la question « Que nous raconte la technique spécifique pour laquelle nous avons une expertise sur le mode de l'action catalytique, et comment pouvons-nous l'utiliser pour concevoir de meilleurs catalyseurs ? ». Mais Turkevich s'empresse d'ajouter qu'il « déteste présenter la dernière partie de la question, bien qu' [il lui] semble qu' [il] n'ait pas le choix »²⁷.

L'entreprise de Rideal de restaurer la chimie colloïdale comme discipline a échoué ; significativement, l'IUPAC ne va pas accorder une division entière à ce domaine, mais simplement un comité à l'intérieur de la division de physico-chimie, comité dont Rideal sera président jusqu'en 1967. Mais la désintégration de la chimie colloïdale en tant que régime disciplinaire a profité à d'autres domaines des sciences avec lesquels celle-ci a historiquement été en compétition et prise dans des jeux de recouvrement-différentiation : la catalyse, les polymères, la biochimie et la biologie moléculaire. Chacun de ces domaines tente d'instaurer un régime disciplinaire dans l'après-guerre. Yasu Furukawa a décrit l'essor de la « science » des polymères une fois la « vieille école colloïdale » ravalée aux oubliettes de l'histoire des sciences. Dès 1946 est créé à l'IUPAC un comité de chimie macromoléculaire, qui devient une division en 1968. Au cours des années 1960, la biochimie et la biologie moléculaire sont en compétition pour définir ce qu'est une recherche « fondamentale » en biologie, ou plutôt qui, des deux domaines, est le plus « fondamental »²⁸. L'appropriation des fonds publics et privés de recherche, la dénomination des départements, laboratoires, instituts et chaires

²⁶ Rideal, *Proposal for action by IUPAC*, op. cit.

²⁷ Lettre, Turkevich à Emmett, 7 juillet 1971, PEP/Correspondence Tr-Tw

²⁸ Pnina G. ABIR-AM, « The politics of macromolecules : molecular biologists, biochemists, and rhetoric », *Osiris*, 2nd series, vol. 7 (1992), pp. 164-191

universitaires est au cœur des enjeux de ces luttes, qui peuvent ainsi se comprendre dans le cadre de l'évolution des « régimes » de production des savoirs.

Ouverture 3 : la longue durée des « nanos »

Quelques années avant qu'il ne milite auprès de l'IUPAC pour établir une division de chimie colloïdale, Rideal est parvenu à établir un « groupe technique » de chimie colloïdale et des surfaces au sein de la Société de Chimie Industrielle. Ce groupe a perduré au sein de cette Société jusqu'à nos jours, et sur son site web on peut lire que le domaine de la chimie colloïdale et des surfaces « est la fondation de ce qui est communément appelé les nanotechnologies, et trouve des applications parmi de nombreux secteurs commerciaux »²⁹. Encore, donc, et plus proche de nous temporellement, revient la volonté d'attribuer une paternité disciplinaire à un ensemble de techniques et matériaux ; de statuer sur la fondation de cet ensemble. Les représentants de la chimie colloïdale sont ainsi prompts à affirmer que leur domaine est « fondamental » aux nanotechnologies, ce qui est une autre manière de dire à qui revient le crédit scientifique des richesses matérielles générées par ces nanotechnologies.

Lorsqu'on examine conjointement l'histoire récente de ces deux domaines, un constat immédiat s'impose : la croissance des nanosciences et nanotechnologies³⁰ et celle de la chimie colloïdale semblent à peu près simultanées. L'institutionnalisation des « nanos » démarre à la fin des années 1980 et prend son essor au cours des années 1990 : les instituts, laboratoires, départements universitaires ou centres de recherche qui s'affichent nano se multiplient au cours de cette période³¹. Une tendance à l'institutionnalisation qui se recoupe en toute logique avec une explosion de la publication scientifique nano³². La même tendance semble à l'œuvre, au moins en ce qui concerne les publications, pour le domaine de recherche sur les colloïdes : le nombre de publications est en forte augmentation relative et absolue au cours de la décennie 1990 (cf. annexe I). Il faudrait effectuer un travail similaire aux nanos en ce qui concerne l'évolution des institutions qui s'affichent colloïdes au cours de cette période. Mais on peut dès à présent esquisser une hypothèse ouvrant à une problématique de recherche tout à fait prometteuse : cette simultanéité est plus qu'une coïncidence ; *il existe un recouvrement intellectuel et sociologique fort entre ces deux tendances.*

Après tout, la science des colloïdes et les nanos ont ceci de commun qu'elles en sont venues à être définies à travers une même approche : par l'échelle d'investigation, par la taille. Nous avons vu en effet qu'au début du XX^e siècle les chimistes ont appréhendé les colloïdes non plus comme une classe de substances, mais comme un état de la matière finement dispersé dans lequel les différentes phases sont microscopiquement en immixtion.

²⁹ <http://www.soci.org/Membership-and-Networks/Technical-Groups/Colloid-and-Surface-Chemistry-Group>, accédé le 18/06/2008

³⁰ Couramment abrégé, officieusement, en « nanos », mais seulement dans le monde francophone

³¹ Joachim SCHUMMER, « The global institutionalization of nanotechnology research : a bibliometric approach to the assessment of science policy », *Scientometrics*, vol. 70 (2007), pp. 669-692

³² Ronald N. KOSTOFF, Raymond G. KOYTCHIEFF, Clifford G. Y. LAU, « Global nanotechnology research metrics », *Scientometrics*, vol. 70 (2007), pp. 565-601

Dans cette acception, les colloïdes sont composés de petites particules colloïdales, dont la taille et les autres caractéristiques morphologiques sont parfois mesurables à l'aide des instruments que les chimistes se sont employés à élaborer. Wolfgang Ostwald au cours des années 1910 a qualifié ce domaine de « monde des dimensions négligées »³³, entre un et environ 200 « millimicrons », une échelle de taille qui devient alors l'échelle colloïdale. Le nanomètre n'avait pas encore été inventé, mais, au fond, diviser un micromètre par mille ou un mètre par un million revient à la même chose. Le nanomètre est officiellement entériné par le Bureau International des Poids et des Mesures en 1961, et désigne un milliardième de mètre. Plus tard, avec la diffusion des nanos, les particules colloïdales sont massivement rebaptisées « nanoparticules ». Le flou de la définition des nanos est sans arrêt rappelé par les analystes dès qu'ils s'emploient à saisir ce domaine, mais un élément revient inlassablement pour statuer sur sa nature et ses contours : la définition par l'échelle d'investigation semble la plus consensuelle, et en attendant mieux, elle reste. Il est frappant de remarquer que cette échelle – entre un et cent nanomètres – est quasi-identique à l'échelle colloïdale. Il n'est donc pas surprenant de pouvoir établir une certaine continuité scientifique et technique entre le mouvement des colloïdes au début du siècle et celui plus contemporain des nanos. En particulier les techniques de production des nanoparticules, qui représentent un poids économique considérable, ont pour la plupart été scientifiquement étudiées et catégorisées initialement par des chimistes des colloïdes (cf. annexe J). Ainsi, l'analyse des interactions entre les nanos et les colloïdes semble une ligne historiographique prometteuse pour comprendre la trajectoire historique des nanos. En dépit de cette apparente proximité entre les deux domaines, les travaux sur l'histoire des nanos n'ont pas encore étudié systématiquement ces interactions³⁴.

³³ *Die welt der vernachlässigten dimensionen*, Dresden et Leipzig, Verlag von Theodor Steinkopff, 1915

³⁴ Au meilleur de notre connaissance de l'historiographie des nanotechnologies, il n'y a pour l'instant que l'article d'Andreas WOYKE qui dégage la question de la continuité entre la chimie colloïdale et les nanos : « Überlegungen zur Verortung der Nanotechnologie in einem wissenschafts-und technikgeschichtlichen kontinuum » (« *Reflections about an embedding of nanotechnology in a continuum of the history of science and technology* »), *Berichte zur Wissenschaftsgeschichte*, vol. 31 (2008), pp. 58-67

SOURCES ARCHIVES – ABRÉVIATIONS

Collections au Hagley Museum & Library (HML), Wilmington, Delaware :

- JBN : J. Burton Nichols papers, accession number 2258
- GDP : Gordon D. Patterson papers, accession number 2247
- CRD : Central research and development department collection, accession number 1784
- SCS: Archives pour documenter la monographie de David Hounshell et John Smith *Science and Corporate Strategy*, accession number 1850
- PP : Presidential Papers, accession number 1662
- DPF : Du Pont Fibers, accession number 1771
- JL : Jackson Laboratory, accession number 2227
- WFH : Willis F. Harrington papers, accession number 1813

Collection aux archives de l'université de l'Oregon (*Oregon State University Libraries, Special Collections*), Corvallis, Oregon :

- PEP : Paul Emmett papers

Collection à la Firestone Library, Princeton University, Princeton, New-Jersey :

- HST : Hugh Stott Taylor papers

Le nombre indiqué immédiatement après l'abréviation renvoie au numéro de boîte de la collection archivée ; la description après le numéro renvoie au nom du dossier à l'intérieur de la boîte. Par exemple, « JBN 4/cellulose research » indique que le matériel cité se trouve dans la collection J. Burton Nichols, dans la boîte n°4, et dans le dossier intitulé « cellulose research » de cette boîte.

Autres abréviations :

DSL : David Sarnoff Library, Princeton, New-Jersey

APS : American Philosophical Society, Philadelphie, Pennsylvanie

NARA : National Archives and Record Administration, Washington (D.C.)

CHF : Chemical Heritage Foundation, Philadelphie, Pennsylvanie

Abréviations de publications:

- *JIEC*: Journal of Industrial and Engineering Chemistry
- *JCE*: Journal of Chemical Education

- *JACS*^o: Journal of the American Chemical Society

Abréviation de monographies:

- H&S: David Hounshell et John K. Smith, Jr., *Science and Corporate Strategy. Du Pont R&D 1902-1980*, Cambridge (MA), Cambridge University Press, 1988

ESSAI BIBLIOGRAPHIQUE

Puisque les références sont données en extension dans le texte, j'ai préféré rédiger un essai bibliographique plutôt que présenter une liste de références classée par ordre alphabétique. Les outils documentaires et bibliographiques modernes permettent d'établir de telles listes assez facilement, ce qui diminue leur intérêt en tant qu'annexe à un travail de thèse. En outre, la thèse n'étant pas découpée selon un ordre chronologique, il n'est pas indiqué de présenter les références utilisées pour chaque partie, mais plutôt de les séparer en thématiques. J'introduis ici brièvement la plupart des ouvrages et travaux sur lesquels je me suis appuyé pour ce travail, en les séparant en quatre grandes entrées thématiques. Ces thématiques se recouvrent, et bien des travaux cités pourraient être mentionnés dans plusieurs entrées. Cependant elles permettent de se repérer plus facilement dans l'historiographie, et suggèrent la manière dont j'ai appréhendé ces travaux. D'autres thématiques qui ne constituent pas le cœur de la thèse auraient pu être ajoutées, si bien que de nombreux travaux cités dans le corps de la thèse ne sont pas référencés ici. Bien entendu, les spécialistes auront raison de mettre en avant les nombreuses lacunes et omissions dans chaque entrée thématique.

Chimie industrielle – pigments et peintures

Ludwig F. HABER, *The Chemical Industry 1900-1930* (London : Oxford University Press, 1971), le fils du célèbre chimiste Fritz Haber, offre une synthèse de l'industrie chimique à la fois du point de vue technique, scientifique et économique dans le premier tiers du siècle. L'impact de la Première Guerre mondiale est systématiquement étudié ; la zone géographique est européenne et nord-américaine, en accordant toutefois le plus de place à l'Allemagne et à l'Angleterre. Les deux recueils plus récents coordonnés par Ernest HOMBURG, Anthony S. TRAVIS, Harm G. SCHRÖTER et Peter J.T. MORRIS, *Determinants in the evolution of the European chemical industry. 1900-1939*, ainsi que *The Chemical Industry in Europe, 1850-1914: Industrial Growth, Pollution, and Professionalization* (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998) se concentrent sur l'Europe mais sur une durée plus longue, et donnent un aperçu des pays et des thématiques invisibles dans l'histoire d'Haber comme l'Espagne et l'Italie ou la régulation des pollutions chimiques. Ulrike FELL (ed.), *Chimie et industrie en Europe. L'apport des sociétés savantes industrielles du XIXe siècle à nos jours* (Paris : Archives contemporaines, 2001) analyse l'essor de l'industrie chimique à travers l'institution de sociétés professionnelles, principalement en France, Allemagne et Angleterre et entre les années 1880 et 1930. Fred AFTALION, *Histoire de la chimie* (Paris: Masson, 1988) est un "patchwork" de l'histoire scientifique, technique et économique de l'industrie, toujours dans la sphère Occidentale, depuis le début du XIXe siècle mais se concentrant sur la période 1914-1950 ; dans *A history of the international chemical industry: from the early days to 2000* (Philadelphia: Chemical Heritage Press, 2001), Aftalion accorde plus de place à la période post- 1^{er} choc pétrolier.

William HAYNES, *American chemical industry* (New-York (NY) : D. van Nostrand & Co., 6 volumes, 1945-1954) étudie exclusivement le cas américain, des premières colonies à la Seconde Guerre mondiale; les annexes fournissent d'importantes statistiques sur les prix, la production et les importations des produits ou intermédiaires de l'industrie les plus importants. Arnold THACKRAY *et. al.*, *Chemistry in America, 1876-1976 : historical indicators* (Dordrecht^o: Reidel, 1985) rassemble et met en perspective des statistiques agrégées de l'industrie chimique américaine et offre une vision d'ensemble qui est absente de la volumineuse étude de Haynes. Alfred D. CHANDLER, Jr., *Shaping the industrial century: the remarkable story of the evolution of the modern chemical and pharmaceuticals industries* (Cambridge (MA): Harvard University Press, 2005) est une histoire économique de l'industrie chimique sur l'ensemble du XXe siècle, analysant avant tout la stratégie des grands groupes et américano-centrée, même si les grandes entreprises européennes (principalement allemandes et britanniques) sont aussi abordées. L'étude dirigée par Nathan ROSENBERG, Ashish ARORA et Ralph LANDAU (eds.), *Chemicals and long-term growth* (New York (NY): John Wiley & Sons, 1998) est également une histoire économique de l'industrie chimique du XXe siècle, moins focalisée sur la stratégie d'entreprise que celle de Chandler. Bien que ce recueil aborde le cas japonais, il se concentre néanmoins sur les cas américains, britanniques et allemands, et aborde des problématiques peu traitées comme les liens entre l'industrie chimique et la finance. Enfin, Vivien WALSH, « Invention and innovation in the chemical industry : demand-pull or discovery-push ? », *Research Policy* (vol. 13 (1984), pp. 211-234), et Basil ACHILLADELIS *et. al.*, « The dynamics of technological innovation : the case of the chemical industry », *Ibid.* (vol. 19 (1990), pp. 1-34) analysent les déterminants de l'innovation en juxtaposant de longues séries temporelles (1820-1980) sur la production et la consommation de produits de l'industrie ainsi que sur le dépôt de brevets, principalement américaines et britanniques.

Les monographies d'entreprise constituent également une entrée essentielle pour retracer l'histoire de l'industrie chimique : par exemple Werner ABELSHAUSER *et. al.*, *German industry and global enterprise. BASF: the history of a company* (Cambridge (U.K.): Cambridge University Press, 2004) pour BASF, et Marc DROUOT *et al.*, *La fabrique de produits chimiques Thann et Mulhouse : histoire d'une entreprise de 1808 à nos jours*, (Strasbourg : La nuée bleue, 1991) pour Thann et Mulhouse. William Haynes (*American chemical industry, op. cit.*) introduit la trajectoire particulière de la plupart des entreprises américaines dans son volume 6. Du Pont a fait l'objet d'un certain nombre de travaux académiques ou issus d'une demande de l'entreprise. En ce qui concerne son histoire au XXe siècle, Pap NDIAYE, *Du nylon et des bombes. Du Pont de Nemours, le marché et l'état américain* (Paris : Belin, 2001) [traduction anglaise par Elborg Forster, *Nylon and Bombs: DuPont and the March of Modern America* (Baltimore : Johns Hopkins University Press, 2007)] est la synthèse la plus aboutie, liant remarquablement histoire politique, économique, technique et culturelle pour offrir une compréhension large de l'histoire de Du Pont. Bien que focalisée sur la relation de la firme vis-à-vis de la R&D, la volumineuse étude de David A. HOUNSHELL & John K. SMITH, Jr., *Science and Corporate Strategy. Du Pont R&D, 1902-1980* (Cambridge (U.K.) : Cambridge University Press, 1988), introduit également une vision

globale de l'histoire de Du Pont sur le dernier siècle, tout en offrant et interprétant une mine de détails et de chiffres sur ses activités de recherche. Alfred CHANDLER a également consacré une monographie à Du Pont : *Pierre S. Du Pont and the making of the modern corporation* (New York (NY): Harper & Row, 1971, coécrit avec Stephen SALSBURY). Voir aussi, pour un aperçu plus récent, Graham D. TAYLOR et Patricia E. SUDNICK, *Du Pont and the international chemical industry* (Boston (MA): Twayne Publishers, 1984). L'histoire technique et économique du développement des fibres textiles au sein du département de la Rayonne est l'objet de l'étude de Samuel HOLLANDER, *The sources of increased efficiency : a study of Du Pont rayon plants* (Cambridge (MA)^o: Cambridge University Press, 1965). Gerard C. ZILG, *Du Pont : behind the nylon curtain* (Prentice Hall (NJ), 1974) aborde l'histoire de Du Pont sous un angle résolument critique, en retraçant l'ampleur du pouvoir de la famille du Pont de Nemours localement (dans le Delaware) et au niveau politique national, et ses actions les plus discutables. Véritable antithèse de Zilg, l'œuvre d'Adrian KINNANE, *Du Pont: from the banks of the brandywine to miracles of science* (Wilmington: E.I. du Pont de Nemours and Company, 2002) est un livre à la gloire de Du Pont, qu'il faut donc prendre avec un certain recul. Enfin, d'autres travaux mettent en avant des aspects de son histoire qui n'apparaissent que très peu dans ces monographies : David J. RHEES, « Publicité institutionnelle, relations publiques et expositions. Le cas de Du Pont », in Brigitte SCHROEDER-GUDEHUS (ed.), *La société industrielle et ses musées. Demande sociale et choix politiques 1890-1990* (Paris : Archives Contemporaines, 1992) ; Harriet STANDEVEN, « The development of decorative gloss paints in Britain and the United States c. 1910-1960 », *Journal of the American Institute for Conservation* (vol. 45 (2006), pp. 51-65), qui retrace en détail le développement des vernis "Dulux" au sein de la compagnie.

