

N° d'ordre :

École Doctorale Mathématiques, Sciences de l'Information  
et de l'Ingénieur

---

ULP – INSA – ENGEES

## THÈSE

présentée pour obtenir le grade de

**Docteur de l'Université Louis Pasteur – Strasbourg I**  
**Domaine : Sciences pour l'Ingénieur - EEA**  
**Spécialité : Traitement d'Images et Vision par Ordinateur**

par

**Redouane KHEMMAR**

**Extraction contrôlée d'indices images et automatisation de la  
reconstruction 3D. Application à la mesure dimensionnelle  
par vision par ordinateur**

Soutenue publiquement le 8 décembre 2005

### Membres du jury

M. Jack-Gérard Postaire, Professeur, USTL, Lille  
M. Didier Wolf, Professeur, INPL, Nancy  
M. Jean-François Dufourd, Professeur, ULP  
M. Ernest Hirsch, Professeur, ULP  
M. Alex Lallement, MCF, ULP

Rapporteur externe  
Rapporteur externe  
Rapporteur interne  
Directeur de thèse  
Examineur





# Table des matières

|  |           |
|--|-----------|
| Table des figures . . . . .  | v         |
| Liste des tableaux . . . . .   | vii       |
| <b>Introduction Générale</b>   | <b>1</b>  |
| <b>1 Utilisation des contours actifs pour le détourage d'un objet du fond de l'image</b> | <b>7</b>  |
| 1.1 Introduction . . . . .   | 7         |
| 1.2 Contours actifs . . . . .  | 10        |
| 1.2.1 Principe de base . . . . .   | 10        |
| 1.2.2 Approches frontières . . . . .   | 11        |
| 1.2.3 Approches régions . . . . .  | 16        |
| 1.2.4 Choix du modèle . . . . .  | 18        |
| 1.3 Implémentation par les ensembles de niveaux . . . . .                                | 19        |
| 1.3.1 Ensembles de niveaux . . . . .   | 19        |
| 1.3.2 Équation d'évolution globale de la fonction hôte . . . . .                         | 21        |
| 1.3.3 Méthode de la Bande étroite ( <i>Narrow Band</i> ) . . . . .                       | 24        |
| 1.3.4 Implémentation algorithmique - mise en œuvre pratique - . . . . .                  | 26        |
| 1.4 Application : Construction du masque de l'objet . . . . .                            | 29        |
| 1.4.1 Génération du masque de l'objet . . . . .  | 30        |
| 1.4.2 Détermination des contours initiaux . . . . .                                      | 35        |
| 1.4.3 Choix de la fonction d'attache aux données . . . . .                               | 35        |
| 1.4.4 Influence des paramètres . . . . .   | 37        |
| 1.5 Conclusion . . . . .   | 38        |
| <b>2 Réglage des paramètres par plan d'expériences</b>                                   | <b>43</b> |
| 2.1 Introduction . . . . .   | 43        |
| 2.2 Quelques approches d'optimisation de la qualité d'une segmentation . . . . .         | 43        |
| 2.2.1 Ajustement global hors ligne . . . . .   | 44        |
| 2.2.2 Ajustement global en ligne . . . . .   | 45        |
| 2.2.3 Ajustement local en ligne . . . . .  | 45        |
| 2.2.4 Synthèse . . . . .   | 46        |
| 2.3 Éléments fondamentaux des plans d'expériences . . . . .                              | 47        |
| 2.3.1 Principe et terminologie . . . . .   | 47        |
| 2.3.2 Plans factoriels . . . . .   | 50        |
| 2.3.3 Interprétation des effets et analyse de variance . . . . .                         | 55        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 2.3.4    | Synthèse . . . . .  | 57         |
| 2.4      | Mise en œuvre des plans d'expériences dans le cadre des contours actifs . . . . .               | 58         |
| 2.4.1    | Modélisation du processus de segmentation . . . . .   | 58         |
| 2.4.2    | Étude des interactions entre facteurs . . . . .   | 61         |
| 2.4.3    | Détermination des facteurs influents (ou significatifs) . . . . .                               | 64         |
| 2.4.4    | Optimisation du jeu de paramètres . . . . .   | 66         |
| 2.4.5    | Essais de confirmation . . . . .  | 69         |
| 2.5      | Conclusion . . . . .  | 73         |
| <b>3</b> | <b>Contrôle de l'acquisition et de la reconstruction 3D partielle</b>                           | <b>75</b>  |
| 3.1      | Introduction . . . . .  | 75         |
| 3.2      | Systèmes de planification applicables au contrôle des têtes de mesures . . . . .                | 76         |
| 3.2.1    | Réseaux de Tâches Hiérarchiques (HTN) . . . . .   | 76         |
| 3.2.2    | Graphes de Situations (SGT) . . . . .   | 77         |
| 3.2.3    | Choix d'une « stratégie » . . . . .   | 78         |
| 3.3      | Représentation comportementale à l'aide de SGTs . . . . .                                       | 79         |
| 3.3.1    | Schéma de situation . . . . .   | 80         |
| 3.3.2    | Constitution d'un graphe de situations . . . . .  | 80         |
| 3.3.3    | Parcours d'un graphe de situations . . . . .  | 81         |
| 3.4      | Contrôle des têtes de mesure pour une reconstruction 3D partielle . . . . .                     | 82         |
| 3.4.1    | Procédures mises en œuvre . . . . .   | 83         |
| 3.4.2    | Représentation comportementale de la tête de mesure « lumière structurée » . . . . .            | 87         |
| 3.4.3    | Adaptation dynamique aux conditions effectives d'acquisition . . . . .                          | 93         |
| 3.4.4    | Implémentation logicielle . . . . .   | 98         |
| 3.4.5    | Exemple de reconstruction 3D partielle mettant en œuvre un contrôle de l'illumination . . . . . | 102        |
| 3.5      | Conclusion . . . . .  | 111        |
| <b>4</b> | <b>Planification de la reconstruction 3D complète et de l'évaluation dimensionnelle</b>         | <b>113</b> |
| 4.1      | Introduction . . . . .  | 113        |
| 4.1.1    | Planification du placement de caméras en vue de mesures 3D . . . . .                            | 114        |
| 4.2      | Système d'acquisition et d'évaluation . . . . .   | 115        |
| 4.2.1    | Robot de mesure . . . . .   | 115        |
| 4.2.2    | Modèle de référence de l'objet . . . . .  | 118        |
| 4.2.3    | Procédures de reconstruction et d'évaluation . . . . .  | 119        |
| 4.3      | Planification d'une séquence d'évaluation . . . . .   | 123        |
| 4.3.1    | Connaissances <i>a priori</i> . . . . .   | 123        |
| 4.3.2    | Mise au point d'une séquence d'évaluation dimensionnelle . . . . .                              | 125        |
| 4.3.3    | Gestion de l'exécution par un graphe de contrôle . . . . .                                      | 126        |
| 4.3.4    | Validation expérimentale . . . . .  | 133        |
| 4.4      | Perspectives . . . . .  | 135        |
| 4.4.1    | Contrôle de la tête stéréoscopique . . . . .  | 137        |
| 4.4.2    | Fusion de données contours et surfaces . . . . .  | 138        |

## TABLE DES MATIÈRES

---

|                            |  |            |
|----------------------------|--|------------|
| 4.4.3                      | Auto-apprentissage du graphe de contrôle . . . . . | 141        |
| 4.5                        | Conclusion . . . . .                               | 144        |
| <b>Conclusion Générale</b> |  | <b>144</b> |
|                            | Annexe . . . . .                                   | 148        |
|                            | Bibliographie . . . . .                            | 149        |
|                            | Liste de publications . . . . .                    | 163        |



# Table des figures

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1    | Séquence d'acquisitions en vue d'une reconstruction 3D complète d'un objet (exemple utilisant 4 acquisitions). . . . .  | 2  |
| 2    | Vue d'ensemble du système mis en place. . . . .   | 3  |
| 1.1  | Chaîne de traitement « lumière structurée ». Passage d'une image à niveaux de gris à un nuage de points 3D. . . . .   | 8  |
| 1.2  | Segmentation de l'image des franges mettant en évidence des franges parasites susceptibles de fausser la reconstruction 3D de l'objet. . . . .  | 8  |
| 1.3  | Chaîne de traitement permettant d'isoler la région de l'objet à inspecter du fond de l'image. . . . .   | 9  |
| 1.4  | Contour actif 1D soumis à une force quelconque (composante normale et tangentielle). . . . .  | 13 |
| 1.5  | Évolution d'un contour actif avec changement de topologie. . . . .  | 15 |
| 1.6  | Représentation de l'évolution d'un contour $\Gamma$ par l'ensemble de niveaux $\Psi$ (niveau 0 de cet ensemble). . . . .  | 21 |
| 1.7  | Implémentation par ensembles de niveaux. Illustration d'un changement de topologie de $\Gamma$ . . . . .  | 23 |
| 1.8  | Algorithme général d'évolution par ensembles de niveaux d'un contour actif $\Gamma$ . . . . .   | 25 |
| 1.9  | Bande étroite de demi-largeur $\delta$ définie autour de l'ensemble de niveau zéro $\{\Psi = 0\}$ . . . . .   | 27 |
| 1.10 | Construction du masque et détournage de l'objet. . . . .  | 31 |
| 1.11 | Diminution du temps de calcul par sous-échantillonnage de l'image originale à des résolutions plus faibles. Image Pale de turbine. . . . .  | 33 |
| 1.12 | Précision du masque obtenu (pièce pale de turbine (128 * 96)). . . . .  | 34 |
| 1.13 | Segmentation d'images d'objets de formes convexes avec une initialisation multiple. . . . .   | 36 |
| 1.14 | Fonction d'attache aux données $g(\nabla I)$ représentée pour deux jeux de paramètres $\alpha$ et $\beta$ différents (notés respectivement $a$ et $b$ dans la figure). . . . .  | 37 |
| 1.15 | Influence de la variation des paramètres du modèle de segmentation par contours actifs (cf. tableau 1.2). . . . .   | 39 |
| 2.1  | Effet d'un facteur. L'effet global d'un facteur représente l'influence du facteur sur la réponse quand il passe du niveau $x^-$ à $x^+$ . L'effet moyen d'un facteur représente l'influence du facteur sur la réponse quand il passe du niveau $x^-$ au niveau moyen et du niveau moyen au niveau $x^+$ . . . . . | 49 |



|      |   |     |
|------|---|-----|
| 2.2  | Interactions des facteurs $x_1$ et $x_2$ dans trois cas. . . . .  | 50  |
| 2.3  | Loi de Snedecor-Fisher. . . . .   | 56  |
| 2.4  | Contour de référence correspondant à une image de l'objet pale de turbine. . . . .  | 59  |
| 2.5  | Images à niveaux de gris correspondant à une séquence représentative de 4 acquisitions. Les contours initiaux sont représentés en blanc. . . . .  | 61  |
| 2.6  | Application du jeu de paramètres sous-optimal obtenu à la séquence d'images présentée figure 2.5. Amélioration de la segmentation. . . . .  | 69  |
| 3.1  | Plan de Tâches Hiérarchiques pour la construction d'une maison (figure extraite de Amol - 98 [99]). . . . .   | 77  |
| 3.2  | Schéma de situation (élément de base d'un SGT). . . . .   | 80  |
| 3.3  | Exemple d'un arbre de graphes de situations. . . . .  | 81  |
| 3.4  | Schéma de principe du dispositif de reconstruction 3D. . . . .  | 85  |
| 3.5  | Procédure de reconstruction 3D partielle. . . . .   | 87  |
| 3.6  | Graphe de situations décrivant le comportement de la tête de mesure « lumière structurée ». Ce graphe est une partie du SGT complet. Il est composé du schéma racine ainsi que des cinq schémas de situation de base nécessaires à la reconstruction 3D partielle de l'objet. Les différentes spécialisations associées à ces schémas seront détaillées plus loin dans ce chapitre. . . . . | 91  |
| 3.7  | Nuage de points 3D (reconstruction partielle) obtenu à la suite d'une acquisition avec la tête de mesure « lumière structurée » (pièce pale de turbine). . . . .  | 92  |
| 3.8  | Spécialisation de la situation « Déplacement ». . . . .   | 93  |
| 3.9  | Spécialisation de la situation « Acquisition ». . . . .   | 94  |
| 3.10 | Spécialisation de la situation « Traitement ». . . . .  | 96  |
| 3.11 | Spécialisation de la situation « reconstruction_partielle ». . . . .  | 97  |
| 3.12 | Spécialisation de la situation « replanification_dynamique ». . . . .   | 98  |
| 3.13 | Interface graphique de l'éditeur de graphes « SGTEditor ». . . . .  | 99  |
| 3.14 | Architecture de l'implémentation logicielle (entrées-sorties du SGT générique). . . . .   | 101 |
| 3.15 | Comportement du graphe générique en cas de replanification dynamique. . . . .   | 106 |
| 3.16 | Reconstruction partielle avec appel à la planification dynamique. Modification des conditions d'éclairage. . . . .  | 108 |
| 3.17 | Nuage de points 3D obtenue à la suite d'une modification des conditions d'acquisition (après appel à une replanification dynamique). . . . .  | 110 |
| 4.1  | Vue d'ensemble du système de planification. . . . .   | 114 |
| 4.2  | (a) Vue générale du robot de mesure (plate-forme d'acquisition). (b) Version prototype du robot de mesure. . . . .  | 116 |
| 4.3  | Modèles de référence utilisés dans le système d'inspection. . . . .   | 120 |
| 4.4  | Recalage de deux nuages de points 3D. . . . .   | 121 |
| 4.5  | Étapes du processus de reconstruction 3D. . . . .   | 124 |
| 4.6  | Évaluation globale de l'objet reconstruit par comparaison avec son modèle vérité terrain (MMT) exprimé dans le repère objet. . . . .  | 128 |

## TABLE DES FIGURES

---

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 4.7  | Architecture interne du graphe de contrôle et communication avec le module SGT. . . . .   | 129 |
| 4.8  | Mode d'échanges de données entre le graphe de contrôle et le module SGT.  | 130 |
| 4.9  | Protocole de communication entre le graphe de contrôle et le module « SGT » correspondant à une séquence de 4 acquisitions. . . . . | 134 |
| 4.10 | Reconstruction 3D complète de l'objet (et correspondant à une séquence de 4 acquisitions). . . . .                                  | 135 |
| 4.11 | Primitives 3D de type contour fournies par la tête stéréoscopique (pièce « L »). . . . .  | 138 |
| 4.12 | SGT « multi-agent » développé pour prendre en charge la coopération contours/surfaces. . . . .                                      | 140 |
| 4.13 | Système de planification adapté à la fusion de données et graphe de contrôle « associé ». . . . .                                   | 142 |
| 4.14 | Auto-apprentissage du graphe de contrôle via une boucle de retour incluant le SGT. . . . .  | 143 |