Contrairement aux colorants et pigments organiques synthétiques qui ont fait l'objet de nombreuses recherches historiques (cf. section suivante), les pigments minéraux n'ont retenu l'attention des historiens des sciences et des techniques que très modestement et indirectement. L'histoire scientifique et technique des pigments minéraux et de leur mise en œuvre industrielle reste largement à écrire, en particulier en ce qui concerne le XXe siècle. Plusieurs travaux sur l'histoire des couleurs offrent cependant un premier aperçu de cette histoire. Philipp BALL, *Histoire vivante des couleurs: 5000 ans de peinture racontée par les pigments* (Paris : Hazan, 2005), ainsi que François DELAMARE, *Les matériaux de la couleur* (Paris : Gallimard, 1999) constituent une première lecture instructive. Le bleu, la couleur préférée en Occident depuis plusieurs siècles, est fréquemment issu de pigments minéraux ; François DELAMARE, *Bleus en poudre. De l'art à l'industrie : 5000 ans d'innovations* (Paris : Presses de l'Ecole des Mines, 2008) relate son histoire depuis l'Antiquité principalement du point de vue technique, orientée sur la découverte et le développement des procédés. Michel PASTOUREAU, *Bleu : l'histoire d'une couleur* (Paris : Seuil, 2000) écrit ici une histoire anthropologique et culturelle du bleu. Du même auteur, on pourra également consulter le *Dictionnaire des couleurs de notre temps* (Paris : Christine Bonneton, 1992). Un aperçu de l'industrie des pigments au plomb aux Etats-Unis au début du XXe siècle se cache dans l'étude de Christian WARREN sur l'histoire de la régulation des pathologies liées à l'ingestion de plomb : *Brush with death : a social history of lead poisoning* (Baltimore (MD): The Johns

Hopkins University Press, 2000). Les mémoires de George B. HECKEL, *The paint industry: reminiscences and comments* (Saint Louis, 1928), un des principaux représentants de cette industrie, sont également une source importante pour documenter l'histoire des pigments minéraux aux Etats-Unis. Plusieurs chapitres de HAYNES, *American chemical industry, op. cit.*, apportent des statistiques, anecdotes et autres détails de valeur (en particulier vol. 1, chapitre 22, et vol. 3, chapitre 7). Enfin, les traités techniques et scientifiques sur la chimie comportent pour certains de très intéressants développements historiques : Paul Pascal (ed.), *Nouveau traité de chimie minérale* (Paris : Masson et Cie, 20 volumes, 1956-1970), et Jelks BARKSDALE, *Titanium. Its chemistry, occurrence, and technology* (New York (NY)^o: Ronald Press Company, 1946)

Recherche industrielle – relations science-technique

La recherche scientifique en tant que composante majeure des activités industrielles a concentré l'attention des historiens depuis plusieurs décennies. Ceux-ci ont notamment adopté comme focale d'investigation une entreprise en particulier. En ce qui concerne le cas américain, l'histoire de la recherche chez Du Pont a largement été documentée et analysée par D. Hounshell et J.K. Smith, *Science and corporate strategy, op. cit.*, dont on peut trouver un résumé (bienvenu) des thèses dans David HOUNSHELL, «°Continuity and change in the management of industrial research°», in Giovanni DOSI *et al.*, *Technology and enterprise in a historical perspective*, (Oxford: Clarendon Press, 1992). Le cas de la *General Electric* et des *Bell Laboratories* a été étudié en détail par Leonard S. REICH, *The making of American industrial research. Science and business at GE and Bell, 1876-1926* (Cambridge (MA): Cambridge University Press, 1985), et par George WISE, *Willis R. Whitney, General Electric, and the Origins of US Industrial Research* (New York (NY): Columbia University Press, 1985). Sur les *Bell Laboratories*, voir également Lillian HODDESON, «°The emergence of basic research in the Bell Telephone System, 1875-1915°», *Technology and Culture* (vol. 22 (1981), pp. 512-544), et Kenneth LIPARTITO, «°Rethinking the invention factory: Bell Laboratories in perspective°», in Sally H. CLARK *et al.* (eds.), *The challenge of remaining innovative. Insights from twentieth century american business* (Stanford (CA): Stanford University Press, 2009). L'émergence de la recherche au sein de la firme Eastman Kodak est retracé par Reese V. JENKINS, *Images and enterprise: technology and the American photographic industry, 1839 to 1925* (Baltimore (MD): Johns Hopkins University Press, 1975).

En Allemagne, le cas de BASF est détaillé par Carsten REINHARDT et Anthony S. TRAVIS, *Heinrich Caro and the creation of modern chemical industry* (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000); voir également sur BASF Carsten REINHARDT, «°An instrument of corporate strategy : the central research laboratory at BASF 1868-1890°», in Ernest HOMBURG *et al.* (eds.), *The Chemical Industry in Europe, 1850-1914: Industrial Growth, Pollution, and Professionalization* (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998). Les recherches menées au sein du conglomérat IG Farben, de la fusion des principales entreprises

de chimie allemandes (dont BASF), institué en 1925 et démantelé à la chute du Troisième Reich en 1945, ont également été étudiées par Ulrich MARSCH, «°Strategies for success°: research organization in German chemical companies and I.G. Farben until 1936°», *History and Technology* (vol. 12 (1995), pp. 23-77), et Carsten REINHARDT, « Basic research in industry : two case studies at I.G. Farbenindustrie AG in the 1920s and 1930s », in Anthony S. TRAVIS *et al.* (eds.), *Determinants in the evolution of the European chemical industry, 1900-1939*, *op. cit.* En France, la recherche au sein de l'entreprise Péchiney est l'objet de Muriel LE ROUX, *L'entreprise et la recherche: un siècle de recherche industrielle à Péchiney* (Paris : Rive droite, 1998).

Les historiens ont également abordé la recherche industrielle en adoptant comme focale d'analyse certains secteurs industriels circonscrits. En particulier, le secteur des colorants synthétiques à partir du dernier tiers du XIXe siècle a capté leur attention. En Allemagne, John J. BEER, *The emergence of the German dye industry* (New York (NY): Arno Press, 1959) est l'étude classique, complétée plus récemment par Ernst HOMBURG, «°The emergence of research laboratory in the dyestuffs industry, 1870-1900°», *British Journal for the History of Science* (vol. 25 (1992), pp. 91-111), et par Anthony S. TRAVIS, *The rainbow makers: the origins of the synthetic dyestuffs industry in western Europe* (Londres: Associated University Press, 1993). Kathryn STEEN, *Wartime catalyst and postwar reaction°: the making of the United States synthetic organic chemicals industry, 1910-1930* (Newark (DE)°: thèse de doctorat, University of Delaware, 1995) retrace l'émergence de l'industrie des colorants synthétiques aux Etats-Unis. Toujours aux Etats-Unis, Jonathan LIEBENAU, *Medical science and medical industry: the formation of the American pharmaceutical industry* (Londres: MacMillan Press, 1987) examine le cas particulier de la recherche dans l'industrie pharmaceutique au tournant du XXe siècle. Le secteur de la métallurgie a également retenu l'attention des historiens : Cyrus S. SMITH, *A History of Metallography* (Chicago (IL)°: University of Chicago Press, 1960) ; voir aussi, du même auteur, « The interaction of science and practice in the history of metallurgy », *Technology & Culture* (vol. 2 (1961), pp. 357-367). Nicole CHEZEAU, *De la forge au laboratoire – naissance de la métallurgie physique* (Rennes : Presses Universitaires de Rennes, 2004) est l'étude la plus approfondie sur l'émergence de la recherche industrielle en métallurgie, à la fois en Europe et aux Etats-Unis. La visibilité de ses travaux au sein des synthèses sur la recherche industrielle (cf. ci-dessous) est faible, et devraient être davantage pris en considération.

Les carburants synthétiques, et l'hydrogénation du charbon sous haute pression en particulier, constituent un autre secteur industriel qui s'est avéré intensif en recherche à partir du début du XXe siècle : Thomas P. HUGUES, « Technological momentum in history : hydrogenation in Germany 1898-1933 », *Past & Present* (vol. 44 (1969), pp. 106-132). La production de carburants synthétiques s'est avérée déterminante pour l'approvisionnement du Troisième Reich en combustible, la recherche industrielle allemande s'est massivement mobilisée pour assurer cet approvisionnement : Arnold KRAMMER, «°Fueling the Third Reich°», *Technology and Culture* (vol. 19 (1978), pp. 394-422). Partageant un thème scientifique et technique commun aux carburants synthétiques, la catalyse, la raffinerie du

pétrole s'est également largement appuyée sur les ressources de la recherche industrielle : John L. ENOS, *Petroleum progress and profits. A history of process innovation* (Cambridge (MA)^o: The MIT Press, 1962) retrace le cas américain, dans une étude là encore sous-valorisée dans l'historiographie. Enfin, le secteur de l'électronique et des premiers balbutiements de la micro-électronique dans la première moitié du XXe siècle est également bien documenté : Lillian HODDESON (ed.), *Out of the crystal maze^o: chapters from the history of solid state physics* (New York^o: Oxford University Press, 1992), et Michael ECKERT et Helmut SCHUBERT, *Crystals, electrons, transistors. From scholar's study to industrial research* (New-York (NY)^o: American Institute of Physics, 1990) sont incontournables en première approche pour ce secteur.

Parallèlement, certaines études ont privilégié une approche plus synthétique ou globale pour appréhender l'histoire de la recherche industrielle. Jonathan LIEBENAU, «^oCorporate structure and research and development^o», in LIEBENAU (ed.), *The Challenge of New Technology. Innovation in British Business since 1850* (Aldershot^o: Gover, 1988) est un essai transversal en termes de secteur industriel et géographique sur la recherche comme stratégie d'entreprise au tournant du XXe siècle. George WISE, «^oScience and Technology^o», *Osiris* (2nd Series, vol. 1, Historical Writing on American Science (1985), pp. 229-246) synthétise les études académiques et gouvernementales sur les rapports entre science et technique, et constate la prise de distance progressive dans ces études vis-à-vis du «^omodèle linéaire^o» (la science engendre la technique, la technique ou l'industrie est fondée sur la science) à partir des années 1980. L'étude de Wolfgang KÖNIG, «^oScience-based industry or industry-based science? Electrical engineering in Germany before World War I^o», *Technology and Culture* (vol. 37 (1996), pp. 70-101) représente un pas de plus dans cette déconstruction du modèle linéaire, et expose un cas où, à l'inverse, l'industrie engendre la science. Dans la même perspective, Nathan ROSENBERG, *Schumpeter and the endogeneity of technology* (Londres: Routledge, 2000) a mis en évidence la tendance à surestimer le rôle de la science dans l'économie, et invite à examiner davantage l'impact de l'économie sur la science; voir aussi, même auteur, «^oWhy do firms do basic research^o», *Research Policy* (vol. 19 (1990), pp. 165-174). Un recueil de travaux plus récent reprend ces problématiques: Karl GRANDIN, Nina WORMBS and Sven WIDMALM (eds.), *The Science-Industry Nexus: History, Policy, Implications* (Sagamore Beach^o: Science History Publications, 2004).

Le cas américain a donné lieu à de nombreux travaux visant à appréhender le phénomène de la recherche industrielle dans sa globalité. Une des premières études synthétiques est celle de David F. NOBLE, *America by Design. Science, Technology, and the Rise of Corporate Capitalism* (Oxford^o: Oxford University Press, 1977), qui s'attache à montrer que ce phénomène est tout entier contraint et déterminé par l'essor d'un puissant capitalisme industriel à partir de la fin du XIXe siècle. Une interprétation qui n'est pas partagée par John K. SMITH, «^oThe Scientific Tradition in American Industrial Research^o», *Technology and Culture* (vol. 31, n^o1 (1990), pp. 121-131), ou tout au moins laissée de côté pour mieux extraire une périodisation de la recherche industrielle aux Etats-Unis ; dans cette périodisation, l'entre-deux guerres représente une rupture incarnée par une immixtion plus

intense entre science et industrie. Michael A. DENNIS, «°Accounting for research. New histories of corporate laboratories and the social history of American science°», *Social Studies of Science* (vol. 17 (1987), pp. 479-518), et Steven SHAPIN, *The scientific life. A moral history of a late modern vocation* (Chicago (IL)°: The University of Chicago Press, 2008) constituent deux contrepoints à ces synthèses. Enfin, les corrélations entre taille de firme, recherche industrielle et succès économique sont analysées par David MOWERI, «°Industrial research and firm size, survival, and growth in American manufacturing, 1921-1946°», *The Journal of Economic History* (vol. 43 (1983), pp. 953-980). Le cas Français est retracé par Terry SHINN, « The genesis of French industrial research 1880-1940 », *Social Science Information* (vol. 19 (1980), pp. 607-640), et par Michel LETTE, *Henry Le Chatelier (1850-1936) ou la science appliquée à l'industrie* (Rennes : Presses Universitaires de Rennes, 2004), et ne semble pas fondamentalement différent du pattern de développement américain.

Evolution des disciplines, des pratiques et des concepts en chimie

Plusieurs travaux relatant l'histoire de la chimie sur une large échelle temporelle, principalement du point de vue scientifique, constituent un bon point d'entrée pour retracer l'évolution des concepts et des pratiques : James R. PARTINGTON, *A history of chemistry* (Londres°: Macmillan & Co, 4 volumes, 1961-1970) et Aaron J. IHDE, *The development of modern chemistry* (New York (NY)°: Harper & Row, 1964) sont des études volumineuses, détaillées, du contenu des recherches des chimistes de l'Antiquité au milieu du XXe siècle environ. *L'Histoire générale des techniques* (Paris : PUF, 5 volumes, 1996), sous la direction de Maurice DAUMAS, contient de nombreux développements de l'histoire de la chimie, en particulier sur les aspects techniques et industriels. Cependant, pour une introduction plus récente et abordable au premier abord de l'histoire de la chimie, je recommande Bernadette BENSAUDE-VINCENT and Isabelle STENGERS, *Une histoire de la chimie* (Paris : La Découverte, 1993), et William H. BROCK, *The Norton history of chemistry* (New York (NY)°: W.W. Norton & Co., 1992), qui exposent moins de détails mais gagnent en synthèse, en se focalisant davantage sur les pratiques. L'oeuvre de Mary Jo NYE, largement utilisée dans cette thèse, représente également une entrée incontournable pour étudier l'évolution de la chimie au cours des XIXe et XXe siècles, en particulier en ce qui concerne ses relations avec la physique. *Before Big Science. The pursuit of modern chemistry and physics, 1800-1940* (Cambridge (MA)°: Harvard University Press, 1996) met en parallèle l'histoire des concepts et des pratiques en physique et en chimie, et leur autonomie ou interdépendance mutuelle. *From chemical philosophy to theoretical chemistry. Dynamics of matter and dynamics of disciplines* (Berkeley (CA), University of California Press, 1993) approfondit l'histoire de ce recouvrement entre physique et chimie au XIXe siècle et jusqu'au premier tiers du XXe siècle, et défend la thèse d'une autonomie maximale entre les deux disciplines au milieu du XIXe siècle, l'écart entre les deux disciplines diminuant à partir de la fin du siècle avec l'émergence de la discipline chimie physique (*physical-chemistry*). Sur l'émergence de la chimie physique et son importation aux Etats-Unis, voir John W. SERVOS, *Physical chemistry from Ostwald to Pauling°: the making of a science in America* (Princeton (NJ)°: Princeton

University Press, 1990). Voir également, du même auteur, un essai historiographique incontournable: « History of chemistry », *Osiris*, (2nd Series, Vol. 1, Historical Writing on American Science (1985), pp. 132-146).

La question de la « réalité moléculaire » au tournant du XXe siècle, centrale dans cette thèse, est introduite et analysée en détail par Mary Jo NYE, *Molecular Reality. A perspective on the scientific work of Jean Perrin* (New York (NY)^o: American Elsevier, 1972). Un ouvrage à lire en parallèle, pour une extension au XIXe siècle, avec Mary Jo NYE, « The nineteenth-century atomic debates and the dilemma of an 'indifferent hypothesis' », *Studies in History and Philosophy of Science* (vol. 7 (1976), pp. 245-268). Ce thème de la réalité moléculaire et des travaux de Jean Perrin sur l' « évidence des atomes » est repris plus récemment par Charlotte BIGG, « Evident atoms : visuality in Jean Perrin's Brownian motion research », *Studies in History and Philosophy of Science* (vol. 39 (2008), pp. 312-322). L'évolution des concepts d' « atome » et de « molécule » au XIXe siècle sont bien retracées par Seymour H. MAUSKOPF, « Crystals and Compounds : Molecular Structure and Composition in Nineteenth-Century French Science », *Transactions of the American Philosophical Society* (vol. 66, n^o3 (1976), pp. 1-82), et sur une durée plus longue par Henricus Hermanus KUBBINGA, *L'histoire du concept de "molécule"* (Paris : Springer, 3 volumes, 2001). A lire également, l'œuvre de Cyril S. SMITH, qui aborde ces questions du point de vue (original) de la métallurgie, et reste sous-valorisée dans l'historiographie en particulier pour appréhender l'évolution de la physique et de la chimie aux XVIIIe et XIXe siècles : *A history of metallography, op. cit.*, et *A search for structure. Selected essays on science, art, and history* (Cambridge (MA)^o: The MIT Press, 1981). Se focalisant sur les trois premières décennies du XXe siècle, et dans la continuité du thème de la réalité moléculaire : Mary Jo NYE, « Atomic and molecular science », in Dominique PESTRE and John KRIGE (eds.), *Science in the twentieth century* (Amsterdam : Harwood, 1997), et , même auteur, Mary Jo NYE, « At the Boundaries : Michael Polanyi's Work on Surfaces and the Solid State », in Carsten REINHARDT (ed.), *Chemical Sciences in the Twentieth Century* (Weinheim^o: Wiley VCH, 2001). L'importation de la « physique moléculaire » aux Etats-Unis dans l'entre-deux guerres est retracée par Alexi ASSMUS, « The Americanization of molecular physics », *Historical Studies of the Physical Sciences* (vol. 23 (1992), pp. 1-34).

Le concept d' « ontologie des matériaux », élaboré par Ursula KLEIN et Wolfgang LEFEVRE, *Materials in Eighteenth Century Science. A Historical Ontology* (Cambridge (MA) : MIT Press, 2007), a ouvert, dans cette thèse, à une nouvelle lecture de l'histoire de la chimie colloïdale, en particulier dans ses rapports avec la chimie organique. La genèse de la chimie organique moderne au cours du XIXe siècle a fait l'objet de nombreux travaux depuis des décennies. Pour un exposé récent de cette histoire et une introduction à cette littérature, voir Ursula KLEIN, *Experiments, models, paper tools. Cultures of organic chemistry in the nineteenth century* (Stanford (CA)^o: Stanford University Press, 2003), et Sacha TOMIC, *Aux origines de la chimie organique. Méthodes et pratiques des pharmaciens et des chimistes (1785-1835)* (Rennes, Presses Universitaires de Rennes, 2010).