# Liste des tableaux

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 1.1  | Temps de calcul pour différentes résolutions de l'image originale. . . . .   | 33  |
| 1.2  | Jeux de paramètres appliqués aux deux images Gobelet et Pale de Turbine de la figure 1.15. . . . .   | 38  |
| 1.3  | Plage de variation des paramètres pour l'ensemble des essais de segmentation. . . . .  | 40  |
| 2.1  | Plan complet $2^3$ . . . . .   | 52  |
| 2.2  | Matrice des effets du plan complet $2^3$ . . . . .   | 52  |
| 2.3  | Matrice d'expériences d'un plan fractionnaire $2^{4-1}$ . La colonne du facteur $X_4$ correspond à la colonne de l'interaction $X_1X_2X_3$ du plan $2^3$ . . . . . | 54  |
| 2.4  | Tableau de correspondance des degrés de liberté. . . . .   | 54  |
| 2.5  | Valeurs des niveaux 1 et 2 du plan $2^6$ pour chaque facteur. . . . .  | 62  |
| 2.6  | Matrice des effets du plan $2^6$ (facteurs et interactions). . . . .   | 62  |
| 2.7  | Analyse de variance du plan $2^6$ . . . . .  | 63  |
| 2.8  | Valeurs des quatre niveaux de chaque paramètre du plan $L_{25}$ . . . . .  | 65  |
| 2.9  | Effets des différents paramètres pour chaque niveau du plan $L_{25}$ . . . . .   | 65  |
| 2.10 | Niveaux préconisés après analyse des effets du plan $L_{25}$ . . . . .   | 65  |
| 2.11 | Analyse de variance du plan $L_{25}$ . . . . .   | 66  |
| 2.12 | Niveaux par facteur du plan $L_{16}$ . . . . .   | 67  |
| 2.13 | Effets des différents paramètres du plan $L_{16}$ . . . . .  | 67  |
| 2.14 | Niveaux préconisés du plan $L_{16}$ . . . . .  | 68  |
| 2.15 | Analyse de variance du plan $L_{16}$ . . . . .   | 68  |
| 2.16 | Jeu de paramètres sous-optimal du plan $L_{16}$ . . . . .  | 70  |
| 2.17 | Valeurs des niveaux du plan $2^6$ . . . . .  | 70  |
| 2.18 | Niveaux préconisés du plan $2^6$ . . . . .   | 71  |
| 2.19 | Analyse de variance du plan $2^6$ . . . . .  | 71  |
| 2.20 | Analyse de variance du plan $L_{16}$ . . . . .   | 72  |
| 3.1  | Correspondances entre les approches HTN et SGT. . . . .  | 79  |
| 3.2  | Exemples de règles constituant le fichier « SGTTraversal » (règles de contrôle du parcours du SGT). . . . .  | 103 |
| 3.3  | Description textuelle du graphe de situations généré (partie du graphe représenté figure 3.7). . . . .   | 104 |
| 3.4  | Exemple de fichiers : (a) Fichier « règles propres à l'application ». (b) Fichier « prédicats d'état » liés à la tête de mesure. . . . .                           | 105 |

---

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 3.5 | Séquence des schémas de situation instanciés durant le parcours du graphe générique. . . . .   | 109 |
| 4.1 | Primitives <i>a priori</i> et traitements associés dans la chaîne de reconstruction 3D. . . . .  | 125 |
| 4.2 | Fichier « prédicats logiques d'état » traduisant les connaissances <i>a priori</i> nécessaires à la reconstruction 3D. . . . .                         | 132 |
| 4.3 | Fichiers résultats décrivant le déroulement de la séquence d'acquisition / reconstruction / évaluation 3D de l'objet (séquence de 4 acquisitions). . . | 136 |
| 4.4 | Algorithme de détection des passages par zéro de $\Psi$ . . . . .  | 150 |

# Introduction Générale

## Problématique

L'inspection dimensionnelle de pièces manufacturées constitue l'un des enjeux majeurs des applications industrielles de la vision par ordinateur. L'évaluation automatique sans contact de la qualité de fabrication est un élément clef de toute chaîne de production ; en effet, l'analyse du produit fini doit permettre, d'une part, de détecter la présence de défauts, ce qui peut conduire à une retouche ou à l'élimination de la pièce incriminée, et, d'autre part, de corriger en ligne les conditions de fabrication afin de les adapter à des phénomènes de dérive tels que l'usure des outils, la modification des conditions d'usinage, etc.

Avec cet objectif, en faisant appel à la vision par ordinateur, nous proposons le développement d'un système complet d'inspection et de contrôle qualité en charge de la gestion de l'ensemble des étapes d'acquisition, d'évaluation et de mesure dimensionnelle. Le système de mesure envisagé réclame en entrée une séquence d'images à niveaux de gris correspondant à différentes vues de l'objet analysé (les acquisitions sont assurées par un robot de mesure portant au bout de ses bras deux têtes de mesure, conçues respectivement pour la mesure de surfaces et de contours), ainsi que les modèles explicites de l'objet à inspecter (modèle CAO ou modèle vérité terrain). Il délivre en sortie une reconstruction complète, ainsi qu'une évaluation dimensionnelle de la pièce. La figure 1 illustre le principe de l'acquisition d'une séquence d'images nécessaire à la reconstruction 3D complète d'un objet.

Le but que nous nous fixons plus particulièrement consiste à automatiser le processus de reconstruction 3D de pièces manufacturées incluant des surfaces gauches<sup>1</sup>, de façon à obtenir une évaluation dimensionnelle complète, tout en satisfaisant des critères de temps d'exécution et de précision compatibles avec les contraintes industrielles.

Le système de planification développé repose sur l'exploitation de plusieurs sources de connaissance *a priori* portant non seulement sur l'objet à analyser, mais également sur son environnement. Par ailleurs, notre système de mesure doit prendre en compte un certain nombre de procédures existantes et les intégrer dans la chaîne de traitement. Parmi ces procédures, nous pouvons citer :

- une méthode de reconstruction 3D par lumière structurée,
- une méthode de recalage de nuages de points 3D.

La procédure de reconstruction 3D exploite, pour son fonctionnement, des données d'éta-

---

<sup>1</sup>Les surfaces gauches sont des surfaces qui ne sont pas définies d'une manière analytique.

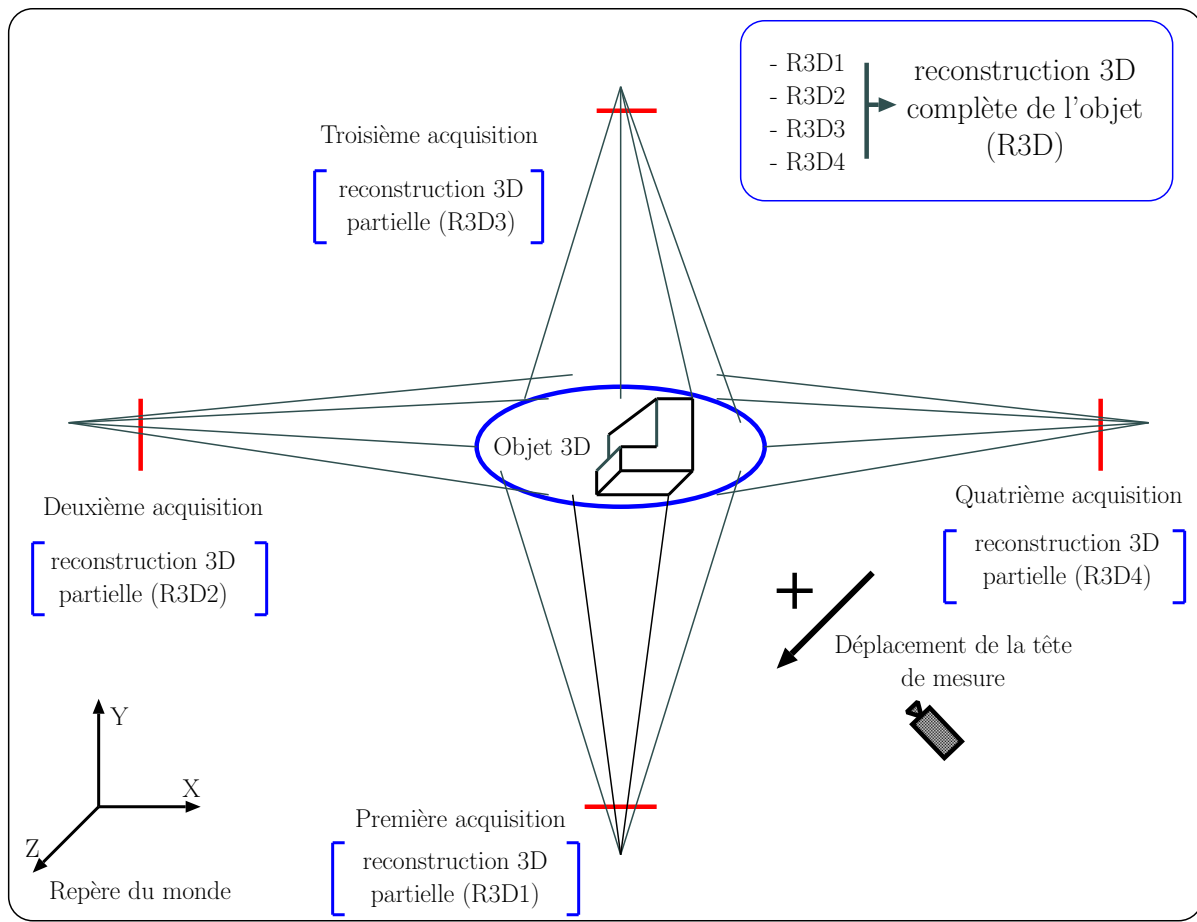


FIG. 1 – Séquence d’acquisitions en vue d’une reconstruction 3D complète d’un objet (exemple utilisant 4 acquisitions).

lonnage des caméras et de la tête de mesure.

Il est clair que le développement d’un système d’inspection dimensionnelle pouvant gérer l’ensemble des opérations demeure une tâche complexe. En effet, plusieurs points doivent être pris en compte, afin de déterminer la séquence d’acquisitions la plus favorable à une mesure 3D précise. Par exemple, parmi ces points, on peut mentionner :

- la position et l’orientation des têtes de mesure dans la scène,
- le nombre et l’ordre des acquisitions à réaliser et nécessaires à une reconstruction complète,
- la localisation de l’objet par rapport à la tête de mesure,
- le réglage des paramètres des différentes procédures liées à la reconstruction 3D partielle,
- l’étalonnage de la tête de mesure et de l’espace de mesure,
- le facteur d’échelle du système d’acquisition,
- etc.

Des caractéristiques souhaitables sont d’une part l’autonomie du système, reposant for-

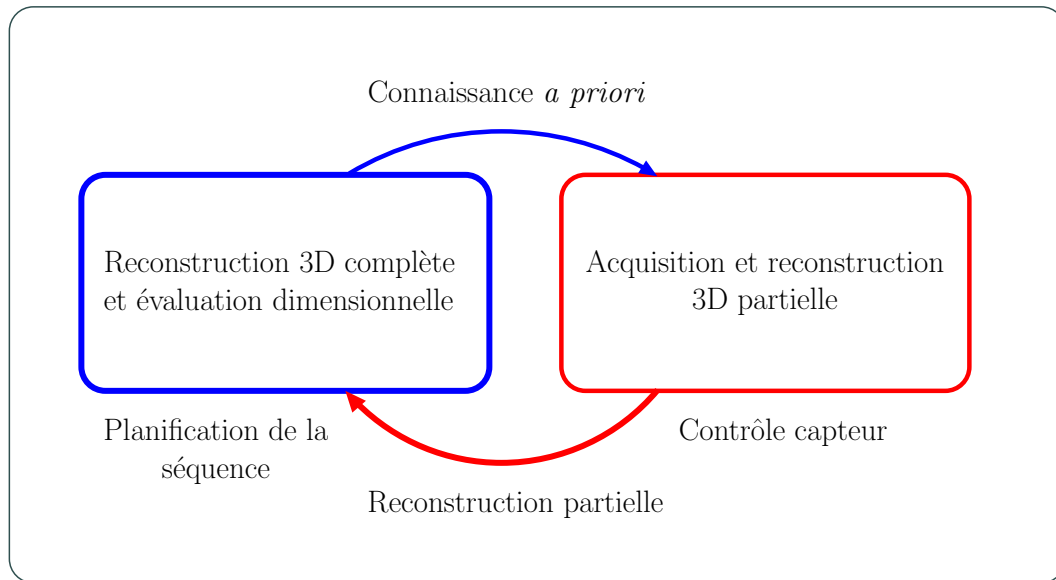


FIG. 2 – Vue d'ensemble du système mis en place.

tement sur une planification de toutes les configurations possibles que la tête de mesure peut rencontrer et sur la gestion de connaissances *a priori*, et d'autre part sa capacité d'adaptation dynamique aux conditions réelles de prise de vue dans la chaîne de production.

## Principe de la méthode proposée

La chaîne de traitement mise en place vise à décrire l'objet en trois dimensions à partir d'une séquence de plusieurs acquisitions, afin de couvrir la totalité des faces de l'objet. Dans ce contexte, nous avons divisé le problème en deux parties principales :

- Une partie chargée de décrire toute la chaîne de traitement et permettant une reconstruction 3D complète de l'objet, ainsi que son évaluation. La séquence d'acquisition correspondante est élaborée hors ligne par un opérateur expérimenté.
- Une partie en charge du contrôle de la tête de mesure et réalisant en ligne toutes les opérations d'acquisition et de reconstruction partielle planifiées par la première partie. À chaque pas d'acquisition de la séquence, elle doit générer la reconstruction 3D partielle correspondante.

Le système de planification à développer doit faire coopérer ces deux parties pour qu'il puisse générer, à la fin du processus, une reconstruction 3D complète de l'objet et procéder à son évaluation. La figure 2 illustre le système mis en place pour la reconstruction/évaluation 3D de pièces manufacturées.

La première partie contrôle la séquence d'acquisitions. Ce module fournit à la deuxième partie, et pour chaque étape de la séquence, l'ensemble des paramètres nécessaires, dé-



terminés *a priori* ; on peut ainsi citer la localisation de la tête de mesure, le type de procédures à exécuter ainsi que les valeurs des paramètres correspondants et les figures de mérite à atteindre. En retour, il récupère une reconstruction 3D partielle de l'objet, qu'il intègre aux reconstructions déjà obtenues, avant de la comparer aux données de référence. Cette référence peut être une vérité terrain fournie par une machine à mesurer tridimensionnelle, par exemple, ou un modèle conceptuel CAO (ensemble de primitives géométrique de type contour et/ou surface, pouvant inclure des informations de tolérance). Le processus est ensuite réitéré jusqu'à l'achèvement de toute la séquence d'acquisitions.

La deuxième partie modélise le comportement des têtes de mesure du robot d'inspection. Ce module réalise les opérations d'acquisition et de reconstruction partielle planifiées. Chaque étape du processus de reconstruction est représentée par un élément de base appelé « schéma de situation ». Ces « schémas de situation » sont connectés les uns aux autres et forment un graphe. Le parcours de ce graphe correspond à l'instanciation d'une suite de schémas de situation et donc à l'exécution de tous les traitements nécessaires à la reconstruction 3D partielle de l'objet. Ce module est également capable de s'adapter dynamiquement aux conditions réelles de prise de vue. Cette adaptation lui permet de modifier automatiquement des paramètres physiques de l'application (conditions effectives d'acquisition et de traitement des données) et donc de corriger en ligne les valeurs des paramètres définis *a priori*.

Notre contribution porte sur ces deux axes complémentaires, que nous allons décrire dans les quatre chapitres de ce mémoire de thèse. Les deux premiers chapitres traitent du capteur de mesure utilisé et abordent l'automatisation d'une procédure de traitement d'images dédiée à la reconstruction 3D par lumière structurée. Les deux derniers sont consacrés au contrôle automatique de ce capteur et traitent de la planification d'une séquence d'acquisitions et de reconstructions en vue de l'évaluation dimensionnelle de l'objet.

Afin d'illustrer et de montrer l'efficacité de notre méthode, nous avons développé un système de planification qui a été testé et validé avec une version prototype du robot de mesure.

## Organisation du mémoire

Ce mémoire de thèse comporte quatre chapitres. Il est organisé comme suit : le premier chapitre décrit une procédure d'analyse du contenu d'images à niveaux de gris conduisant à la détection automatique de régions d'intérêt correspondant à l'objet observé. Cette procédure isole l'objet du fond de l'image, afin de n'appliquer les procédures de reconstruction 3D qu'aux seules données relatives à l'objet. En effet, les données images relatives à l'environnement de l'objet sont susceptibles de générer des artefacts propres à nuire, voire à mettre en échec les algorithmes de traitement. Afin d'éviter tout post-traitement, nous avons mis en œuvre une approche de segmentation utilisant les contours actifs qui nous assure de toujours obtenir des contours fermés. Pour ce faire, une information *a priori* concernant la localisation grossière et la forme générale de l'objet dans la scène est supposée être disponible via le système de planification et auto-

---

rise le positionnement des contours initiaux. L'implémentation par ensemble de niveaux assure une gestion satisfaisante des changements de topologie des contours et permet la détection des frontières de régions à niveaux de gris sensiblement homogènes. Notre algorithme de segmentation par contours actifs a été appliqué à des images de pièces manufacturées acquises dans des conditions réalistes. La qualité du masque obtenu satisfait aux exigences des procédures de reconstruction 3D qui suivent, bien que le résultat obtenu dépende fortement de la valeur des nombreux paramètres liés à la méthode. Leur réglage s'avère délicat et il s'effectue généralement par une méthode du type essai-erreur.