La chimie colloïdale n'a été que très peu pris comme thème principal de l'investigation historique. Le seul ouvrage dédié à cette branche de la chimie est celui d'Andrew EDE, *The rise and decline of colloid science in north-America 1900-1935: the neglected dimension* (Burlington (VT)^o: Ashgate, 2007) qui se concentre sur le cas américain, complété par deux articles du même auteur : « Colloids and quantification : the ultracentrifuge and its transformation of colloid chemistry », *Ambix* (vol. 43 (1996), pp. 32-45), et « When is a tool not a tool ? Understanding the role of laboratory equipment in the early colloidal chemistry laboratory », *Ibid.* (vol. 40 (1993), pp. 11-24). Certains ouvrages en allemand écrits par des chimistes sont dédiés à l'histoire de la chimie colloïdale en Allemagne, et restent plus superficiels que celui d'Ede pour le cas américain : Klaus BENEKE, *Beiträge zur Geschichte der Kolloidwissenschaften* (Nehnten: Verlag Reinhard Knof, 1998), et d'autres ouvrages en allemand attendent sans doute l'historien de la chimie colloïdale. Globalement cependant, les historiens des sciences se sont confrontés à la chimie colloïdale à travers le prisme de l'histoire des polymères d'une part, ou de celle de la biochimie et de la biologie moléculaire d'autre part. Pour l'angle d'attaque « polymère », voir Yasu FURUKAWA, *Inventing Polymer Science. Staudinger, Carothers, and the Emergence of Macromolecular Chemistry* (Philadelphia^o: University of Pennsylvania Press, 1998) ; L. M. PRITYKIN, « The role of concepts of structure in the development of physical-chemistry of polymers », *Isis* (vol. 72 (1981), pp. 446-456) ; Herbert MORAWETZ, *Polymers^o: the origins and growth of a science* (New York (NY)^o: Wiley, 1985). Pour l'angle d'attaque « biologie », voir Marcel FLORKIN, *A history of biochemistry* (New York^o: Elsevier, 1972) ; Robert E. KOHLER Jr., « The history of biochemistry : a survey », *Journal of the History of Biology* (vol. 8 (1975), pp. 275-318) ; Robert C. OLBY, *The path to the double helix*, London, Macmillan, 1974 ; Neil MORGAN, « The strategy of biological research programs: reassessing the 'dark age' of biochemistry 1910-1930 », *Annals of Science* (vol. 47 (1990), pp. 139-150).

Essor d'une société de masse

C'est dans cette section que les spécialistes trouveront les lacunes les plus criantes de cet essai bibliographique, et mettront en doute, avec raison, sa cohérence et son unité, qui aborde pêle-mêle l'histoire du « *big business* », de la production de masse, de la consommation de masse, de la crise de 1929, etc. Il s'agit ici simplement de mentionner les ouvrages qui m'ont aidé plus ou moins directement dans ce travail de thèse, avec moins de prétention à l'exhaustivité encore que pour les autres sections. Ces mises en garde étant faites, François CARON, *Les deux révolutions industrielles du XXe siècle* (Paris : Pocket, 1998) représente semble-t-il un bon point d'entrée pour étudier la « civilisation de masse » dont l'auteur retrace l'essor au début du XXe siècle, dans la sphère occidentale, et son évolution au cours du siècle dans une perspective véritablement internationale, c'est-à-dire non restreinte au monde occidental. L'ouvrage contient en outre une abondante bibliographie thématique. L'entrée classique pour aborder l'émergence du « *big business* » et les bouleversements concomitants au tournant du XXe siècle est l'œuvre d'Alfred D. CHANDLER, Jr.^o: en particulier *The visible hand^o: the managerial revolution in American business* (Cambridge (MA)^o: The Belknap Press of

Harvard University Press, 1977) [traduction française par Jean-Michel Saussois°: *La main visible des managers°: une analyse historique* (Paris°: Economica, 1977)] et *Scale and scope°: the dynamics of industrial capitalism* (Cambridge (MA)°: Harvard University Press, 1990). Une autre référence importante est Robert H. WHITE, *The search for order, 1877-1920. The making of America*, Londres, Mac Millan, 1967. Pour la crise de 1929, voir Isaac JOSHUA, *La crise de 1929 et l'émergence américaine* (Paris: PUF, 1999), et Michael A. BERNSTEIN, *The Great Depression. Delayed recovery and economic change in America, 1929-1939* (Cambridge (MA): Cambridge University Press, 1987).

S'appuyant en partie sur les travaux et l'interprétation de l'histoire économique de Chandler, David A. HOUNSHELL, *From the American system to mass production, 1800-1932* (Baltimore (MD)°: The Johns Hopkins University Press, 1984), et Susan STRASSER, *Satisfaction guaranteed. The making of the American mass market* (New York°: Pantheon Books, 1989) étudient respectivement la mise en place de systèmes de productions de masse, et de marchés de masse aux Etats-Unis. Voir aussi, dans la même perspective que David Hounshell mais sur un cadre temporel plus large : Thomas P. Hugues, *American genesis. A century of invention and technological enthusiasm* (New York (NY): Viking, 1989). Charles F. MCGOVERN, *Sold American. Consumption and citizenship, 1890-1945* (Chapel Hill (NC)°: The University of North Carolina Press, 2006) retrace en parallèle les mouvements de consommateurs et les stratégies marketing aux Etats-Unis, en insistant sur l'adhésion progressive de la société américaine à la consommation en tant que valeur culturelle. Charles MCGOVERN, Susan STRASSER, Matthias JUDT (eds.), *Getting and spending°: European and American consumer societies in the twentieth century* (New York (NY)°: Cambridge University Press for the The German Historical Institute, 1998) est un recueil documentant les spécificités nationales des sociétés vis-à-vis des pratiques de consommation. Voir aussi Alain CHATRIOT, Marie-Emmanuelle CHESSEL, Matthew HILTON (eds.), *The expert consumer : associations and professional in consumer society* (Aldershot : Ashgate, 2006). Susannah HANDLEY, *Nylon : the story of a fashion revolution* (Baltimore°: Johns Hopkins University Press, 1999), est une histoire sociale et culturelle de l'appropriation du nylon par la société américaine, un produit incarnant la maturité de l'industrie chimique du XXe siècle. Pour une approche similaire à celle de Handley sur les plastiques, voir Jeffrey MEIKLE, *American Plastic : a cultural history* (New Brunswick (NJ)°: Rutgers University Press, 1995).

ANNEXES

A. Instituts de recherche engagés dans la chimie colloïdale 1900-1930

Le *Kolloid Zeitschrift* donne une bonne idée du profil des chercheurs engagés dans la chimie colloïdale, en particulier à travers leur affiliation institutionnelle. Cette revue scientifique, éditée en Allemagne à partir de 1906, est la première de son genre consacrée à ce domaine. L'examen de l'affiliation institutionnelle des auteurs des articles montre que la chimie colloïdale fédère un large spectre des sciences physiques et du vivant au début du siècle. La revue rassemble ainsi des contributions de laboratoires de physiologie, de minéralogie, de laboratoires industriels sur les caoutchoucs, les savons etc. mais aussi de département de physico-chimie et plus rarement de physique et de chimie organique. Entre 1906 et 1913, cette affiliation institutionnelle a été systématiquement établie ; lorsque les auteurs ne mentionnent pas leur affiliation, des recherches annexes ont été menées pour la déterminer. Cette liste des instituts et des laboratoires a été segmentée à travers 8 catégories, reflétant l'hétérogénéité du domaine des colloïdes. La figure A.1 donne les proportions de ces catégories d'instituts dans la part des publications de la revue. Les tables A.1 à A.8 listent ces instituts pour chaque catégorie. La table A.9 liste les instituts ou laboratoires qui se requalifient « colloïdes », indiquant une différenciation supplémentaire vis-à-vis des composantes des sciences physiques et du vivant que ce domaine des colloïdes rassemble initialement.

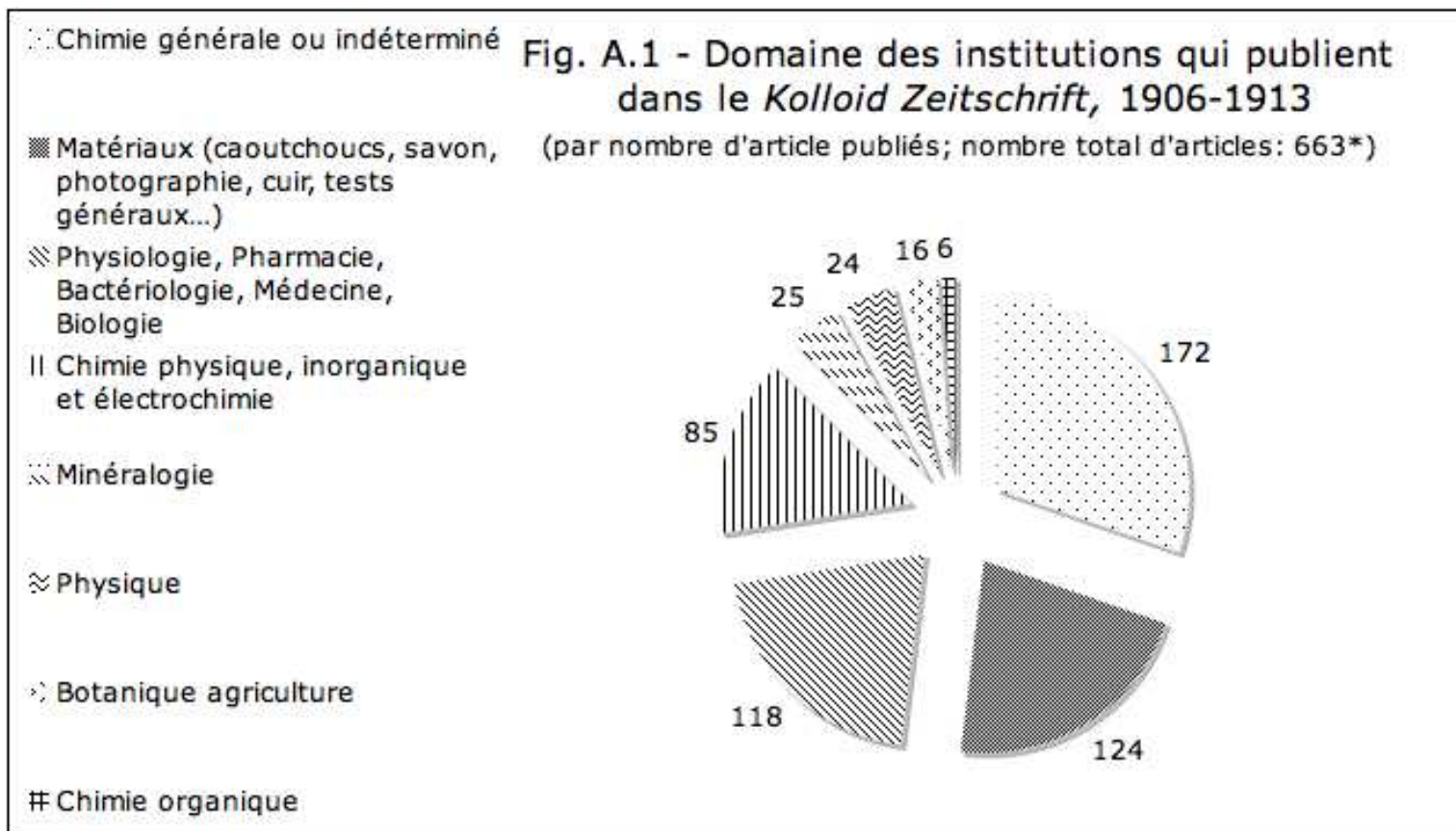


Figure A.1 — Domaine des institutions qui publient dans le *Kolloid Zeitschrift*, 1906-1913

* : le nombre total d'articles parus dans la revue entre 1906 et 1913 est supérieur à la somme des articles publiés par les instituts présentés, l'affiliation institutionnelle de certains auteurs n'ayant pas pu être établie

L'examen systématique s'est arrêté à 1913, avant le déclenchement de la Première Guerre mondiale, qui perturbe significativement les activités des chercheurs. 1913 est aussi l'année où le journal modifie son intitulé : le *Zeitschrift für Chemie und Industrie der Kolloide* est rebaptisé, plus simplement, *Kolloid zeitschrift*. Cette analyse quantitative des auteurs des articles montre que les sciences du vivant sont bien représentées et contribuent massivement à l'essor du journal. Les spécialités de la chimie sont également bien représentées ; au cours de cette période la différenciation des laboratoires de chimie s'accélère, et la toute jeune chimie physique contribue significativement à la revue, ainsi que la plus ancienne spécialité chimie inorganique. Le pays indiqué est le pays courant auquel est rattachée politiquement la ville de l'institut, qui n'est pas nécessairement le même qu'aujourd'hui . La catégorie chimie générale est assez problématique à interpréter, elle provient de laboratoires de chimie dont la spécialité n'est pas mentionnée, où dont les auteurs ont négligé de la mentionner. L'exemple de The Svedberg, qui parvient à instituer une composante chimie physique au sein de la faculté de chimie en 1918, suggère que cette catégorie est vouée à décliner, la spécialisation et différenciation au sein de la chimie étant une caractéristique de cette période. Même si l'affiliation des auteurs n'a pas été systématiquement établie après 1913, un examen rapide de la revue suggère que les proportions entre ces catégories restent à peu près les mêmes dans l'après Première Guerre mondiale et pour les années 1920.

Table A.1 — Chimie générale ou indéterminé (1906-1913)

| Institution | Ville | Nombre articles | Principaux auteurs |
|--|------------------------|-----------------|-------------------------------|
| Chem. Labor. d k. Berginstitutes Kaiserin Katharina II | St-Petersbourg (Russ.) | 47 | Peter P. von Weimarn |
| Institut de Chimie, Université | Upsala (Suède) | 19 | The Svedberg |
| Naturforschende Gesellschaft | Bâle (Sui.) | 16 | Fredrich Goppelsroeder |
| Chemisches Laboratorium der Kgl. Technischen Instituts | Crémone (Ita.) | 11 | N. Pappada |
| Chemisches Institut der Universität | Erlangen (All.) | 10 | Privatdozen Dr. Eduard Jordis |
| Laboratoire de Chimie Industrielle de l'Université | Lausanne (Sui.) | 10 | L. Pelet |
| Université de Kiev | Kiev (Ukr.) | 8 | Professeur Dr. A. Dumanski |
| Zentrales chem. labor. des Finanzministeriums | Moscou (Russ.) | 6 | Adam Rakowski |
| Institut Universitaire de chimie générale | Liège (Bel.) | 5 | Prof. Walter Spring |
| Realsehule St. Pauli | Odessa (Russ.) | 4 | P.N. Pawlow |
| Chemischen Laboratorium d. kgl. Akademie d. Wissench. | Munich (All.) | 3 | Dr. L. Vanino |

| Table A.1 (suite) | | | |
|---|------------------------------|---|---|
| | | 3 | Privatdozen Dr. R. Olivier Herzog & Lothar Wöhler |
| Chemische Institut d. technische Hochschule | Karlsruhe (All.) | | |
| Chemisches Institut der Technischen Hochschule | Darmstadt (All.) | 3 | J. D'aus & Lothar Wöhler |
| Labor. f. angewandte chemie der univ. | Leipzig (All.) | 3 | G. Lockeman & E. Nvassart |
| Chemische labor. der Bergakademie | Clausthal (All.) | 2 | Wilhelm Biltz & Hans Steiner |
| Chemische Labor. der Polytechnische Lehranstalt | Copenhagen (Dan.) | 2 | Knud Estrup & E. Buch Andersen |
| Municipal School of Technology | Manchester (U.K.) | 2 | William Harrison |
| Labor. der allgemeinen chemie der Berg- une Hütten-Hochschule | Iekaterinbourg (Russ.) | 2 | S. Tschumanoff |
| | | 2 | Emanuele Paterno & F. Medigreceanu |
| Chemisches institut der Kgl. Universität | Rome (Ita.) | | |
| Université d'Athènes | Athènes (Gre.) | 1 | Privatdozen Dr. Procopios Zacharias |
| Chemischen Laboratorium des Hofrathes Ad. Lieben an der k. k. Universität | Vienne (Aut.) | 1 | Assistant-professeur Dr. Jean Billitzer |
| Chemische Institut d. technische Hochschule | Breslau (All.) | 1 | Professeur Dr. Richard Abbeg |
| Laboratorium für allgemeine Chemie an der Technischen Hochschule | Graz (Aut.) | 1 | Julius Donau |
| Chemischen Universitätlaboratorium | Messine (Ita.) | 1 | Andrea Ricevuto |
| Chemical Department, University | Burmingham (U.K.) | 1 | Alexander Findlay |
| Chemischen Universitätlaboratorium | Vienne (Aut.) | 1 | H. Skraup |
| Labor. chimico centrale delle Gabelle | Rome (Ita.) | 1 | G. Armani & J. Barboni |
| Riga Polytechnic Institute | Riga (Russ.) | 1 | P. Walden |
| Technologische abteilung des chemisches universität | Leipzig (All.) | 1 | W. Döhle & B. Rassow |
| Chemisches Institut der Universität | Berne (Sui.) | 1 | V. Kohlschütter |
| Institut für Allgemeine Chemie | Padoue (Ita.) | 1 | B. L. Vanzetti |
| Labor. für allgemeine chemie des Polytechnikum | Varsovie (Russ., All., Aut.) | 1 | S. Glixelli |

| | | | |
|------------------------------------|------------------|---|--------------------|
| The University Chemical Laboratory | Cambridge (U.K.) | 1 | William A.R. Wilks |
|------------------------------------|------------------|---|--------------------|

172

Table A.2 — Matériaux (caoutchoucs, savon, photographie, cuir, tests généraux...) (1906-1913)

| Institution | Ville | Nombre articles | Principaux auteurs |
|--|-------------------------------|-----------------|--|
| Wissenschaftlichen labororium der Trockenplattenfabrik (laboratoire industriel de photographie) | Frankfurt am main (All.) | 37 | Henricus Lüppo-Cramer |
| Technische-wissenschaftlichen Laboratoriums für die Gummi- und Leim-Industrie (laboratoire industriel sur les gommes et les colldes) | Graz (Aut.) | 12 | Rudolf Ditmar |
| Research laboratories of the Diamond Rubber Company | Akron (USA) | 9 | D. Spence & J.H. Scott |
| Königlichen Material-prüfungsamt (laboratoire gouvernemental de test sur les matériaux) | Berlin-Lichterfelde (All.) | 8 | Diplom-Ingenieur Eugen Diess & F. Willy Hinrichsen |
| Laboratoire industriel de photographie | Dusseldorf (All.) | 7 | Raphael Eduard Liesegang |
| Industrie du coton (?) | Rouen (Fr.) | 5 | Ed. Justin-Mueller |
| Laboratoire industriel sur les savons | Breslau (All.) | 5 | Franz Goldschmidt |
| Firme Karl Zeiss, optique de précision | Iéna (All.) | 4 | Richard Zsigmondy & Henry Siedentopf |
| Labor. der Russian-American India Rubber Company | St-Petersbourg (Russ.) | 4 | B. Bysow |
| Königlichen Untersuchungsanstalt für Nahrungs- und Gesussmittel | Erlangen (All.) | 4 | C. Amberger |
| Laboratory of National Gum and Mica Company | New-York (USA) | 3 | Jerome Alexander |
| Gruppe Deutscher Kolonialwirtschaftlicher Unternehmungen (caoutchouc) | Victoria (Cameroun) | 3 | Ernst Fickendey |
| Industrie du papier | Londres (U.K.) | 3 | Clayton Beadle & Henry P. Stevens |
| Laboratoire industriel (?) | Furstenwalde sur Spree (All.) | 2 | Arthur Müller |

Table A.2 (suite)

| | | | |
|--|---------------------------|---|--------------------|
| | | 2 | Dr. Alois Herzog |
| Fachschule für Textile Industrie | Sorau (All., Aut., Russ.) | | |
| Laboratoire de la compagnie Max Fränkel & Runge | Spandau (All.) | 2 | Kai Bing |
| Institut für Mikroskopie | Iéna (All.) | 2 | H. Ambronn |
| Laboratorium von Dr. G. P. Drossbach & Co | Freiberg (All.) | 2 | Arthur Müller |
| Société Financière des Caoutchoucs | Selangor (Malaisie) | 2 | G. Stafford Whitby |
| Industrie du caoutchouc (?) | | 1 | Carl O. Weber |
| | | 1 | Oskar Heimstadt |
| Optisch-mechanischen Werkstätten (laboratoire industriel d'optique) | Vienne (Aut.) | | |
| | | 1 | Henry R. Procter |
| Department of applied chemistry, university (orienté sur l'étude du cuir) | Leeds (U.K.) | | |
| Labor. für Naphtaproductions-gesellschaft Gebr. Nobel | St-Petersbourg (Russ.) | 1 | L. Gurwitsch |
| Reichprüfungstant zur Forderung des Kautschukhandels un der Kautschukindustrie | Delft (Holl.) | 1 | A. von Rossen |
| Labor. des Staats-Kautschukprüfung-samts | Delft (Holl.) | 1 | F.G. Fol |
| Laboratoire de consultants sur le caoutchouc | Londres (U.K.) | 1 | Philip Schidrowitz |
| | | 1 | Michael Kutscherow |
| Chemisches Labor. des Instituts für Wegebau (travaux routiers) | St-Petersbourg (Russ.) | | |

Table A.3 — Physiologie, Pharmacie, Bactériologie, Médecine, Biologie (1906-1913)

| Institution | Ville | Nombre articles | Principaux auteurs |
|--|--------------------------|-----------------|---------------------------------------|
| Neurologisches Institut | Francfort (All.) | 14 | Raphael Ed. Liesegang |
| Oakland school of medicine, University of California | Oakland (USA) | 8 | Martin H. Fischer |
| Pathologischen laboratorium der Kaiserl. Instituts f. experimental Medizin. | St-Petersbourg (Russ.) | 6 | S.J. Levites |
| Physikalische-Chemische Abteilung, Département universitaire de biologie | Vienne (Aut.) | 6 | Wolfgang Pauli & Hans Handovsky |
| Table A.3 (suite) | Turin (Ita.) | 5 | Amedeo Herlitzka |
| Physiologisches Institut | | | |
| Kgl. Institut f. experimentelle Therapie (laboratoire officiel de test des serums) | Frankfurt am main (All.) | 4 | Dr. Heinrich Bechhold |
| Laboratorium als Physikochemisches abteilung der Medizinischen klinik | Kiel (All.) | 4 | Heinrich Schade |
| Physiological laboratory of University College | Londres (U.K.) | 4 | W. M. Bayliss |
| Chemisches-pharmazeutisches Institut | Bologne (Ita.) | 4 | M. Raffo |
| Rudolph Spreckels Physiological laboratory of the University of California | Berkeley (USA) | 3 | Jacques Loeb & T. Brailford Robertson |
| Institut Pasteur | Paris (Fra.) | 3 | Jacques Duclaux & Eugène Fouard |
| Hopital "am Urban", service de bactériologie | Berlin (All.) | 3 | Leonor Michaelis & P. Roma |
| Institut d. Pharmazeutichen Chemie a.d. Kgl. Universität | Parme (Ita.) | 3 | M. Raffo |
| Labor. des Hospitals Saint Joseph | Lublin (Russ.) | 3 | A. Galecki |
| Lister Institute of Preventive Medicine | Londres (U.K.) | 3 | Hariette Chick & Charles J. Martin |
| Chemischen abteilung des Pathologischen instituts der Universität | Berlin (All.) | 2 | C. Neuberg |
| Physiologischen Institut der K. Universität | Naples (Ita.) | 2 | Dr. G. Buglia |

| | | | |
|--|--|---|--|
| Table A.3 (suite) | | | |
| | Pavie (Ita.) | 2 | M. Ascoli |
| Institut für spezielle Pathologie, K. Universität Medizinischen Klinik | Vienne (Aut.) | 2 | O. Porges & E. Neubauer |
| Dermatologischen klinik und physikalischen Institut der Universität | Breslau (All.) | 2 | H.W. Fischer |
| Labor. für chemie und bakteriologie der Milch der Universität | Göttingen (All.) | 2 | Georg Wigner |
| Hygienischen Institut der Universität | Leipzig (All.) | 2 | P. Schmidt |
| Physiologischen Institut der Universität | Zurich (Sui.) | 1 | R. Höber & S. Chassin |
| Physiologisch-chemischen Institut | Strasbourg (All.) | 1 | K. Spiro & L.J. Henderson |
| Institut für allgemeine Pathologie der Universität | Naples (Ita.) | 1 | G. Galeotti & G. Giampaluno |
| Table A.3 (suite) | | | |
| | Vienne (Aut.) | 1 | Karl Landsteiner (Prix Nobel de médecine en 1930) |
| University Department of Pathological Anatomy | | | |
| Labo. F. Klinische chemie und Mikroskopie an der medizinischen klinik der Universität | Parma (Ita.) | 1 | L. Zoja |
| chemisch-biologischen Institut der Universität | Liverpool (U.K.) | 1 | D. Spence |
| Laboratorium der Zool. Station und dem Labor. für Experim. Physiologie der K. Universität | Naples (Ita.) | 1 | Prof. Filippo Botazzi |
| Department of experimental pathology, Cornell Medical College | New-York (USA) | 1 | B.H. Buxton |
| Department of Agriculture, Veterinary Bacteriological Division | Transvaal (Province britannique en Afrique du Sud) | 1 | Walter Frei |
| Medizinischen labor. | Zürich (Sui.) | 1 | Walter Frei |
| Labor. der Pharmazeutischen Schule | Bari (Ita.) | 1 | N. Castoro |
| Delft School of Microbiology | Delft (Holl.) | 1 | Martinus Willem Beijerinck (inventeur du mot "virus") |

| | | | |
|--|-------------------|-----|---|
| Biochemischen Labor. der Hochschule | Stockholm (Suède) | 1 | Erik Hägglund |
| Pharmazeutische institut der universität | Erlangen (All.) | 1 | Conrad Amberger |
| Neurologisches Institut der Universität | Vienne (Aut.) | 1 | Julius Bauer |
| Gerichtlich-Medizinesch Institut der univ. | Zürich (Sui.) | 1 | H. Zangger |
| Institut Universitaire d'Hygiène | Rome (Ita.) | 3 | Margherita Traube-Mengarini & Alberto Scala |
| Physiologischen Labor. der Reichuniversität | Groningue (Holl.) | 1 | Franz Bubanovi_ |
| Institut de Physiologie, Université Libre | Bruxelles (Bel.) | 1 | Maurice Philippson |
| Pharmakologisches Institut | Gottingen (All.) | 1 | S. Loewe |
| Neurologie clinique, Colentina Hospital (Universitaire) | Bucarest (Rou.) | 1 | Gheorghe Marinesco |
| Institut für vergleichende Anatomie der Kgl. Universität | Naples (Ita.) | 1 | Paolo Della Valle |
| Laboratoire de Physiologie, Université de la Sorbonne | Paris (Fra.) | 1 | Victor Henri |
| Department of Physiology, University | Oxford (U.K.) | 1 | Walter Ramsden & N.G. Chavassu |
| Department of Biochemistry, university | Liverpool (U.K.) | 1 | Benjamin Moore |
| Wellcome Physiological Research Labs | Londres (U.K.) | 1 | George Stanley Walpole |
| Pharmakologisches Institut der K. Universität | Padoue (Ita.) | 1 | L. Sabbatini |
| Institut f. Infekt. chemische abteilung | Berlin (All.) | 1 | M. Paucke |
| Istituto di Chimica farmaceutica, Kgl. Universität | Turin (Ita.) | 1 | Icilio Guareschi |
| Table A.3 (fin) | | 118 | |

Table A.4 — Chimie physique, inorganique et électrochimie (1906-1913)

| Institution | Ville | Nombre articles | Principaux auteurs |
|--|------------------|-----------------|---------------------------------------|
| Physikalische-Chemische Institut, universitaire | Leipzig (All.) | 31 | Wolfgang Ostwald & Herbert Freundlich |
| Institut für Elektrochemie und Technische Chemie der Technische Hochschule | Stuttgart (All.) | 22 | Paul Rohland & Erich Müller |

| | | | |
|---|-----------------------|---|---|
| Musspratt university laboratory of physical- and electro-chemistry | Liverpool (U.K.) | 4 | F.G. Donnan & W.C.C. Lewis |
| Anorganische abteilung der Chemischen labororium der Universität | Tubingue (All.) | 3 | E. Wedekind |
| Elektrochemisches Laboratorium der Kgl. Technischen Hochschule | Charlottenburg (All.) | 2 | Kurt Arndt & E. Groschuff |
| Labor. für Elektrochemie und Physikalische-chemie der Kgl. Hochschule | Dresde (All.) | 4 | Alfred Lottermoser |
| Physikalische-Chemische labor. der universität | Londres (U.K.) | 1 | William C.C. Lewis |
| Anorganische abteilung der Chemischen Anstalt der Universität | Bâle (Sui.) | 1 | Fr. Fichter |
| Institut für anorganische chemie | Göttingen (All.) | 5 | Richard Zsigmondy & Elizabeth Stevenson |
| Anorganische abteilung des chemisches univ. | Strasbourg (All.) | 1 | E. Wedekind |
| Labor. für Anorganische chemie der Technischen Hochschule | Delft (Holl.) | 4 | W. Reinders |
| Allgemeine und anorganische Chemie, Technischen Hochschule | Graz (Aut.) | 1 | Julius Donau |
| Labor. für anorganische chemie der univ. | Heidelberg (All.) | 1 | Erich Ebler |
| Labor. für Elektrochemie, Chemisches Institut der Universität | Erlangen (All.) | 3 | Alexander Gutbier |
| Physikalische-Chemische Institut der Technischen Hochschule | Brunswick (All.) | 2 | H. Freundlich |

Table A.4 (suite)

Table A.5 — Minéralogie (1906-1913)

| Institution | Ville | Nombre articles | Principaux auteurs |
|---|---------------|-----------------|-------------------------------|
| Montanistische Hochschule (minéralogie) | Loeben (Aut.) | 10 | Felix Cornu |
| Département de minéralogie | Graz (Aut.) | 7 | Prof. Cornelio August Doelter |
| Mineralogisches Institut der Universität | Vienne (Aut.) | 3 | E. Dittler & H. Michel |
| Mineralogisches Institut der Universität | Berlin (All.) | 1 | Kurd Endell |
| Département de minéralogie, Université | Gand (Bel.) | 1 | Alfred Schoep |
| Labor. de minéralogie | Paris (Fra.) | 1 | J. Gaube du Bers |
| Mineralogisches Institut Eidgenössische Technische Hochschule | Zurich (Sui.) | 1 | Paul Niggli |
| Zusammen-arbeiten von Mineralogie und allgemeiner Chemie | Iéna (All.) | 1 | Robert Marc |
| | | 25 | |

Table A.6 — Physique (1906-1913)

| Institution | Ville | Nombre articles | Principaux auteurs |
|--|-------------------|-----------------|---------------------------|
| Physical Laboratory of Sir John Cass Technical Institute | Londres (U.K.) | 16 | Emil Hatschek |
| Department of Physics, Brown University | Providence (USA) | 2 | C. Barus |
| Institut für Radium Forschung | Vienne (Aut.) | 2 | Fredriech A. Paneth |
| Département de physique, université | Greifswald (All.) | 1 | Professeur Dr. Gustav Mie |
| Physikal. Inst. d. Univ | Munich (All.) | 1 | Albert Neugschwender |
| Physikalisches Institut der Universität | Stockholm (Suède) | 1 | Carl Benedicks |
| Physikalischen Institut, Universität | Erlangen (All.) | 1 | Fr. Hauser |
| | | 24 | |

Table A.7 — Botanique, agriculture (1906-1913)

| Institution | Ville | Nombre articles | Principaux auteurs |
|--|--------------------|-----------------|------------------------------|
| Département de botanique, université | Lausanne (Sui.) | 5 | Jules Amann |
| Institut für Pflanzenproduktionslehre der Universität (Institut de production des plantes) | Breslau (All.) | 4 | Paul Ehrenberg |
| Institut für Pflanzenchemie und Holzforschung | Dresde (All.) | 2 | H. Wislicenus |
| Experimental Fruit Farm | Woburn (U.K.) | 1 | Spencer Umfreville Pickering |
| Agrikulturchemischen Laboratorium der Landwirtschaftlichen Hochschule | Wageningen (Holl.) | 1 | Johannes H. Abersson |
| Biologischen Reichsanstalt für Land- und Forstwirtschaft der Universität (botanique) | Halle (All.) | 1 | Wilhelm Ruhland |
| Botanisches Labor. der Universität | Kazan (Russ.) | 1 | W.W. Lepschkin |
| Département de botanique, université | Bonn (All.) | 1 | Ernst Küster |

Table A.8 — Chimie organique (1906-1913)

| Institution | Ville | Nombre articles | Principaux auteurs |
|--|------------------|------------------------|-----------------------------|
| Institut für Organische Chemie der Technischen Hochschule | Darmstadt (All.) | 3 | Carl G. Schwalbe |
| Organischen laboratorium der Technischen Hochschule | Dresde (All.) | 1 | Alfred Lottermoser |
| Organisches-chemisches Technologie an die Technischen Hochschule | Prague (Aut.) | 1 | Georg von Georievics |
| Labor. für Organische chemie der Technischen Hochschule | Delft (Holl.) | 1 | J. Böeseken & H.J. Waterman |
| | | 6 | |

| Institut/laboratoire | Ville | Directeur | Année |
|---|---|----------------------|-------|
| Institut für Kolloidforschung | Francfort (All.) | Heinrich Bechhold | 1917 |
| Forschungsinstitut für technischen Kolloidchemie | Vienne (Aut.) | F. Sekera | 1922 |
| Kolloidchemischen labor. des Polytechnischen Institut | Ivanovo (ex. Ivanovo-Voznessensk), URSS | N. P. Peskoff | 1923 |
| Dispersoidologisches labor., Universität | Riga (Lettonie) | A. Janek | 1923 |
| Kolloidbiologischen Station am Eppendorfer Krankenhaus | Hambourg (All.) | F.-V. von Hahn | 1924 |
| Laboratorium für Kolloidforschung der Landwirtschaftlichen Hochschule | Kharkov (Ukraine soviétique) | P. P. Kosakewitsch | 1924 |
| Dispersoidologische abteilung, labor. für physikalische-chemie der Kaiserlichen Universität | Osaka (Jap.) | Peter P. von Weimarn | 1925 |
| Labor. für Kolloidchemie, Technischen Hochschule | Dresde (All.) | Alfred Lottermoser | 1925 |
| Institut für Biochemie und Kolloidchemie der Hebraïschen Universität | Jerusalem (Israël) | Andor Fodor | 1925 |
| Labor. für Kolloidchemie, landwirtschaft Institut | Voronezh (URSS) | A. V. Dumanski | 1926 |
| Institut für medizine Kolloidchemie, Universität | Vienne (Aut.) | Wolfgang Pauli | 1926 |
| Abteilung für Kolloidchemie, physikalische-chemie institut der universität | Leipzig (All.) | Wolfgang Ostwald | 1927 |
| Labor. für Kolloidchemie des Uraler Polytechnisches Institut | Iekaterinbourg (ex. Sverdlovsk), URSS | S. G. Mokruschin | 1927 |
| Kolloidchemischen Labor., Technischen Hochschule | Berlin-Charlottenburg (All.) | Isidor Traube | 1927 |
| Labor. für Kolloidchemie der Universität | Saint-Petersbourg (ex. Leningrad), URSS | I. I. Schukoff | 1928 |
| Kolloidchemischen Labor. des Karpov-instituts für chemie | Moscou (URSS) | E. Laskin | 1928 |
| Laboratory of colloid chemistry, sir John Cass Technical Institut | Londres (U.K.) | Emil Hatschek | 1928 |
| Kolloidchemischen Labor. der Metallgesellschaft A.G. | Francfort (All.) | E. A. Hauser | 1928 |

Table A.9 — Instituts ou laboratoires définis sur l'étude des colloïdes et leur année d'implantation, 1900-1930

Cette liste est établie sur la base de l'affiliation institutionnelle fournie par les auteurs du *Kolloid Zeitschrift*. Il est possible que d'autres laboratoires alignés sur les colloïdes aient été institués entre 1900 et 1930, sans qu'ils soient mentionnés dans la revue

B. Classifications des colloïdes élaborées par Ostwald et Staudinger

Wolfgang Ostwald a contribué à bouleversement significatif de la compréhension des colloïdes, en les définissant comme une composante des « dispersoïdes », une classe des systèmes dispersés, plutôt que par opposition aux « cristalloïdes », selon le schéma classificatoire de Graham un demi-siècle plus tôt. Dans cette nouvelle acception, les colloïdes sont des systèmes hétérogènes, constitués d'une phase microscopiquement dispersée au sein d'une phase continue (Table B.1). La transition entre les dispersions grossières et les dispersions colloïdales d'une part, puis entre les dispersions colloïdales et les moléculaires d'autre part, est déterminée par la taille des particules dispersées (Fig. B.1).