Dans l'optique de fournir un outil de réglage des paramètres de l'algorithme de segmentation par contours actifs, nous avons adopté une approche qualité mettant en œuvre les plans d'expériences. Le chapitre deux est ainsi dédié à la présentation de cet outil statistique permettant de déterminer un jeu de paramètres sous-optimal après avoir effectué un minimum d'essais. L'analyse de l'influence des facteurs intervenants dans l'algorithme des contours actifs est menée en faisant judicieusement varier leur valeur et en comparant le résultat de chaque segmentation avec une segmentation idéale de référence. Une note dépendant du taux de recouvrement des contours est alors calculée automatiquement et permet l'interprétation objective des résultats. L'intérêt majeur de la méthode réside dans sa capacité à définir le plus petit nombre d'expériences à mener, ainsi que les valeurs associées aux différents facteurs, et à permettre de tirer le maximum d'enseignement de chaque expérience. Les valeurs de paramètres obtenus sont valides pour une famille d'images à niveaux de gris présentant sensiblement les mêmes caractéristiques. Les résultats obtenus dans le cadre du réglage des paramètres de l'algorithme utilisant les contours actifs illustrent l'efficacité de l'approche par plans d'expériences.

Le chapitre trois présente le module en charge des procédures d'acquisition et de reconstruction 3D partielle de l'objet. Ce système est basé sur l'exploitation des graphes de situations et modélise de façon générique l'ensemble des comportements possibles de la tête de mesure ainsi que son environnement (par exemple, pour gérer des sources lumineuses). Les différentes procédures assurant le contrôle de la position de la tête de mesure, l'acquisition des images à niveaux de gris, les algorithmes de traitement d'images et de reconstruction 3D sont regroupées en éléments abstraits appelés situations, qui sont interconnectées les unes aux autres. Le graphe qui en résulte décrit de façon exhaustive l'ensemble des enchaînements de traitements susceptibles d'être réalisés par la tête de mesure, indépendamment de toute description de l'objet inspecté. Ce graphe réclame en entrée les valeurs des paramètres propres à une acquisition donnée ainsi que les figures de mérite devant être atteintes. Ce graphe va automatiquement instancier les situations permettant de générer la description 3D partielle correspondante. L'intérêt de cette représentation réside dans sa faculté d'auto-adaptation aux conditions réelles d'acquisition, puisque le parcours effectif du graphe dépend des résultats intermédiaires obtenus au cours de son instanciation. Des essais ont été menés avec la tête de mesure « lumière structurée » afin de valider la démarche qui peut aisément être étendue au contrôle d'autres têtes de mesure, ainsi qu'au contrôle simultané de plusieurs capteurs.

Les paramètres nécessaires à l'exécution du module d'acquisition et de construc-

tion 3D partielle sont fournis par le module de planification qui fait l'objet du quatrième chapitre. Ce système est constitué d'un graphe de contrôle synthétisant toutes les connaissances *a priori* liées au modèle de l'objet à évaluer, ainsi qu'au système d'acquisition. Il décrit l'ensemble des opérations à réaliser afin de pouvoir générer une description 3D complète et d'évaluer dimensionnellement un objet particulier. Cette chaîne de traitement est élaborée hors-ligne par un opérateur expérimenté. Elle synthétise, plus précisément, une séquence d'acquisitions et de reconstructions 3D partielles. Pour chaque élément de cette séquence, le système de planification fait appel au module de contrôle de la tête de mesure décrit dans la section précédente, et obtient en retour la description 3D partielle correspondante. Le système va alors recalculer la nouvelle description par rapport à celles déjà obtenues et pourra ainsi réaliser une mesure incrémentale. L'évaluation dimensionnelle complète n'est menée que lorsque la séquence complète a été traitée et que les données 3D obtenues et les données 3D de référence ont été exprimées dans un repère commun. L'auto-apprentissage est possible du fait que le module de contrôle de la tête de mesure retourne au module de planification les valeurs des paramètres effectivement utilisés (qui peuvent donc être différentes des valeurs définies *a priori*). Des résultats concernant une reconstruction 3D complète, exprimée sous la forme de nuages de points 3D, sont présentés afin de valider l'approche développée.

Le système de planification développé dispose donc d'un comportement dynamique lui permettant de s'adapter automatiquement aux conditions réelles de prise de vue et aux résultats effectifs des différents traitements. Il peut ainsi modifier les paramètres physiques de l'application afin de corriger les erreurs rencontrées en ligne (et qui n'étaient pas planifiées hors ligne) et donc d'améliorer la qualité des résultats obtenus. Une réflexion a par ailleurs été menée sur les extensions possibles du travail réalisé. Elles concernent la modularité et la flexibilité du système de planification et portent notamment sur la possibilité de contrôler une deuxième tête de mesure, par exemple stéréoscopique, venant enrichir le système de nouvelles capacités sensorielles, sur la fusion de données contours/surfaces afin de mieux exploiter les données des deux têtes de mesure, et sur la possibilité du système développé de s'auto-adapter pour fournir une meilleure qualité de reconstruction 3D de nouvelles pièces, par exemple, dans la chaîne de production. La présentation de ces extensions concluent ce mémoire de thèse.

# Chapitre 1

## Utilisation des contours actifs pour le détournement d'un objet du fond de l'image

### 1.1 Introduction

Le système de mesure mis en œuvre a pour but l'analyse en « temps réel application » et sans contact de pièces manufacturées quasi-polyédriques comportant partiellement des surfaces libres. L'image à niveaux de gris est obtenue après projection d'une lumière structurée (des plans de lumière alternativement noirs et blancs) sur l'objet à inspecter. L'étape de segmentation permet d'obtenir la position des franges dans l'image avec une précision sous-pixelle, alors que l'identification proprement dite consiste à numéroter les franges. Deux procédures d'étalonnage menées hors ligne fournissent une liste faisant correspondre à tout pixel de coordonnées  $(u, v)$  dans l'image et appartenant à la frange d'indice  $i$ , un point dans l'espace 3D dont les coordonnées  $(X, Y, Z)$  sont exprimées dans le repère de la tête de mesure. La figure 1.1 résume ces différentes étapes.

L'étape d'identification des franges est la plus délicate du processus. En effet, une fois la frange centrale détectée (elle est plus large que les autres), on numérote dans l'ordre croissant les franges situées sur sa droite, et dans l'ordre décroissant les franges situées à sa gauche. Ce comportement est susceptible de poser quelques problèmes puisqu'il porte sur l'ensemble de l'image. Ainsi, les franges projetées hors de l'objet (par exemple sur le support maintenant l'objet comme présenté figure 1.2) peuvent conduire à des erreurs d'étiquetage du fait des discontinuités avec les franges projetées sur l'objet, ou bien fausser la détection de la frange centrale. De plus, les points 3D générés à partir de ces franges parasites devront faire l'objet d'un post-traitement afin de les éliminer du nuage de points décrivant l'objet à évaluer.

Il est donc nécessaire de mettre en place un processus de détection de l'objet dans l'image comme étape préliminaire à l'identification des franges. Cette étape a été dans un premier temps réalisée par un opérateur humain et consiste à définir une zone d'intérêt dans laquelle les différentes étapes de la chaîne de traitement seront appliquées. Afin d'automatiser ce processus, nous proposons de déterminer automatiquement un masque

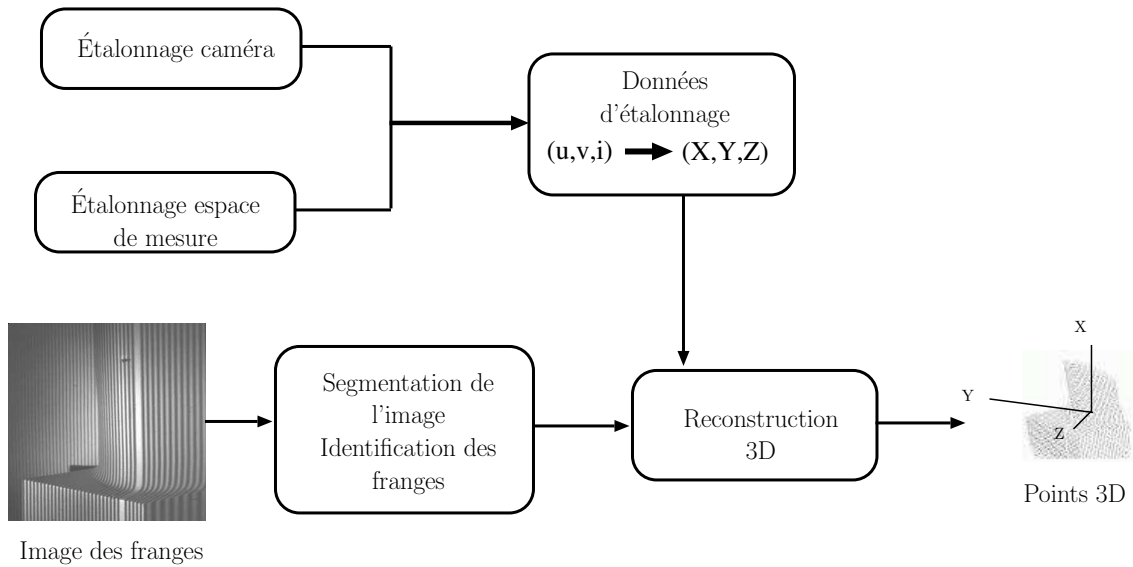


FIG. 1.1 – Chaîne de traitement « lumière structurée ». Passage d'une image à niveaux de gris à un nuage de points 3D.

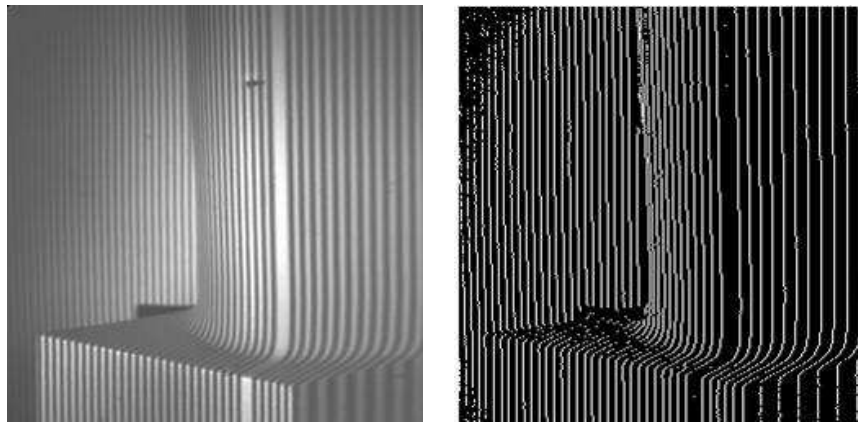


FIG. 1.2 – Segmentation de l'image des franges mettant en évidence des franges parasites susceptibles de fausser la reconstruction 3D de l'objet.

## 1.1 Introduction

---

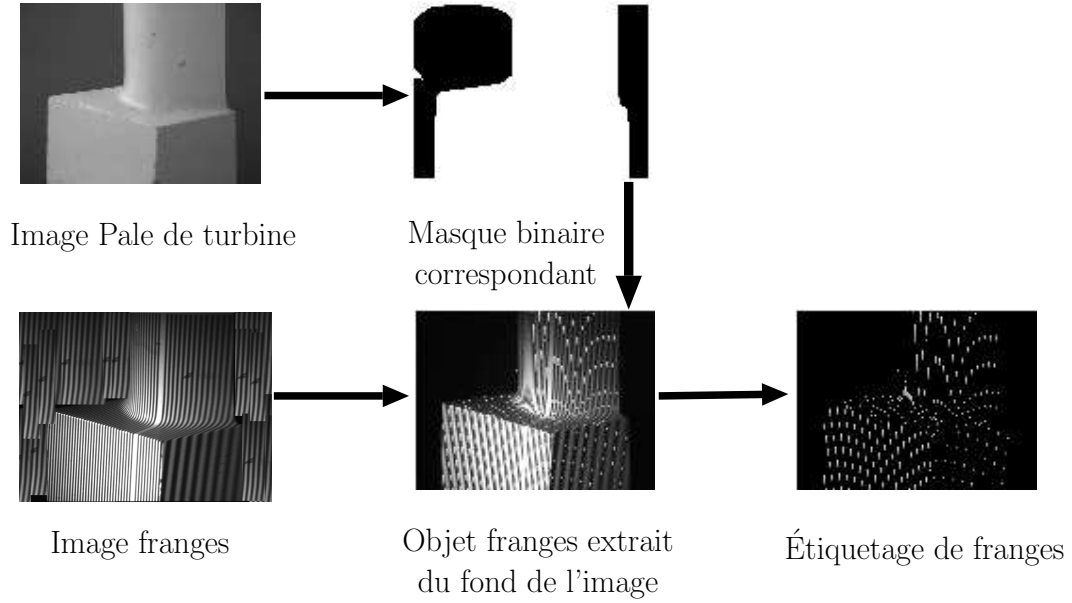


FIG. 1.3 – Chaîne de traitement permettant d’isoler la région de l’objet à inspecter du fond de l’image.

binaire de l’objet à évaluer à partir d’une image à niveaux de gris prise dans les mêmes conditions que celles de l’image des franges. L’analyse de cette image devra conduire à une partition en deux zones distinctes : d’une part la région qui correspond à l’objet, et d’autre part le reste de l’image. Le masque binaire obtenu est ensuite appliqué à l’image des franges pour ne retenir que la région de cette image dans laquelle seront réalisées les étapes de segmentation et d’identification. Le schéma de la figure 1.3 reprend les différentes étapes de ce processus.

Le processus de détection proposé vise donc à l’extraction automatique, à partir d’images à niveaux de gris, des régions correspondant à l’objet à inspecter, et plus précisément à la séparation des données objet du fond de l’image. L’information dont nous disposons se résume à l’intensité des pixels. Dans le cadre de notre application, il se trouve que les zones correspondant au fond présentent certaines caractéristiques visuelles communes telles qu’un niveau de gris faible et relativement homogène. La segmentation de l’objet peut ainsi être associée au problème de la détection de contours en faisant l’hypothèse que le contour est grossièrement défini comme étant une courbe séparant des régions homogènes (typiquement le fond de l’image et l’objet inspecté). Nous avons donc choisi d’utiliser une segmentation se basant principalement sur l’information gradient.

Le contour d’un objet est une courbe fermée dans une image 2D ou une surface fermée dans une image 3D. On peut la détecter en utilisant les approches classiques de type gradient (comme, par exemple, le filtre dérivateur [35, 36]). Une détection partielle constitue l’inconvénient majeur de ces approches : si certaines parties du contour ne présentent pas de gradient d’intensité suffisamment élevé pour être détecté, il est alors nécessaire de mettre en œuvre des procédures de chaînage de points de contour afin d’obtenir des contours fermés. Par contre, en utilisant les approches exploitant des modèles

déformables, par exemple par contours actifs, on accède directement à une information de plus haut niveau que l'élément de contour isolé dans l'image ; ce qui permet, entre autres, de diminuer la sensibilité au bruit du résultat [33]. On est aussi assuré d'obtenir des contours complètement fermés et par conséquent aucun post-traitement n'est nécessaire.

La génération du masque binaire correspondant à l'objet est réalisée à partir d'informations *a priori* sur la scène observée fournies par un système de planification. On considère par conséquent que l'on dispose de connaissances *a priori* sur le nombre, la localisation et la forme générale des régions appartenant au fond. Ces informations seront mises à profit afin d'initialiser la segmentation.