Comme exposé au chapitre 1, Staudinger s'est largement approprié cette redéfinition des colloïdes afin de mener son propre programme sur les macromolécules. Sa focalisation sur les propriétés de viscosité des colloïdes organiques l'amène cependant à rejeter le paramètre taille comme critère de classification, et à adopter le paramètre forme de la particule (linéaire vs. sphérique) comme critère de classification. Le nombre d'atomes de la particule ou de la molécule est substitué à la taille de la particule pour distinguer les colloïdes des dispersions grossières ou à bas poids moléculaire (tables B.1 & B.2). Il est aussi intéressant de remarquer que Staudinger classe les colloïdes en fonction d'un spectre « naturel-artificiel », et reprenant les catégories développées par l'industrie chimique pour distinguer les fibres textiles (« naturelles », « semi-synthétiques », « synthétiques ») (table. B.3)

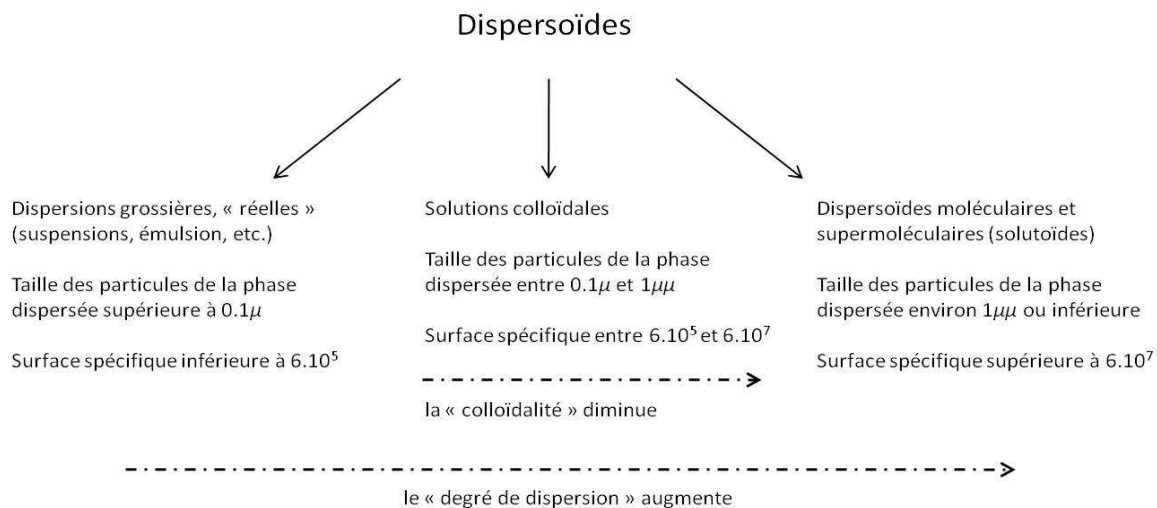


Figure B.1 — Classification des « dispersoïdes » selon Wolfgang Ostwald, élaborée au cours des années 1900
Inspirée de Ostwald, *A handbook of colloid-chemistry*, 1919, p. 53 [1^{ère} édition allemande, 1909]

| | | Phase continue | | |
|-----------------|---------|--|------------------------------|---------------------|
| | | gaz | liquide | solide |
| Phase dispersée | gaz | aucun (miscibilité d'un gaz sur l'autre) | mousse | aérogel |
| | liquide | aérosol liquide (ex. : brume) | émulsion (ex.: mayonnaise) | gel* (ex.: fromage) |
| | solide | aérosol (ex.: fumée) | sol* (solutions colloïdales) | sol solide |

Table B.1 — Classification des colloïdes selon l'état physique (solide, liquide, gaz) de la phase dispersée et de la phase continue

Ostwald, *Ibid.*, p. 43. Les termes marqués d'une astérisque (sol et gel) ont été inventés par Thomas Graham au milieu du 19^e siècle

| | |
|----------------------------------|--|
| Dispersions grossières | Particules composées de plus de 10^9 atomes, ne passent pas à travers les filtres à papier et sont visibles microscopiquement |
| Colloïdes | Particules composées de 10^3 à 10^9 atomes, passent à travers les filtres à papier, ne peuvent pas être résolues microscopiquement et ne peuvent pas être séparées par dialyse |
| Dispersions de petites molécules | Particules composées de 2 à 10^3 atomes, ne peuvent résolues microscopiquement, diffusent et dialysent rapidement. Les molécules ou les ions de substances uniformes sont identiques en structure et en taille |

Table B.2 — Classification des dispersions, en fonction du nombre d'atomes des particules, selon Staudinger

Source : *Staudinger Nobel Lecture* (1953), p. 402

| | Comportement au milieu de dispersion | Charge électrique | Viscosité des solutions | Exemple |
|--|--------------------------------------|-------------------|--|---|
| Colloïdes dispersoïdes | lyophobe | chargé | faible | sucre dans le benzène; huiles dans l'eau |
| Colloïdes micellaires (formés par l'agrégation de petites molécules) | lyophile | peu chargé | forte | savons dans l'eau |
| Colloïdes moléculaires (solutions de substances macromoléculaires) | lyophile | chargé ou non | faible: sphéro-colloïdes; forte: colloïdes linéaires | glycogènes, protéines; cellulose, protéines |
| Associations macromoléculaires | lyophile | chargé ou non | faible ou forte | protéines, bio-colloïdes |

Table B.3 — Classification des colloïdes organiques de Staudinger reliant la viscosité à la taille et la forme des particules dispersées
Source : *Ibid.* p. 403

| | |
|--|---|
| Substances naturelles | Hydrocarbures - caoutchouc, goutte-perche |
| | Polysaccharides - cellulose, amidon, glycogènes, pectines, acides polyuroniques, chitine |
| | Polynucléotides (acides nucléiques) |
| | Protéines et enzymes |
| | Lignine et tanins (transition des substances de petites aux macromolécules) |
| Produits de conversion des substances naturelles | Caoutchouc vulcanisé, rayonne, cellophane, nitrate de cellulose, cuir, lanital (textile de laine), galalithe |
| Matériaux synthétiques | Plastiques formés par: polymérisation (ex.: polystyrène); polycondensation (ex.: bakelite, nylon, perlon, terylène); polyaddition (ex.: polyuréthane) |

Table B.4 — Classification des substances macromoléculaires du naturel au synthétique selon Staudinger
Source : *Ibid.* p. 399

C. Instrumentation et compétences physiques au département de Chimie de Du Pont, vers 1931

| Appareil | Personnel qualifié |
|--|--|
| Colorimetry of solutions | J.B. Nichols |
| Microphotometry | |
| Polarizing microscope | G.H. Cameron |
| Index of refraction of liquids | W.H. Carothers; E.O. Kraemer; G.R. Sears |
| Index of refraction of powders | G.H. Cameron |
| Ultra-microscope | E.O. Kraemer |
| Polarimeter | W.H. Carothers |
| Measurement of electrical capacity | J.B. Miles |
| Measurement of high resistance | H.B. DeVore |
| Resistance measurements | J.B. Miles |
| Electrical sputtering | H.B. DeVore |
| Electro-deposition | J.W. Stillman |
| Concentration in solution by X-ray absorption | A.W. Kenney; G.H. Cameron |
| Adsorption from vapor & solution | G.R. Sears |
| Power factor in liquids at radio frequency | J.B. Miles |
| Measurement of low vapor pressures | H.G. Tanner |
| Molecular still | W.H. Carothers |
| Measurement of tensile strength and elongation | G.L. Schwartz |
| Measurement of viscosity of liquids | J.W. Stillman; E.O. Kraemer |
| Dead-weight pressure gage, 0.01%, 1000 atmospheres | H. Worthington |
| Effect of pressure on solids and liquids boiling above -30°C | H.W. Starkweather |
| Thermal expansion of films and wires | W.D. Lansing |
| Ultracentrifuge (particle size) | J.B. Nichols |
| Specific gravity of liquids and solids; including powders | J.W. Stillman |
| X-ray | A.W. Kenney; G.H. Cameron |
| Hardness of films | J.W. Stillman |
| Adhesion tension | G.D. Patterson |
| Hiding power (cryptometer) | H.B. DeVore |
| Reflection factors for white surfaces | ' |
| Absorption of visible and ultra-violet light in liquids and solids | ' |
| Nephelometer (measurement of haze) | F.C. Hahn |
| Obscuring power | J.B. Nichols |

Table C.1 — “Apparatus available for physical measurements”

Liste établie par A.W. Kenney (« Specialized experience and training in physics », 28 janvier 1931, GDP 11/Physics Committee 1930-1932)

| Light | | Heat | | Electricity & magnetism | | Chemical physics | |
|------------------------------|---|-----------------------------------|---|---|---|----------------------------------|---|
| Domaine | personnels | Domaine | personnels | domaine | personnels | domaine | personnels |
| Absorption | Nichols; DeVore | Calorimetry | Perry (specific heat); Faughen (spec. Heats) | Conduction & resistance | Lansing; Miles | Adsorption | Perry (gases on gels); Stockhardt; Lenher; Starkweather; Tanner; Taylor, G.B.; Patterson & assistants |
| Diffraction & Scattering | Nichols (scattering); DeVore; Kraemer (Tyndall effect); Hahn (haze measurement) | Conduction | Colburn (Heat transfers) | Dielectric & capacity | Miles (electric moments of molecules) | Alloys | Conaway; Kenney (from x-ray standpoint) |
| Interference | DeVore (application to measurement) | Optical data & equations of state | Perry (specific heat); Faughen (spec. Heats) | Discharge in gases & in vacuo | Lansing (cathodic sputterin) | Batteries & Cells | H.S. Young |
| Microscopy | Kraemer (ultra-microscope); Heckert (photomicrography) | Melting & boiling points | Lehner | Electric circuits & networks | Kenney; Bailey (radio circuits); Miles; Kirby; DeVore (amplifying circuits) | Chemical equilibrium & reactions | Edison; Taylor, G.B.; Perry; Lenher |
| Photography & photochemistry | Nichols (theory of photography); DeVore (photography & photolysis); Lenner (photochemistry) | Temperature & measurement of | Worthington; Vaughen Starkweather; Perry; Colburn | Electromagnetism & electromagnetic theory | Miles | Colloids | Nichols (particle size of colloids); Kraemer |

Table C.2 — Compétences spéciales en physique chez Du Pont, vers 1930

Source : *Ibid.*

D. Composition des groupes des colloïdes et de physique de Du Pont

- Groupe des colloïdes, 1928-1938

| 1928 | fin 1930 | fin 1933 | mi- 1935 | fin 1937 |
|----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| E. O. Kraemer (dir.) | E. O. Kraemer | E. D. Bailey | E. D. Bailey | E. D. Bailey |
| R. V. Williamson | J. B. Nichols | M. C. Holland | M. C. Holland | E. O. Kraemer |
| J. B. Nichols | G. R. Sears | E. O. Kraemer | E. O. Kraemer | J. B. Nichols |
| G. R. Sears | E. D. Bailey | W. D. Lansing | W. D. Lansing | H. G. Tanner |
| Victor Cofman | J. B. Miles | J. B. Miles | J. B. Miles | E. S. Wilkins |
| | W. B. Kunz | J. B. Nichols | J. B. Nichols | C. E. Willoughby |
| | O.E. Schupp | E. S. Wilkins | ?? Watson | |
| | C. E. Willoughby | T. L. Williams | E. S. Wilkins | |
| | | C. E. Willoughby | T.L. Williams | |
| | | | C. E. Willoughby | |

Table D.1 — Personnel sous la direction de Elmer Kraemer, constituant le groupe des colloïdes entre 1928 et 1938
 Source : Chemical department organizational charts & staff, 1929-1940, SCS 3/CRD Organization charts; et Kraemer à Tanberg, 17 aout 1932, JBN 4/Quarterly reports colloid group

- Groupe de physique, 1928-1943

| 1928 | 1930 | fin 1933 | mi-1935 | début 1939 | début 1943 | début 1943 (suite) |
|-------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
| A.W. Kenney | G. H. Cameron (dir.) | G.D. Patterson (dir.) | G.D. Patterson (dir.) | G.D. Patterson (dir.) | G.D. Patterson (dir.) | ?? Dietrich |
| | A.W. Kenney | W. H. Aughey | W. H. Aughey | W. H. Aughey | W. H. Aughey | J. R. Downing |
| | W. H. Aughey | ?? Greager | J. H. Peterson | E. D. Bailey | E. D. Bailey | W.V. Freed |
| | | W. W. Heckert | O. E. Schupp | J. B. Nichols | J. B. Nichols | ?? Graham |
| | | A.W. Kenney | C. K. Sloan | O. E. Schupp | C. K. Sloan | ?? Hoehn |
| | | J. H. Peterson | A.W. Kenney | C. K. Sloan | C. E. Willoughby | ?? Johnson |
| | | ?? Shutt | ?? Goebel | I. F. Walker | C. K. Sloan | ?? Nicoll |
| | | C. K. Sloan | ?? Greager | ?? Wende | A.W. Kenney (au MIT) | ?? Pratt |
| | | | W. W. Heckert | A.W. Kenney | I. F. Walker | ?? Prichard |
| | | | | J. H. Baldt | T.A. Bither | ?? Rouse |
| | | | | | | J. H. Werntz |

Table D.2 — Personnel sous la direction de Gordon Patterson, constituant le groupe de physique (à partir de 1933)

Cases mises en relief : anciens membres du groupe des colloïdes. Le groupe de physique ne va cesser de s'agrandir dans l'après-guerre, et devient la division « physique et analyse » en 1955, dont Patterson prend la tête en 1958 . Source : Chemical department organizational charts & staff, 1929-1940, SCS 3/CRD Organization charts

E. Projets de recherche « fondamentaux » des groupes des colloïdes et de physique

Table E.1 — Projets fondamentaux sur les pigments (dépenses en dollars courants)

| Titre | Durée | Dépenses (\$) | Dépenses prélevées sur les fonds du groupe: |
|---|-----------|---------------|---|
| Particle size - Colloidal hydrous oxides | 1931-1932 | 9347 | Colloïdes |
| Particle size of carbon black | 1932 | 140 | Colloïdes |
| Colloid aspects in formation of titanium pigments | 1933 | 8113 | Colloïdes |
| Optimum particle size of pigments & influence of refractive index | 1933-1934 | 8005 | Colloïdes |
| Calcination of titanium pigments | 1933-1934 | 3716 | Colloïdes |
| Ultracentrifugal analysis of colored pigments | 1934-1935 | 5516 | Colloïdes |
| Particle size of emulsions | 1934-1935 | 3960 | Colloïdes |
| Correlation of practical properties of white pigments and particle size & refractive index of the pigment | 1934-1935 | 7735 | Colloïdes |
| Preparation of fine particle size lead chromate | 1935 | 2297 | Colloïdes |
| Physical study of copper phthalocyanine | 1936-1937 | 2873 | Colloïdes |
| Special expense on particle size of pigments | 1938 | 2365 | Colloïdes |
| Color measurement of pigments | 1934-1936 | 6276 | Physique |
| Fundamental study of hiding power | 1930-1933 | 19471 | Physique |
| Particle size - lithopone | 1929-1930 | 7064 | Physique |
| Particle size - Titanium oxides | 1929-1931 | 3145 | Physique |
| Visible and infrared absorption of pigments | 1935-1936 | 5149 | Physique |
| Particle size of black pigments | 1935-1936 | 3447 | Physique |
| Refractive index and optimum pigment characteristics of titanium pigments | 1936 | 1721 | Physique |
| Influence of refractive index of pigments upon the maximum attainable tinting strength & hiding power | 1936-1937 | 3174 | Physique |
| Adaptation of photoelectric cell to measurement of hiding power | 1930-1932 | 7920 | Physique |
| Fundamental study of the conversion of anatase to rutile | 1938-1940 | 11158 | Physique |
| Fundamental study of light resistance of dry colors | 1931-1932 | 672 | Inorganique* |
| Relationships between crystal structure and methods of preparation of pigments | 1932 | 2183 | Inorganique |
| | | total: 125447 | *: composante du groupe de chimie physique à partir de 1931 |

Table E.2 — Projets fondamentaux du groupe des colloïdes (dépenses en dollars courants)

| Titre | Durée | Dépenses (\$) |
|---|-----------|---------------|
| General colloid science | 1927-1938 | 34369 |
| Plasticity of colloids | 1930-1931 | 35406 |
| Colloidal behavior of nitrocellulose | 1930-1932 | 38631 |
| Dielectric properties of sols & gels | 1930-1931 | 16824 |
| Effect of acids on the viscosity of nitrocellulose dispersions | 1930-1931 | 16149 |
| Mechanical properties of plastic organo-solids | 1931-1936 | 17511 |
| Plasticity work by Dr. Marcus Reiner at Lafayette College | 1931-1932 | 2000 |
| Colloidal behavior of viscose | 1931-1934 | 25700 |
| Development & application of ultracentrifuge | 1927-1937 | 55082 |
| Particle size - Colloidal hydrous oxides | 1931-1932 | 9347 |
| Ultracentrifugal analysis of rayons | 1931-1933 | 7091 |
| Development of air-bearing centrifuge | 1931-1932 | 966 |
| Particle size of carbon black | 1932 | 140 |
| Colloid aspects in the formation of titanium pigments | 1933 | 8113 |
| Ultracentrifugal analysis of cellulose | 1933 | 736 |
| Ultracentrifugal analysis of cellulose derivatives | 1933-1937 | 15942 |
| Optimum particle size of pigments and influence of refractive index | 1933-1934 | 8005 |
| The calcination of titanium pigments | 1933-1934 | 3716 |
| Ultracentrifugal analysis of synthetic high molecular weight material | 1934-1937 | 4077 |
| Ultracentrifugal analysis of colored pigments | 1934-1936 | 5516 |
| Particle size of emulsions | 1934-1936 | 3960 |
| Correlation of the practical properties of white pigments and the particle size & refractive index of the pigment | 1934-1936 | 7735 |
| Preparation of fine particle size lead chromate | 1935-1936 | 2297 |
| Homogeneity of cellulose | 1936-1937 | 6064 |
| Homogeneity of cellulose acetate | 1936-1937 | 2932 |
| Physical study of copper phthalocyanine | 1936-1937 | 2873 |
| Molecular weight & homogeneity of "DuPrene" and rubber | 1936-1937 | 6651 |
| Special expense in connection with work on particle size pigments | 1938 | 2365 |
| Elastic rayon | 1933-1936 | 8999 |

total: 349197

Table E.3 — Projets fondamentaux du groupe de physique (dépenses en dollars courants)

| Titre | Durée | Dépenses (\$) |
|---|-----------|---------------|
| Color measurement of pigments | 1934-1936 | 6276 |
| Fundamental study of hiding power | 1930-1933 | 19471 |
| X-ray work | 1927-1939 | 65709 |
| Application of X-ray technique to nitrocellulose | 1927-1928 | 142 |
| Improvement in design of X-ray tube | 1930 | 153 |
| X-ray determination of particle size | 1931 | 22 |
| X-ray study of cellulose derivatives | 1931-1932 | 2065 |
| Particle size - lithopone | 1929-1930 | 7064 |
| Particle size - titanium oxides | 1929-1931 | 3145 |
| Photochemical deterioration | 1928-1930 | 18215 |
| Photochemical decomposition of nitrocellulose | 1931 | 84 |
| Photochemical decomposition of simple organic compounds | 1931 | 32 |
| Physical structure of 66 polymers | 1938-1940 | 2270 |
| Improvement of resilience of fiber 66 fabrics | 1938-1940 | 7146 |
| Treatments for nylon | 1938-1939 | 4426 |
| Surface friction of nylon fibers | 1938-1939 | 1248 |
| Nylon woven fabrics | 1938-1939 | 3247 |
| Factors affecting resilience of worsted-type fabrics | 1939-1941 | 12207 |
| Physical study of nylon | 1939-1940 | 2840 |
| Physical properties of polyamides | 1939-1943 | 2387 |
| Supertenacity nylon | 1940 | 2901 |
| Crystallization inhibitors for nylon | 1941 | 5959 |
| Resilience of staple fabrics | 1941-1944 | 11426 |
| General physical research | 1929-1938 | 49047 |
| Development of optical methods | 1931-1932 | 4296 |
| General physical research for 1938 | 1938 | 2788 |
| General physical research for 1939 | 1939 | 7110 |
| General physical research for 1940 | 1940 | 11264 |
| Infrared spectroscopy | 1940-1942 | 13612 |
| General physical research for 1941 | 1941 | 11214 |
| Cyclotron | 1941 | 1103 |
| General physical research for 1942 | 1942 | 9586 |
| General physical research for 1943 | 1943 | 16997 |
| General physical research for 1944 | 1944 | 24201 |
| Contribution to American Institute of Physics | 1934 | 675 |
| Application of the polerograph to analysis | 1939 | 0 |
| Investigation of the chromatic method as an analytical technique | 1939-1941 | 609 |
| Characterisation methods for high polymers | 1944 | 1093 |
| Visible and infrared absorption of pigments | 1935-1936 | 5149 |
| Particle size of black pigments | 1935-1936 | 3447 |
| The refractive index and optimum pigment characteristics of titanium pigments | 1936 | 1721 |

| | | |
|---|-----------|-------|
| Influence of refractive index of pigments upon the maximum attainable tinting strength and hiding power | 1936-1937 | 3174 |
| Study of the photoelectric effect in nitrocellulose | 1929-1930 | 657 |
| Physical structure of cellulose derivatives | 1935-1936 | 7793 |
| Symposium at Princeton on catalysts and photochemistry | 1929 | 1500 |
| Reactions in condensed systems | 1930-1932 | 14600 |
| Adaptation of photoelectric cell to measurements of hiding power | 1930-1932 | 7920 |
| Homogeneous reactions - kinetics or organic polymerizations | 1930-1931 | 7324 |
| Homogeneous reactions - oxidation of unsaturated hydrocarbons | 1930-1931 | 26756 |
| reactions of unsaturated hydrocarbons | 1931 | 2837 |
| Miscellaneous physical chemistry | 1929-1931 | 4890 |
| Tetrafluoroethylene polymers for electrical uses | 1942-1944 | 16786 |
| Super-pressure reactions | 1934 | 2461 |
| Physical conditioning of the viscose rayon | 1940-1942 | 8990 |
| Fundamental study of the conversion of anatase to rutile | 1938-1940 | 22493 |

total: 470528

Table E.4 — Total des dépenses pour les 4 groupes du programme fondamental, entre 1927 et 1944 (en dollars courants)

| groupe | dépenses (1000 \$) |
|-------------------|--------------------|
| Chimie colloïdale | 350 |
| Chimie organique | 3026 |
| Physique | 471 |
| Chimie physique* | 348 |

* se scinde administrativement en 1931 en deux groupes: catalyse et chimie inorganique

Source : L. G. Wise & N.G. Fisher, « History, activities and accomplishments of fundamental research in the chemical department of the Du Pont company, 1926-1939 inclusive^o », 14 aout 1940; —, «^oFundamental research expenditures, years 1927-1944 inclusive^o », CRD 21/History Fundamental Research

F. Tests de force de teinture et de pouvoir couvrant au début du XX^e siècle

- Le test de force de teinture quantitatif au début des années 1920

Test pour mesurer la force du noir de carbone, tel que décrit par les chimistes du Bureau des Mines R.O. Neal et G. St. J. Perrot au début des années 1920. Test décrit dans leur monographie *Carbon black – its manufacture, properties, and uses* (Washington D.C., Government Printing Office, 1922, pp. 62-3)

«

According to the American Society for Testing Materials, tinting strength is « the power of coloring a given quantity of paint or pigment selected as a medium or standard for estimating such power ». Tinting strength, then, as applied to carbon blacks is the measure of the ability of the black to impart a color to a definite weight of standard white. It depends on the size of the particles and on the specific gravity of the black. In testing, the black is always compared with a standard black.

In making the test, weight out accurately on a sensitive balance 0.100 gram of the black to be tested and 10.0 grams of a standard zinc white kept especially for the purpose. Transfer to a glass or marble slab and add from a burette exactly 3.5 c.c. refined linseed oil. Mix with a palette knife and rub out thoroughly with the palette knife, or better with a glass muller, until no streakiness or difference of color is observed when successive small portions are spread on a clean piece of window glass and viewed from the upper side. It is important that the rubbing out be thorough ; 10 minutes is usually time enough for it. Follow the same procedure with the standard black. Then spread a small amount of each mix side by side on a clean glass, as a microscope object glass. Examination of the samples from the other side of the glass, particularly on the lines where they overlap, will show the difference in tinting strength.

To make a quantitative estimation of the tinting strength of the sample as compared to the standard, more white is added to the stronger mix until the colors match. A new sample of the stronger black is then weight out, using the calculated amount of zinc white, and the process is repeated until mixes of the same color are obtained. If, for example, it was necessary to mix 15 grams of zinc white with 0.1 gram of the standard to match a mixture of 10 grams zinc white and 0.1 gram of the sample, then the sample has $66^{2/3}$ per cent the strength of the standard.

°»

- Le test de pouvoir couvrant tel que développé par Pfund en 1919

Issu de A.H. Pfund, « The hiding power of white pigments and paints^o », *Journal of the Franklin Institute*, vol. 188 (1919), pp. 675-681

« The object of this investigation is to present a method which will yield numerical values of the true hiding power of white pigments and paints. The basic idea underlying this discussion is this: granting that an indefinitely thick layer of paint will “hide” a given background completely, it is sought to find the thinnest layer which will hide the background as effectively as does the infinitely thick layer. Obviously, the thinner the layer of paint required, the greater is the hiding power of the paint. For white paints, the severest test met with in practice is a white wall with black lettering. It is desired to obliterate the lettering by covering the entire surface with successive coats of paint. These conditions are simulated in the instrument about to be described.

The form given the instrument is shown in Fig. 1 [Fig. F.1] Here A is a plate of glass 14*5*.6 cm. whose upper surface is optically flat. The lower surface is coated with black baking-enamel, which yields the desired black background. A transverse groove, B, about 2 mm. deep and 1 cm. wide, is cut in the upper surface and a millimeter scale is etched, as shown in the drawing. Resting upon plate A is plate C (7*3.5*.6 cm), whose surface is likewise optically flat. A strip of thin steel, D, 0.45 mm. thick, is attached to C, so that a wedge-shaped layer of white paint may be formed between the plates. This wedge terminates abruptly at the “infinitely thick” layer, B, and, so long as the hiding is not complete, the line of demarcation is visible. By sliding the wedge to the left it is finally impossible to see the edge. »

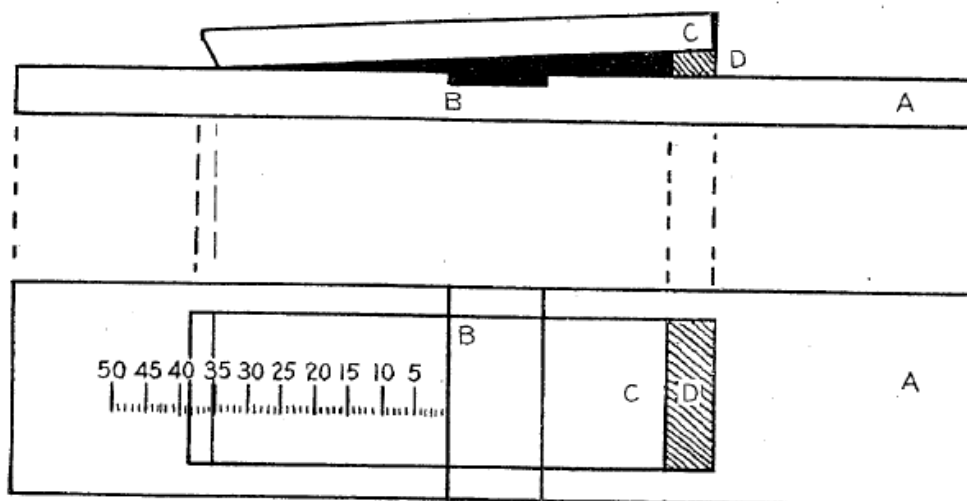


Figure F.1 — Schéma de l'appareil conçu par Pfund pour quantifier le pouvoir couvrant des pigments

G. Présentation du programme microstructural sur les pigments de Kraemer

Texte présenté : mémorandum de Kraemer à Patterson défendant l'approche réductionniste microstructurale pour la compréhension et l'amélioration des pigments et peintures, 17 juillet 1930 (JBN 4/Lithopone Newark 1928-1931) (avec l'aimable autorisation du Hagley Museum and Library)

Copies to:
Dr. Hamilton Bradshaw
Dr. Cole Coolidge
Dr. J.E. Booge, Newark
Mr. M.L. Hanahan, Grasselli, Newark
Dr. H.S. Colton, Krebs Pigment Co.
Dr. J.L. Keats
Dr. J.B. Nichols ✓

Experimental Station
E.I. du Pont de Nemours & Company
July 17, 1930

MEMORANDUM TO DR. G.D. PATTERSON
FROM ELMER O. KRAEMER

In view of your relations to Dr. Nichols' work on pigments and the possibility that you do not see my Quarterly Summary Reports, in which this work is discussed, I submit extracts dealing with Dr. Nichols' work for your perusal.

I wish also to take this occasion to express my conviction that the key to the problem of hiding power in white paints will not be revealed until a fundamental and thorough-going investigation of the physical basis of hiding power is carried out. By this, I mean the determination of the relations between the hiding power of dispersed systems containing two or more phases of different refractive indices and the physical (especially microscopic) structure of the systems. In other words, the answers are required to such questions as follows before hiding power can be scientifically controlled or improved:

1) In a film of constant composition and thickness on a specified surface, and with a given frequency of particle-sizes and shapes, how, quantitatively, does the hiding power vary with changes in the spatial distribution and location of the particles? Is the hiding power always a maximum when the particles are distributed in perfect randomness?

2) In a film of given composition and thickness on a specified surface and with only spherical pigment particles, is the hiding power a maximum with a random arrangement of particles of uniform size, or does the maximum hiding power occur with some non-uniformity in particle-size in a random or in a non-random distribution of particles in the film?

3) What is the quantitative magnitude of the hiding power of a film of specified thickness on a given surface when the film contains a specified weight of a pigment per unit area, the particles of which are spherical, have a known

- 2 -

uniform size, are completely dispersed, and are in random arrangement?

4) What is the quantitative change in hiding power if the refractive index of the medium in the above film is increased by 10%, for instance, the particles remaining unchanged in size, shape, composition, position, etc?

5) What is the quantitative change in hiding power when the refractive index of the particles changes by a certain per cent, all other factors being constant?

6) How, quantitatively, does the hiding power of a film on a given surface change with increasing thickness, the pigment particles being uniform spheres distributed at random through the film, if the weight of pigment per unit area is kept constant? Or, to ask the same question in different words, what is the relation between the hiding-power efficiency of a certain pigment and the distance between the particles (or the concentration of the pigment in the film)?

The extension of questions of this sort, referring to such factors as particle-shape, state of aggregation, presence of adsorbed layers on particles, orientation of non-spherical particles, optical properties of the surface to be hidden and of the surface of the film, effect of two or more kinds of particles of any relative size, shape, or refractive index, ("extenders"), etc., would empirically cover the "physical basis" of hiding power. For pigments or vehicles other than white, the added complication of the extinction coefficients would have to be considered.

It will not be possible to make sound predictions as to the potential hiding power of pigment materials or to estimate the extent of possible improvement in this property before some of these basic questions can be answered.

The complete solution of these problems is admittedly a difficult one. The determination of the structure of films would require considerable microscopic work. Fortunately, the measurement of hiding power has been developed by Professor Pfund to a satisfactory point for white pigments so that investigations along these lines would have a practical value even though it might not be possible in some cases to ascertain or accurately describe the physical (micro) structure of paint films.

EOK.C.
10* Encl.

H. Le test de pouvoir couvrant tel que développé par Kraemer et Schupp entre 1931 et 1933

Test décrit par Parker B. Mitton, « Hiding power », in George G. Sward (ed.), *Paint testing manual: physical and chemical examination of paints, varnishes, lacquers, and colors*, Philadelphia, ASTM, 13e édition, 1972, p. 26

«

Contrast design and visual sensitivity

Kraemer and Schupp considered contrast surfaces in a variety of design and surface ratios [Fig. B.1, page suivante] prepared from glossy photographic paper 9 in. in diameter. They were viewed by the observer from a distance of 6 ft under definite conditions of illumination and surroundings. The test surface was placed in a center of a background 4 by 8 ft that had a lightness equal to 96 per cent of the lighter areas of the surface under test. The illumination was obtained from a bank of 100-W frosted electric lamps placed so that neither direct nor specularly reflected light reached the observer. Twelve seconds were allowed for observation, and the observer was required to name the design and its position. Twenty observers were used in the study. The results were expressed as the percentage of correct judgments for each individual for each pattern, intensity of illumination, and CR [Contrast Ratio], CR in this study was defined as the difference in lightness of the contrasty areas divided by the lightness of the lighter area and multiplied by 100. A 2 per cent contrast is equivalent to 98 per cent hiding. Minimum detectable contrast is defined as that at which 50 percent of the judgments rendered are correct. [Fig. B.2] gives the average of all observers. For example, at a CR of 0.4 percent, design A was observed 50 percent of the time. A CR over 1.5 percent was required to make the same score with design E. That is, E is easier to hide than A. The intensity of the illumination for 4 to 40 millilamberts (average daytime interior) had but little effect upon the results.

For painted surfaces instead of photographic paper, the performance is somewhat better, perhaps because of the non-uniformity of the thickness of the paint film. The results show that the eye is much more sensitive than commonly assumed.

»

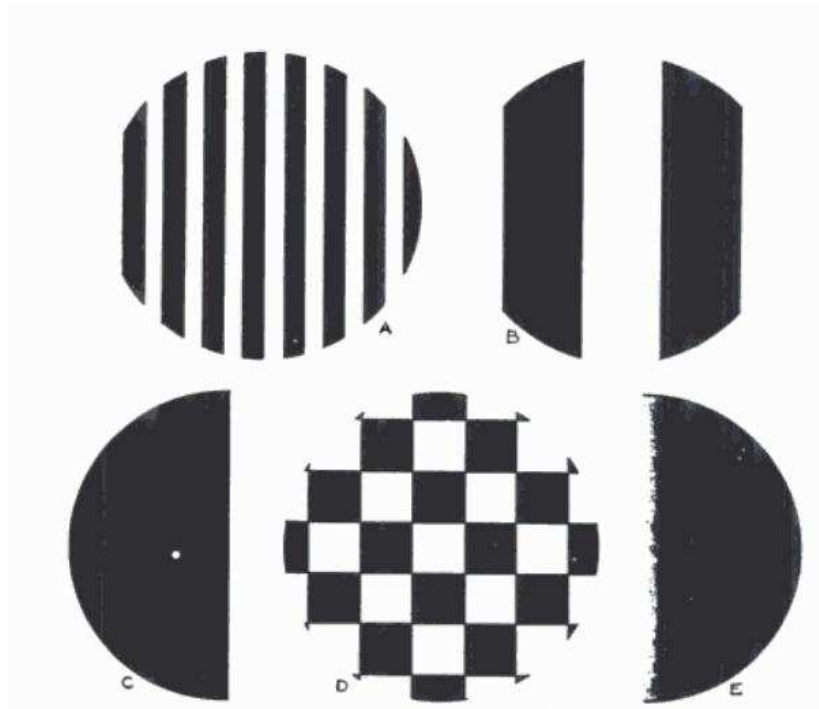


Figure H.1 — Patterns expérimentaux de contraste utilisés par Kraemer et Schupp pour élaborer leur test de pouvoir couvrant

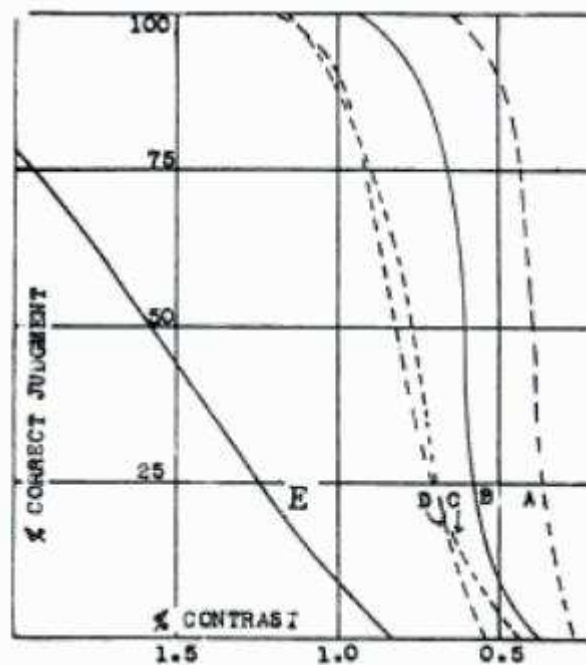


Figure H.2 — Courbes de sensibilité (pourcentage de jugements corrects-contraste) pour les patterns de contraste de Schupp et Kraemer

Reprinted, with permission, from *_STP 500-Paint Testing Manual_*, copyright ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428, www.astm.org <<http://www.astm.org>>.