Le paragraphe 2 présente les fondements des contours actifs. L'implémentation de la méthode par les ensembles de niveaux est présentée paragraphe 3. Une application pour la construction d'un masque binaire de l'objet ainsi que les résultats obtenus sont donnés paragraphe 4. Enfin, une conclusion synthétisant les travaux réalisés pour cette étape de la chaîne de traitement et leur exploitation dans le cadre de la reconstruction et de l'évaluation 3D est présentée paragraphe 5.

## 1.2 Contours actifs

### 1.2.1 Principe de base

Les techniques itératives d'évolution de courbes sont des méthodes qui ont fait leur apparition à la fin des années 80 et qui ont largement été étudiées dans le domaine du traitement d'images, particulièrement pour des applications de segmentation. Ces techniques constituent un sous-ensemble des approches « modèles déformables », apparus dès la fin des années 70, et sont regroupées sous la dénomination générale de contours actifs. Parmi ces approches, le modèle des contours actifs s'est révélé récemment être un outil performant pour la segmentation semi-automatique et/ou automatique des images fixes. Les contours actifs tirent leur origine des modèles élastiques [15], et la communauté scientifique s'accorde à en attribuer la paternité à l'équipe Kass, Witkin et Terzopoulos [81] qui introduisent les *snakes* comme des courbes planes paramétriques. Les *snakes* tiennent leur nom de leur aptitude à se déformer afin d'épouser les frontières d'une région dans l'image. Le principe de base commun de ces méthodes consiste à placer une courbe initiale dans une image et de la soumettre à une contrainte ; le contour actif évolue ensuite jusqu'à ce que cette contrainte s'annule.

Quel que soit le modèle de contour actif, son évolution est basée sur deux types de contraintes. Le premier type de contraintes dépend des propriétés géométriques du contour. Le second, quant à lui, est déterminé à partir de l'information contenue dans l'image, telle que le gradient de l'intensité. Historiquement, deux grandes familles d'approches coexistent pour la prise en compte de cette information dites « d'attache aux données ». Les approches frontières prennent en compte l'information située à proximité immédiate du contour dans l'image, alors que les approches régions considèrent l'ensemble de l'information image.

### 1.2.2 Approches frontières

#### Le modèle classique

Ces modèles initialement proposés en 1988 par Kass *et al.* [81] ont été appliqués avec succès afin de traiter une grande variété d'applications en vision par ordinateur. L'approche dite « classique », comme d'autres approches fondées sur un modèle semblable [155], est basée sur la déformation d'un contour  $\Gamma$  (ou d'une surface) initial fermé autour des objets à détecter. Cette déformation est obtenue par la définition d'une fonctionnelle d'énergie  $J(\Gamma)$  que l'on cherche à minimiser, de telle sorte, qu'à travers les différents termes du critère énergétique, le minimum soit atteint lorsque le contour déformable se trouve sur les parois de l'objet à détecter, et vérifie des contraintes de régularité géométrique.

Soit  $\Gamma : [a, b] \rightarrow R^2, p \rightarrow \Gamma(p)$  une courbe fermée paramétrée, et soit  $I$  une image donnée dans laquelle nous voulons détecter les bords d'un objet. Le modèle du *snake* vise à réduire l'énergie suivante :

$$J[\Gamma(p)] = \alpha_1 \int_a^b |\Gamma'(p)|^2 dp + \alpha_2 \int_a^b |\Gamma''(p)|^2 dp + \alpha_3 \int_a^b g(|\nabla I(\Gamma(p))|) dp \quad (1.1)$$

$p$  est l'abscisse curviligne ;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  représentent dans cette fonctionnelle des constantes réelles positives. Les deux premiers termes représentent l'énergie interne - de régularisation -. Quant au troisième terme, il représente ce que l'on appelle l'énergie externe - de consistance avec les données -. Le premier terme (appelé terme d'élasticité), dépendant de la dérivée première du contour, est associé à une minimisation de la longueur de ce dernier. Quant au second terme dépendant de la dérivée seconde, il modélise une plaque mince et pénalise les fortes courbures ; on le qualifie de terme de rigidité. Le troisième terme de l'équation est lié à l'intensité de l'image à segmenter et doit correspondre à une fonction monotone, positive et strictement décroissante. Dans la littérature, plusieurs formulations de la fonction  $g$  ont été étudiées, comme par exemple le cas où  $g(\nabla I) = -|\nabla I|^2$  [81]. Nous reviendrons un peu plus loin dans ce chapitre, plus précisément dans la section 1.4.3, en détail sur cette fonction d'attache aux données.

La minimisation du critère  $J$  est obtenue par la résolution de l'équation d'Euler-Lagrange associée à l'inconnue qui est dans notre cas le contour  $\Gamma$  (l'énergie  $J$  n'étant pas en général convexe, on ne peut trouver qu'un minimum local) :

$$-\alpha_1 \Gamma''(p) + \alpha_2 \Gamma^{(4)}(p) + \alpha_3 \nabla g(\Gamma) = 0 \quad (1.2)$$

Résoudre l'équation 1.2 nécessite une discrétisation, correspondant à l'hypothèse de paramétrisation du contour proposée par Kass *et al.* dans [81]. Le système linéaire résultant étant mal conditionné (le lecteur pourra trouver des détails dans Berger [9]), la résolution directe de cette équation stationnaire n'est pas possible. Une solution généralement adoptée consiste à transformer (1.2) en une équation évolutive dépendant d'une variable temporelle. On obtient alors le schéma dynamique suivant (descente de gradient) :



$$\frac{\partial \Gamma(p, t)}{\partial t} = \alpha_1 \frac{\partial \Gamma^2(p, t)}{\partial p^2} - \alpha_2 \frac{\partial \Gamma^4(p, t)}{\partial p^4} - \alpha_3 \nabla g(\Gamma) \quad (1.3)$$

À l'équilibre, le contour  $\Gamma$  vérifie l'équation (1.2) et correspond à un minimum local de l'énergie  $J$ .

Cette formulation présente quelques inconvénients :

- Le résultat de la convergence dépend de la paramétrisation de la courbe. Pour un même contour initial, le minimum local obtenu peut différer selon la paramétrisation retenue, et, à valeurs de paramètre identiques, le contour obtenu peut varier selon les conditions d'initialisation.
- L'évolution est considérée inachevée, car la composante tangentielle de la force qui déforme le contour peut ne pas s'annuler, même si le contour épouse exactement les frontières de la région.
- Un autre inconvénient de la composante tangentielle est lié à la modification de la position des échantillons le long du contour. Cumulée à une concentration des échantillons dans les zones de forts gradients, générée par la fonction d'attache aux données  $g$ , cette modification de l'espacement entre les points de contour peut conduire à une instabilité numérique du processus d'évolution.
- Si plusieurs objets apparaissent dans une image donnée, il est impossible de les détecter tous à partir d'un seul contour initial, car le modèle ne permet pas de gérer directement le changement de topologie du contour actif.
- Cette approche est qualifiée de « myope », car dans la fonction d'attache aux données  $g$ , seules les informations locales du gradient aux bords de la courbe sont prises en compte. Ceci conduit à une grande sensibilité vis-à-vis de l'initialisation ainsi que du bruit dans l'image. Le choix de la position initiale de la courbe est loin d'être facile : si elle est trop éloignée des frontières, elle risque de converger vers un minimum local inintéressant. Elle doit donc être choisie à proximité de la solution recherchée afin que le résultat soit fiable et précis.