I. Publications sur les colloïdes entre 1945 et 2006

Les figures suivantes présentent l'évolution quantitative de la publication scientifique sur les colloïdes entre 1945 et 2006. La base de données utilisée est celle de l'*Institute of Scientific Information - Web of Science* (Thomson-Reuters). Cette base de données contient la plupart des revues scientifiques mondiales. Les articles comptabilisés dans les figures sont ceux qui contiennent le terme « *colloid* » ou ses dérivés (*colloidal*, *colloids*...) dans leur titre ou leur résumé (*Topic= colloid**). Le nombre de publication sur les colloïdes croît significativement à partir des années 1970 et augmente fortement à partir de la fin des années 1980. Cette croissance est absolue et relative : la proportion des articles sur les colloïdes dans les journaux augmente bien plus rapidement que le nombre total d'articles publiés par les principaux journaux qui les hébergent. Entre 1990 et 1995, le nombre total d'articles des six premiers journaux où sont publiés les articles sur les colloïdes¹ augmente de 26%, tandis que le nombre de publications « *colloid** » est multiplié par 3,2.

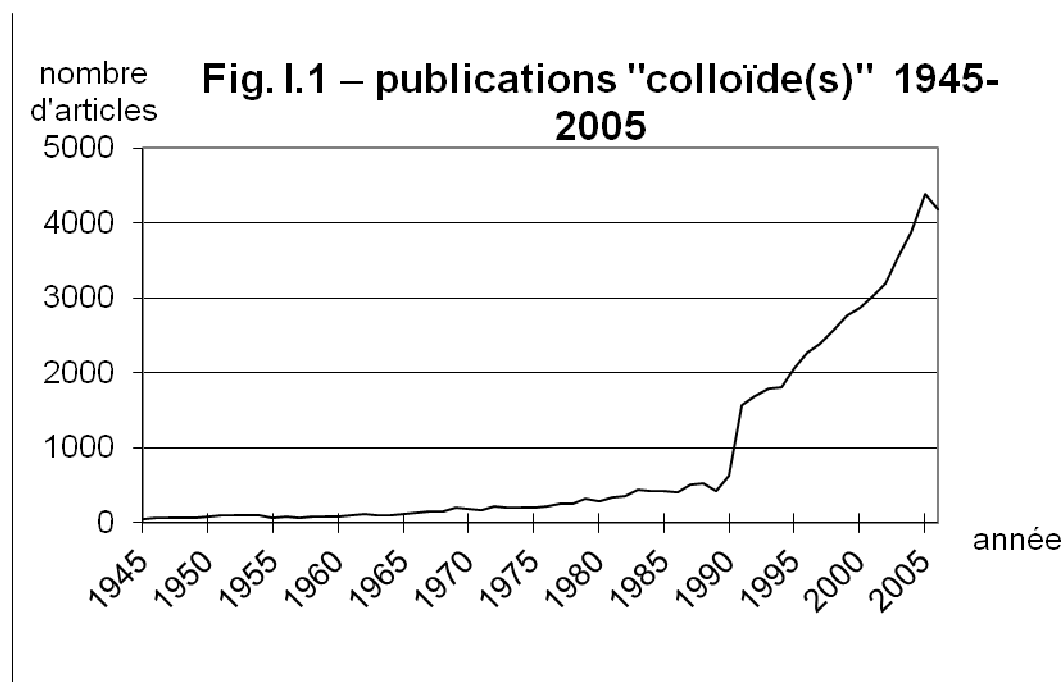


Figure I.1 — Publications "colloïde(s)" 1945-2005

¹ *Journal of Colloid and Interface Science, Langmuir, Journal of Chemical Physics, Journal of Physical Chemistry, Colloids and Interfaces A, Colloid and Polymer Science*

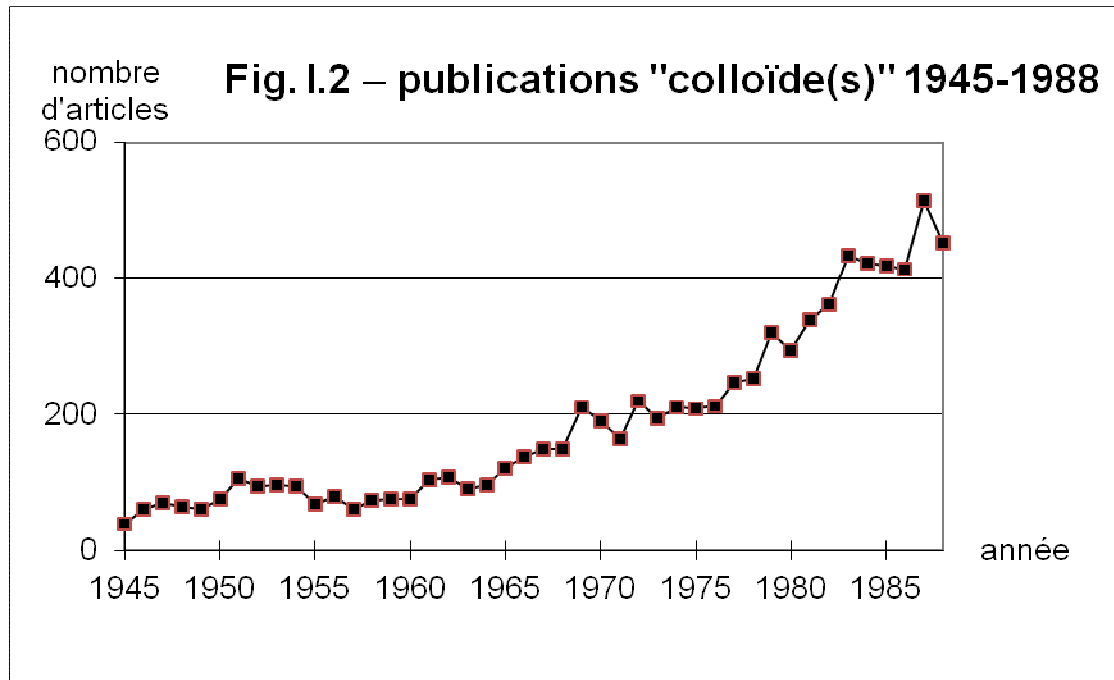


Figure I.2 — Publications "colloïde(s)" 1945-1988

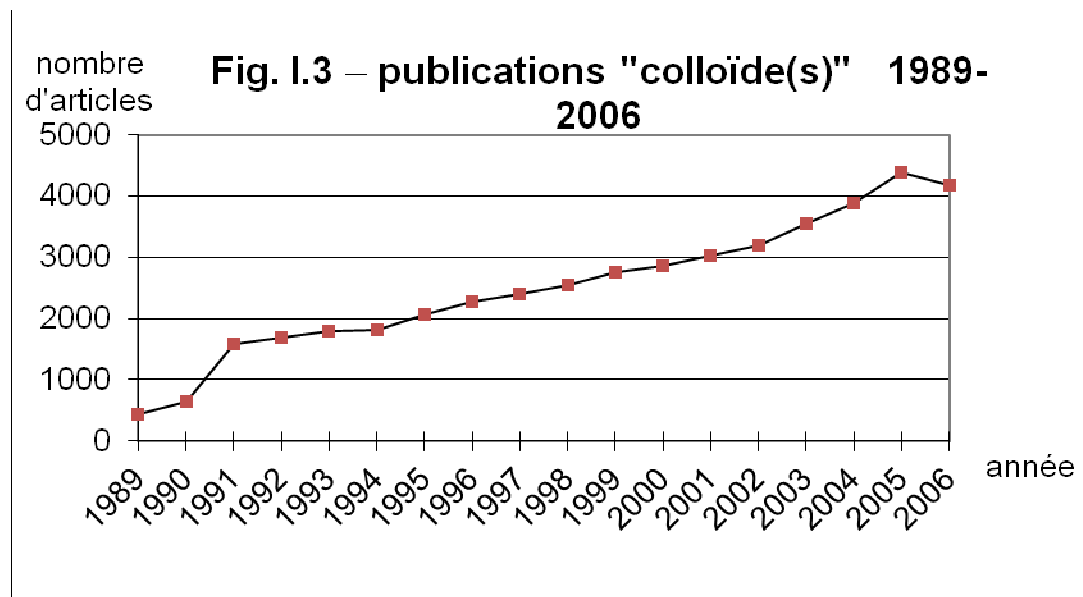


Figure I.3 — Publications "colloïde(s)" 1989-2006

J. Note sur les méthodes de production des nanoparticules et leur éventuelle filiation avec le domaine des colloïdes

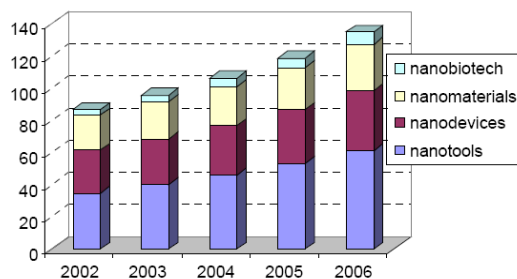
Valeurs et volumes des productions – méthodes de production

Marché des nanomatériaux et nanoparticules en valeur

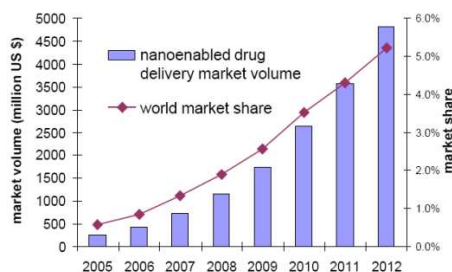
Il s'agit dans cette section d'estimer la part des nanoparticules et nanomatériaux dans l'ensemble des secteurs des nanotechnologies. D'autre part, il s'agit d'estimer la valeur des matériaux produits. Il est très difficile d'obtenir des chiffres précis et univoques, d'une part parce que ce qu'on entend par « nanoparticules » n'est souvent pas défini explicitement, d'autre part parce les chiffres donnés varient énormément selon que l'on considère la valeur de la nanoparticule produite, ou que l'on considère la valeur du nanomatériau auquel est incorporé la nanoparticule.

Je m'appuie principalement sur deux études : une étude produite par la Commission Européenne (DG Recherche) et publiée en novembre 2006². Une étude publiée en juillet 2008 par une société de conseil en nouvelles technologies américaine, Lux Research³. Toutefois, l'étude coûtant 5000\$, je m'appuie indirectement sur des chiffres donnés par la presse qui cite cette étude.

Il ressort que les nanomatériaux occupent environ un quart en valeur des marchés des nanotechnologies, soit en 2003 environ 20 milliards \$. Les autres principaux marchés sont les « *nanodevices* » (principalement micro et nanoélectronique) et les « *nanotools* » (instrumentation nanotechnologique). Le marché des nanomédicaments (dont une majorité est composée de nanoparticules) est estimé en 2005 à 500 millions \$. Si l'on comptabilise les nanomatériaux et les nanomédicaments, on peut estimer que l'ensemble des produits incorporant des nanoparticules constitue environ un tiers en valeur de l'ensemble des produits des nanotechnologies.



Marché mondial des nanotechnologies, en milliards de dollars. Source: Hullman, op. cit., p. 10



Source: Hullman, op. cit., p. 12

² Hullmann A., *The Economic Development of Nanotechnology – An Indicator Based Analysis*, European Commission, 2006

³ Lux Research Inc., *Nanomaterials State of the Market Q3 2008 : Stealth Success, Broad Impact*, juillet 08, LRNI-SMR-08-01

En 2007, selon l'étude de Lux Research, la valeur des produits finis nanomatériaux totalise 147 milliards \$, avec un taux de croissance annuel de 41%. Le marché uniquement des nanotubes de carbone et des fullerènes (une « classe » particulière de nanoparticules) est supposé atteindre, en 2012, respectivement 460 millions \$ et 66 millions \$⁴. Hullmann cite également le chiffre de 900 millions \$ pour les « nanoparticules » seules en 2005 (p. 34). Il y a donc des écarts importants selon que l'on considère la valeur du produit fini ou de l'intermédiaire nanostructuré.

Méthodes de production – volumes de production

Les méthodes de synthèse des nanoparticules sont généralement présentées en deux ou trois grandes catégories. Initialement, je m'appuie sur deux études pour présenter ces méthodes de production. Le rapport du comité inter-institutionnel américain sur les nanotechnologies coordonné par la National Science Foundation et publié en 1999⁵. L'étude préparée par l'Institute of Occupational Medicine (U.K.) en 2004 sur la toxicité des nanoparticules et détaillant les modes de synthèse des nanoparticules⁶.

Les deux études commencent par distinguer les méthodes « bottom-up » des méthodes « top-down ». Les méthodes top-down concernent les procédés de synthèse de nanoparticules par attrition mécanique, dans lequel les matériaux bruts sont broyés jusqu'à obtention d'une poudre nanométrique ; par lithographie... Par attrition mécanique, des particules de 100 nm ont été obtenues. Toutefois les méthodes « bottom-up » attirent d'avantage l'attention et constituent la majeure partie de ces études.

Hu et Shaw séparent les méthodes « bottom-up » en deux grandes catégories : « gas-phase synthesis » et « sol-gel processing ». L'étude anglaise distingue elle trois grandes catégories : « gas-phase processes », « colloidal methods », « chemical vapour deposition ». Cette catégorisation des méthodes de production est importante dans le cadre d'une étude sanitaire car *les voies de pénétration des nanoparticules dans les organismes et donc les risques associés dépendent des procédés de synthèse*. Le détail de ces méthodes, et la description des sous-catégories sera abordé par la suite. On peut néanmoins déjà affirmer que la catégorie « sol-gel » dans le rapport américain est la même que la catégorie « colloïdale » de l'étude anglaise. Les procédés « gas-phase » regroupent les méthodes de synthèse en phase gazeuse, et les procédés « colloïdaux » ou « sol-gel » regroupent les méthodes en phase humide. Les méthodes colloïdales sont parfois également nommées méthodes « chimiques ».

Comme pour les valeurs des produits, il est difficile d'obtenir des informations précises sur les volumes de production des nanoparticules. Comme indiqué ci-dessus, la catégorisation « nanoparticules » n'est pas univoque et n'apparaît pas encore comme catégorie spécifique dans les collectes de statistiques comme par exemple l'est le dioxyde de titane. Il convient

⁴ Etude de Lux Research citée dans *Forbes Emerging Tech Reports*, vol. 7 n°8 (2008)

⁵ Hu E. & Shaw D., "Synthesis and Assembly", in Siegel R.W., Hu E. and Roco M.C. (eds.), *Nanostructure Science and Technology: a worldwide study*, Baltimore, MD: World Technology Evaluation Center, 1999, pp. 15-34

⁶ RJ Aitken, KS Creely, CL Tran, *Nanoparticles: an occupational hygiene review*, Institute of Occupational Medicine Research Report 274, Health and Safety Executive Books, 2004, pp. 23-26

donc d'agréger les différents chiffres obtenus sur chaque classe de particules. Le noir de carbone (taille moyenne : entre 20 et 500 nm dépendamment du process) est entièrement produit en phase gazeuse. En 1993, 6 millions de tonnes ont été produites mondialement⁷. La silice colloïdale, utilisée comme agent de charge dans le caoutchouc, comme support de catalyseur, dans les fibres optiques... est également produite à grande échelle : 100 000 tonnes par an en 1991⁸. Comme le noir de carbone, ces particules sont produites en phase gazeuse et la taille des particules primaires s'étale sur toute la gamme sub-micrométrique, dépendamment du process. Des particules de quelques nanomètres de diamètre en moyenne peuvent être obtenues. Le dioxyde de titane est produit par moitié en phase gazeuse, et par moitié par procédé colloïdal. En 1993, 6 millions de tonnes de dioxyde de titane sub-micrométrique ont été produites mondialement⁹. La majorité du titane produit sert de pigment et n'est pas véritablement nanométrique (environ 400 nm). Toutefois des applications spécifiques du titane (support de catalyseur, photocatalyseur...) utilisent du titane véritablement nanométrique : le photocatalyseur le plus utilisé mondialement, le grade « P25 » de Degussa, contient des particules de TiO₂ comprises entre 20 et 40 nm. On estime que les photocatalyseurs au titane constituent environ 0,5% de la production totale de TiO₂¹⁰. Enfin, 65 tonnes de nanotubes de carbone ont été produits mondialement en 2004, pour une valeur de 144 millions €¹¹. La production des nanotubes de carbone est majoritairement issue de méthodes CVD (chemical vapour deposition).

La thèse que je défends dans les pages suivantes est que l'ensemble des techniques de production « bottom-up », à la fois en phase gazeuse et pour les méthodes dites aujourd'hui colloïdales, ont été scientifiquement étudiées¹² sérieusement à partir du début du vingtième siècle. De nombreux scientifiques engagés dans ces études se sont considérés comme des physico-chimistes des colloïdes, et dans les années 1920 l'étude de ces méthodes de production des nanoparticules fait partie intégrante du terrain des colloïdes, y compris, donc, les méthodes en phase gazeuse. Avec le déclin de la science des colloïdes à partir de la fin des années 1930, les méthodes en phase gazeuse se sont désolidarisées des colloïdes pour être appropriées par les disciplines de la physique et les branches d'ingénierie associées, comme par exemple la métallurgie et la science des aérosols. La démonstration de cette évolution dans l'appartenance disciplinaire de ces méthodes nécessite de les examiner plus en détail.

⁷ 'Nanoparticles: an occupational hygiene review', *op. cit.*, p. 74

⁸ *Ibid.*, p. 73

⁹ *Ibid.*, p. 78

¹⁰ Dr. Bloess (société Kronos International, Allemagne), communication personnelle.

¹¹ Chiffres issus de l'étude de la société de conseils Cientifica, « Carbon nanotubes global production » (avril 2005),

[http://cientifica.eu/index.php?page=shop.product_details&category_id=4&flypage=shop.flypage&product_id=11&option=com_virtuemart&Itemid=80, accédé le 10/11/2008]

¹² L'adjectif « scientifique » placé ici ne sous-entend pas une quelconque supériorité épistémologique, mais rappelle simplement que ces méthodes de production ont été « étudiées » depuis des millénaires (on se sert de pigments nanométriques depuis toujours par des procédés « bottom-up »), et qu'elles deviennent un objet de recherches scientifiques important depuis seulement le début du vingtième siècle.

Méthodes de production -historique

Phase gazeuse

De nombreux procédés plus ou moins distincts permettent de synthétiser des nanoparticules à partir d'une réaction en phase gazeuse. Je m'appuie principalement sur deux études : le rapport du workshop inter-institutionnel américain organisé en 1997 sur les nanoparticules et coordonné par la NSF¹³ ; et surtout, le *review article* paru en 1998 dans *Journal of Aerosol Science*¹⁴ dans une édition spéciale que ce journal a consacré aux nanoparticules. Les auteurs, qui ont longtemps travaillé sur les propriétés et applications des particules nanométriques, constatent le changement de vocabulaire qui s'opère :

Nanoparticles have attracted the attention of an increasing number of researchers from several disciplines in the last 10 years. The term "nanoparticle" came into frequent use in the early 1990s together with the related concepts, "nanoscaled" or "nanosized" particle. Until then, the more general terms submicron and ultrafine particles were used.¹⁵

Cette revue de Kruis *et al.* sur la synthèse des nanoparticules en phase gazeuse est la plus détaillée et isole une quinzaine de méthodes distinctes pour cette synthèse. Pour mettre en évidence la continuité historique de ces méthodes il apparaît pertinent de remanier cette catégorisation en les agencant en trois catégories : les méthodes par combustion, les méthodes par plasma, et les méthodes par évaporation en gaz inerte.

- Méthodes par combustion (*Flame reactors*)

C'est sans doute le procédé le plus ancien pour synthétiser des nanoparticules, utilisé à l'échelle industrielle depuis la fin du XIX^{ème} siècle pour produire du noir de carbone. Dans cette méthode, la combustion incomplète des hydrocarbures lourdes hisse la température du réacteur à environ 1500 °C, ce qui provoque la décomposition des hydrocarbures qui n'ont pas été entièrement brûlés. Les produits de la réaction, composés de particules fines, sont refroidis et collectés. La multinationale Cabot Corporation, le plus gros producteur mondial de noir de carbone, utilise ce procédé depuis 1882¹⁶. Ce procédé est aussi appelé *flame pyrolysis*.

La synthèse de silice nano-dispersée fait également appel à des réacteurs à flamme. Le tétrachlorure de silicium, sous forme gazeuse, est attaqué par l'oxygène par hydrolyse à haute température. Comme pour le noir de carbone, les produits sont refroidis pour réguler la taille

¹³ S.K. Friedlander, « Synthesis of nanoparticles and their agglomerates: aerosol reactors », in Siegel R.W., Hu E. and Roco M.C. (eds.), *WTEC workshop report on R&D Status and Trends in Nanoparticles, Nanostructured Materials, and Nanodevices in the United States*, Baltimore, MD: International Technology Research Institute, 1998, pp. 83-89

¹⁴ Kruis FE, Fissan H, Peled A. (1998). "Synthesis of nanoparticles in the gas phase for electronic, optical and magnetic applications – a review", *Journal of Aerosol Science*; 29: 511-535

¹⁵ *Ibid.* p. 511

¹⁶ Cabot D.T., « A short history of the Cabot corporation », *Daedalus*, 125 (2) (1996), 113-136

des particules de silice produites. Le « white gold » ainsi produit sert principalement en substitut du noir de carbone pour renforcer les pneus. Ce procédé a probablement été développé pour la première fois, à l'échelle industrielle, en Allemagne par la compagnie Degussa en 1941¹⁷. Ce n'est pas un hasard si la recherche de substitut au noir de carbone émerge en Allemagne : le noir de carbone est fabriqué à partir des hydrocarbures, et le contexte géopolitique des deux guerres mondiales a incité l'Allemagne à réduire sa dépendance dans les importations en dérivés du pétrole, dont son sol est peu doté¹⁸. Le procédé est baptisé « Aerosil » par Degussa en 1943, et c'est le même procédé qui est actuellement utilisé pour la production du dioxyde de titane nanométrique, par hydrolyse du Tétrachlorure de titane. Les procédés par réacteurs à flamme permettent de synthétiser des oxydes métalliques : oxydes de titane, d'étain, de zinc, de silicium...

- Méthodes par plasma (*Plasma reactors*)

Les méthodes par plasma permettent de générer des nanoparticules métalliques. Le plasma est généré par un apport énergétique externe (par exemple un laser ou un arc électrique) et provoque l'évaporation du métal, suivi de la nucléation et de la condensation des vapeurs métalliques en particules solides. La température au sein du plasma est de l'ordre de 10 000°C. Les premiers fullerènes et nanotubes de carbone ont été synthétisés par cette méthode. L'équipe de Smalley au début des années 1980 a élucidé la structure géométrique des particules qu'il a produites en pulvérisant un laser à impulsion sur une cible en graphite. Suite à la forme découverte, il a appelé ces particules « fullerènes »¹⁹. Cela leur a valu le prix Nobel de chimie en 1996.

Les plasmas sont également générés par des arcs électriques. Il y évaporation à l'anode puis nucléation, coalescence et condensation. L'anode se « vaporise » produisant ainsi des particules fines dont la nature et la taille dépend du type de métal et des conditions expérimentales. Avant même que le concept de plasma émerge dans les années 1950, les arcs électriques ont été utilisés pour synthétiser des nanoparticules depuis le début du siècle. La première utilisation de cette méthode dont on ait gardé trace est le fait d'un chimiste des colloïdes Allemand, Georg Bredig. En plongeant un arc électrique de platine en solution dans du peroxyde d'hydrogène, Bredig a constaté que la solution de platine colloïdale qui en a résulté a le pouvoir de décomposer catalytiquement le peroxyde d'hydrogène²⁰. Si cette synthèse se déroule en solution et n'est donc pas une méthode en phase gazeuse, très vite l'arc électrique est utilisé dans les gaz. Suivant Bredig, de nombreuses recherches sur l'étude des particules produites par un arc électrique ont lieu par la suite. Svedberg lui-même a étudié ces méthodes de synthèse entre 1907 et 1920, et synthétise les résultats dans une monographie publiée en 1921, *The formation of colloids*, puis approfondi encore l'étude sur les arcs électriques dans *Colloid Chemistry* (1928). Des études poussées sur la taille des particules

¹⁷ Cf. site internet de Degussa : [<http://www.aerosil.com/aerosil/en/about/company/history/default>, accédé le 10/11/2008]

¹⁸ Krammer A., "Fueling the Third Reich", *Technology and Culture*, 19(3) (1978), 394-422

¹⁹ Kroto H.W. *et. al.* 1985, "C60: Buckminsterfullerene", *Nature*, Vol. 318, No. 6042, 162-163

²⁰ *Science*, 13 (1901), pp 940-943

produites (révélées par l'ultramicroscope et, plus tard, par l'ultracentrifugeuse) en fonction des différents paramètres (concentration et nature des gaz, température, intensité et fréquence du courant...) sont ainsi rassemblées et font partie du domaine d'étude des colloïdes dans les années 1910-1920. Après la deuxième guerre mondiale cependant, le lien entre arc électrique et colloïdes est perdu et cette méthode de synthèse est reprise par les métallurgistes, qui emploient alors le concept de plasma pour expliquer pour désigner cette méthode²¹.

- Méthode par évaporation en gaz inerte (*inert gas evaporation*)

Cette méthode vaporise le substrat métallique initialement solide, et permet d'obtenir des particules métalliques ainsi que des oxydes métalliques, lorsque la poudre métallique refroidie est par la suite oxydée. Le gaz dans lequel a lieu la vaporisation puis nucléation est un gaz rare, souvent l'Argon ou l'Hélium. L'apport énergétique de vaporisation est fourni par un four régulé en température, la température influant grandement sur la taille des particules produites. On peut ainsi synthétiser des particules de quelques nanomètres de diamètre à 100 nm.

Cette méthode est économiquement importante : la start-up américaine « Nanophase » produit selon ce procédé des nanoparticules d'oxyde de titane et de zinc qui sont utilisées notamment dans les crèmes solaires. Récemment Nanophase a conclu un accord d'exclusivité pour fournir BASF en oxyde de zinc nanométrique²². Nanophase est créée en 1989 en exploitant des brevets et la technologie par évaporation en gaz inerte développés à Argonne National Laboratory, notamment par Richard Siegel (qui a inventé le mot « nanophase » et avec lequel j'ai eu un entretien le 15 octobre 2007)²³. Les chercheurs d'Argonne (qui sont des physiciens) s'appuient et citent abondamment des chercheurs de Cornell University qui ont également contribué à développer cette méthode dans les années 1970. Dans un article très cité dans la littérature sur les particules ultrafines, ces physiciens de Cornell rappellent la filiation de cette méthode avec la méthode par évaporation à partir d'un filament résistif :

The technique [inert-gas evaporation] is a modification of the old inert-gas-evaporation method where, instead of having a resistive filament, the vapor is produced from a temperature-stabilized oven²⁴.

Les auteurs citent Svedberg et Pfund (ce dernier est consultant à DuPont entre les années 1920 et 1940) comme « pionniers » de cette méthode. Toutefois la méthode de Svedberg par arc électrique est un peu différente de celle développée à Cornell, car il n'y pas formation de plasma dans la méthode par évaporation en gaz inerte. Cependant le principe physico-chimique de formation des particules (évaporation, nucléation, coalescence et condensation) est le même dans les deux méthodes. Dans *The formation of colloids*, Svedberg exhibe des

²¹ Holgrem J.D. *et al.* « Arc vaporized submicron particulates », in Kuhn W.E. (ed.), *Ultrafine Particles*, New-York, John Wiley&Sons, 1963

²² «Nanomaterials gain critical mass», *Forbes Emerging Tech Reports*, vol. 7 n°8 (2008)

²³ Siegel R.W. *et al.*, « Synthesis, characterization, and properties of nanophase TiO₂ », *J. Mater. Res.*, 3(6) (1988), 1367-1372

²⁴ Grandqvist C.G. & Buhman R.A., «Ultrafine metal particles», *J. Appl. Phys.*, 47 (5) (1976), 2200-2219, citation p. 2217

recherches sur cette méthode qui ont cours au début du siècle, faites par des physico-chimistes des colloïdes. Kohlschütter en Allemagne en 1912 qui remarque que la taille des particules dépend du gaz utilisé et de sa concentration. Kimura à la même période au Japon qui utilise un filament résistif pour évaporer des métaux²⁵.

Méthodes colloïdales

Les méthodes appelées aujourd'hui « colloïdales » concernent les procédés de précipitation en phase aqueuse, dans lesquels la précipitation des différents ions et complexes hydratés en solution est contrôlée. Je m'appuie particulièrement sur les articles de synthèse d'Egon Matijević²⁶, chimiste des colloïdes à l'université de Potsdam (New-York), spécialiste de la production de particules « monodispersées »²⁷, qui vient d'acquérir le titre de « Mister Colloids »²⁸ et avec lequel j'ai eu un entretien à Potsdam le 11 octobre 2007. Matijević distingue trois catégories de synthèse « colloïdale » de particules²⁹ : la précipitation à partir de solutions homogènes, les transformations de phase (sol-gel), les réactions avec des aérosols.

Dans la méthode par précipitation homogène, la cinétique des réactions de complexation sont contrôlées de manière à obtenir une seule vague de nucléation. Leur croissance est ensuite uniforme, ce qui permet d'obtenir des particules dont la distribution de taille est très étroite.

Avant même que la chimie des colloïdes n'émerge, la précipitation de particules solides à partir de solutions homogènes a constitué un sujet de recherche important pour la science chimique. Faraday semble être le premier à suspecter que des solutions de sels d'or qui apparaissent macroscopiquement homogènes, sont en fait constituées de minuscules particules solides, dispersées dans un solvant liquide. L'avènement des colloïdes permet de théoriser ces systèmes inhomogènes – qui deviennent des systèmes « dispersés » - et la physico-chimie des colloïdes devient le cadre disciplinaire qui accueille les recherches sur cette méthode de synthèse par précipitation : « The phenomenon entering into the formation of precipitates constitute one of the basic problems in colloid chemistry »³⁰. Ainsi Svedberg tente d'expliquer les mécanismes de précipitation par des schémas simples de nucléation, condensation. Si l'on compare les explications entre Matijević et Svedberg, on remarque tout le chemin parcouru pendant ce demi-siècle de recherches ; en particulier la référence aux complexes hydratés, qui est centrale pour Matijević, n'apparaît pas chez Svedberg.

²⁵ Svedberg T., *The formation of colloids*, New York, D. Van Nostrand, 1921, pp. 19-25

²⁶ Matijević E., « Production of monodispersed colloidal particles », *Ann. Rev. Mater. Sci.*, 15 (1985), 483-516; - , « Monodispersed colloids: art and science », *Langmuir*, 2 (1986), 12-20; - , « Monodispersed metal (hydrous) oxides – a fascinating field of colloid science », *Acc. Chem. Res.*, 14 (1981), 22-29

²⁷ Qui ont même taille et même forme

²⁸ Kallay N., « Egon Matijević – 'Mister Colloids' », *Journal of Colloid and Interface Science*, 309 (2007), 3-7

²⁹ Matijević, n'emploie « nanoparticule » qu'à partir du milieu des années 1990, et on peut penser que c'est le cas pour l'ensemble des milieux qui s'identifient fortement aux colloïdes. La taille des particules produites varie entre 50nm et 2 microns

³⁰ Citation de J.B. Nichols, chimiste à DuPont à partir de 1927 et étudiant de Svedberg (*in Nichols' papers*, Du Pont archives, Hagley Museum and Library)

Cependant Du Pont va initier un programme de recherches « fondamentales » sur ces mécanismes de précipitation à partir de 1930. La transition à la technologie du titane dans les pigments, qui se fait pour Du Pont à cette période, s'accompagne donc d'une étude sur les mécanismes de précipitation. En particulier, ces recherches se focalisent, à travers l'ultracentrifugeuse, sur la taille des particules produites en fonction des conditions de précipitation, et sur l'influence de cette taille dans les performances de la peinture.

Méthodes CVD

Les méthodes CVD (Chemical Vapour Deposition) sont principalement utilisées en microélectronique dans la fabrication des semiconducteurs. Des couches minces (*thin films*) de silicium ou d'autres composés semiconducteurs sont déposées sur des substrats. La vapeur, formée comme pour les autres procédés par pyrolyse, réduction ou oxydation, se dépose sur la surface en formant une couche dont on peut contrôler la croissance. La synthèse à grande échelle de nanotubes de carbone fait appel à cette méthode, même si historiquement les premiers nanotubes ont été synthétisés par la méthode par plasma (équipe de Smalley).

Là encore, Svedberg rassemble et expose des études sur la formation de couches minces qui ont été le fait de chimistes des colloïdes au début du siècle³¹. Le vocabulaire n'est pas exactement le même cependant : Svedberg utilise « *thin films* », mais parle d'avantage de « *condensates* » plutôt que de « *deposition* »³².

Conclusions

Quel est le « poids » actuel des colloïdes dans l'ensemble du champ des NST (nanosciences-nanotechnologies) ? En terme de visibilité, il est très faible. En terme d'importance parmi les communautés englobées dans ce champ, il est faible également. Parmi l'ensemble des scientifiques ou ingénieurs qui s'identifient plus ou moins lâchement aux NST, sans doute une très faible minorité s'identifie principalement au domaine des colloïdes. On peut penser que *scientifiquement*, le poids des colloïdes dans le paysage des NST est faible.

Economiquement, ce poids apparaît plus élevé. Lors de l'âge d'or des colloïdes, entre les années 1910 et 1930, ce domaine a initié, ou a développé, ou s'est approprié, la majeure partie des méthodes de synthèse des particules fines, y compris, donc, celles utilisées actuellement pour la production de nanoparticules à l'échelle industrielle. Il est extrêmement intéressant de remarquer que les procédés de production les plus anciens ont une importance économique majeure dans l'ensemble des nanotechnologies : « The report [Lux Research report] notes that established nanotechnology--which includes nanoscale objects and devices *based on long-known processes and technologies*, such as semiconductor chips with nanometer features *and*

³¹ Svedberg, 'The formation of colloids', p. 15-20

³² « Hamburger's ultramicroscopic investigations of the condensates and his measurements of their electric conductivity [...] prove that some of these condensates [...] are to be looked upon as real films of amorphous metal. These films disintegrate in time spontaneously into discrete particles, probably with crystallization.» (*Ibid.*, p 17)

nanoscale particles such as carbon black--dominates the current market, accounting for \$1.3 trillion of the \$1.4 trillion in nano-enabled manufacturing output in 2007 »³³

Il faut toutefois nuancer fortement ces assertions, et ne pas être entraîné à conclure que le domaine des colloïdes est responsable à lui seul des technologies actuelles des nanoparticules. Bien souvent le développement scientifique ou industriel de ces méthodes, tel qu'il apparaît pendant cet âge d'or des colloïdes, est rudimentaire par rapport aux développements actuels. La synthèse de nanoparticules lors de cette période est parfois confinée au domaine expérimental. Il faudra par exemple près d'un demi-siècle, et l'apport de l'expertise de nombreuses branches scientifiques et d'ingénierie, pour que la méthode par évaporation en gaz inerte soit viable industriellement.

Il n'empêche que ce domaine des colloïdes a été l'initiateur de ces méthodes, ou, lorsqu'elles existaient auparavant comme les méthodes par précipitation ou par combustion, les a poussé à un certain degré de raffinement. Il est intéressant de constater que la séparation actuelle des nanos en deux grandes catégories, « bottom-up » et « top-down », est similaire à une catégorisation effectuée par Svedberg. Ce dernier, dans sa tentative de classement des méthodes de « formation des colloïdes », distingue d'emblée les méthodes par « dispersion » et les méthodes par « condensation » : « Colloids or disperse systems in general may be formed in two ways, differing in principle : by condensation or by dispersion. In one case matter is brought together within a smaller boundary surface than before; in the other case the matter is dispersed so that the specific surface is increased^o »³⁴.

Historiquement, le procédé en phase gazeuse économiquement le plus important est le procédé par combustion, et reste sans doute d'une importance économique capitale actuellement. C'est probablement un des procédés phares que l'étude de Lux Research appelle « *established nanotechnology* ». Le procédé par hydrolyse des métaux chlorés en réacteur à flamme est développé industriellement à la fin des années 1930 en Allemagne par la firme Degussa, et reste aujourd'hui capital pour la synthèse des nanoparticules.

³³ Etude de Lux Research, "Nanomaterials State of the Market Q3 2008 : Stealth Success, Broad Impact", cité dans *CleanRooms*, 22 (8), 1 septembre 2008, emphase ajoutée

³⁴ Svedberg, 'The formation of colloids', p. 10