## Le modèle géométrique

Afin de s'affranchir de certains de ces problèmes, Osher et Sethian [1988] proposent de remplacer la minimisation d'un critère énergétique par une nouvelle approche de l'évolution de la courbe en la considérant comme la propagation d'un front d'onde dépendant du temps. Cette conception géométrique (et non plus paramétrique) de l'évolution du contour repose sur l'équation de diffusion de la chaleur. Caselles *et al.* en 1993 [17] ainsi que Malladi *et al.* [102, 101, 100] ont mis en œuvre ce nouveau modèle. Le point de vue adopté est celui d'utiliser l'équation aux dérivées partielles (EDP) suivante :

$$\frac{\partial \Gamma(p, t)}{\partial t} = F \vec{N} \quad (1.4)$$

$\Gamma$  représente le contour déformable,  $F$  est la force ou vitesse d'évolution du contour, et  $\vec{N}$  est la normale unitaire intérieure à la courbe  $\Gamma$  au point  $p$  et au temps  $t$ . Dans ce

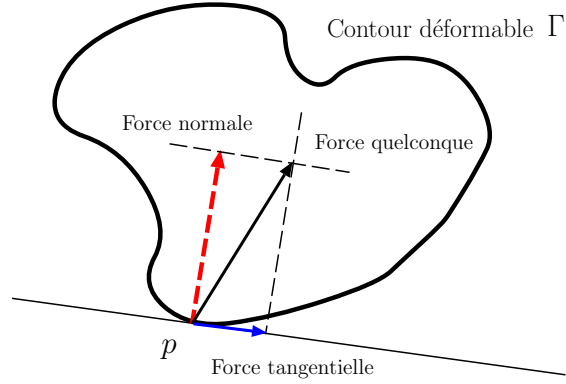


FIG. 1.4 – Contour actif 1D soumis à une force quelconque (composante normale et tangentielle).

modèle, la composante tangentielle de la force n'apparaît pas puisqu'elle n'affecte que la paramétrisation du contour (voir figure 1.4).

S'appuyant sur les travaux de Cohen [28] pour l'introduction de la force ballon  $a$ , et ceux de Osher *et al.* [115], Caselles *et al.* [17] proposent enfin le modèle des contours géométriques pour une segmentation d'images :

$$\frac{\partial \Gamma(s, t)}{\partial t} = g(|\nabla I|) (a + \kappa) \vec{N} \quad (1.5)$$

$s$  est l'abscisse curviligne paramétrée par la longueur d'arc. Le contour évolue en fonction d'une vitesse  $F$  dépendant de la géométrie du contour et composée de trois termes :

- $a$  est un terme de propagation qui influence le sens d'évolution du contour. Il guide la minimisation ou la maximisation de l'aire intérieure au contour. Positif, il provoque son expansion (il fixe la convexité) ; strictement négatif, il favorise la contraction de la courbe (il fixe la concavité),
- $\kappa$  représente la courbure du contour  $\Gamma$  et influence la régularité du contour actif,
- $g(|\nabla I|)$  constitue le terme d'attache aux données (vu précédemment) qui permet au contour d'arrêter son évolution.

Dans cette formulation, la segmentation de l'image est dictée par une équation d'évolution portant directement sur le contour et non plus sur une minimisation d'énergie. Nous signalons au lecteur que ce modèle s'adapte sans difficulté théorique en dimension trois ([19, 88]). Ce modèle présente toutefois un handicap : le contour ne cesse son évolution que lorsque le terme d'attache aux données est nul. Or, dans la plupart des images, le gradient prend des valeurs très différentes le long des frontières des régions à segmenter. Il est donc délicat de fixer le seuil du gradient à partir duquel la fonction  $g(|\nabla I|)$  va s'annuler ; en effet, si ce seuil est trop faible, le contour va cesser prématurément son évolution, mais s'il est trop élevé, le contour va traverser certaines frontières.

## Le modèle géodésique

À partir de la formulation des modèles géométriques, Casselles *et al.* [18] ont introduit le modèle des contours actifs dits géodésiques, ainsi nommés car il converge vers une solution de longueur minimale. Ces auteurs démontrent que les limites du modèle classique peuvent être dépassées en ne prenant plus en compte le terme de contrainte de rigidité (cas particulier des contours actifs géométriques). Partant d'une formulation énergétique, ils s'appuient sur le principe du moindre effort de Maupertuis, ainsi que sur le principe de Fermat, pour montrer que minimiser le critère d'énergie  $J(\Gamma)$  de l'équation (1.1) est équivalent à minimiser la longueur  $L_\Gamma$  du contour :

$$L_\Gamma = \int_0^1 g(|\nabla I(\Gamma(p))|) |\Gamma'(p)| dp \quad (1.6)$$

Ou encore, puisque  $|\Gamma'(p)| dp = ds$ ,

$$L_\Gamma = \int_0^1 g(|\nabla I(\Gamma(s))|) ds \quad (1.7)$$

Dans l'équation 1.7, la longueur du contour est obtenue en pondérant l'élément de longueur  $ds$  par une information liée aux frontières des régions, au travers de la fonction  $g(|\nabla I(\Gamma(s))|)$ .

La dérivation des équations d'Euler-Lagrange [77][150] à partir de (1.6) conduit à l'EDP suivante, associée à l'évolution du contour  $\Gamma$  :

$$\frac{\partial \Gamma(p, t)}{\partial t} = g(|\nabla I|) k \vec{N} - \langle \nabla g, \vec{N} \rangle \vec{N} \quad (1.8)$$

où  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  représente le produit scalaire de deux vecteurs.

En ajoutant à cette équation un terme de propagation (du type « force ballon » [28] [18]), on obtient l'EDP générique des contours actifs dits géodésiques :

$$\frac{\partial \Gamma(p, t)}{\partial t} = g(|\nabla I|) (a + k) \vec{N} - \langle \nabla g, \vec{N} \rangle \vec{N} \quad (1.9)$$

Avec pour paramètres :

- $\vec{N}$  représente la normale intérieure à la courbe,
- $a$  est un terme de propagation qui permet au contour de se contracter ( $a$  négatif) ou de se dilater ( $a$  positif) et qui accélère la convergence du processus,
- $g()$  fonction d'attache aux données (appelée également terme de consistance avec les données [33]), permettant l'évolution de la courbe dans les régions de niveau de gris homogène, et son arrêt à proximité des frontières de la région associée à l'objet dans l'image.
- $\langle \nabla g, \vec{N} \rangle \vec{N}$  est le terme propre aux modèles géodésiques qui attire le contour vers les frontières des régions (le terme  $\nabla g$  pointe vers le milieu de la frontière) et qui améliore donc la convergence de l'évolution.

Le terme géodésique  $\langle \nabla g, \vec{N} \rangle \vec{N}$  est actif dans les zones de fort gradient (correspondant à une valeur très faible ou nulle de  $g(|\nabla I|)$ ) et permet ainsi de positionner finement le

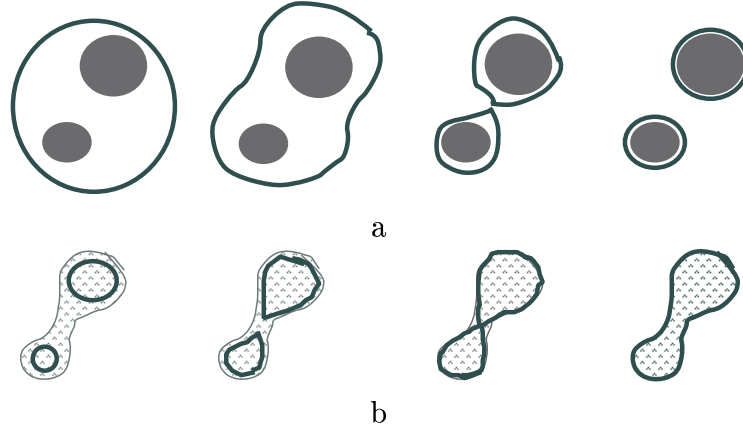


FIG. 1.5 – Évolution d’un contour actif avec changement de topologie. (a) Séparation en deux contours. (b) Fusion de deux contours en un seul contour.

contour sur la frontière et donc d’améliorer la convergence de ce dernier. Dans les zones de niveaux de gris homogène, le terme géodésique devient négligeable et laisse le soin au terme  $g(|\nabla I|)$  de faire évoluer le contour. Il améliore donc notablement la détection des frontières caractérisées par d’importantes variations du gradient.

Ce nouveau terme propre aux contours actifs géodésiques permet également de s’affranchir partiellement de la constante  $a$  (force ballon) qui, en tant que paramètre extérieur, est toujours délicat à fixer. La force ballon reste toutefois nécessaire pour compenser le changement de signe éventuel de la courbure. Elle permet également d’accélérer la convergence du processus.

Bien que cette approche soit capable de gérer les changements de topologie (voir figure 1.5) par le biais d’une implémentation judicieuse, le signe de la vitesse d’évolution demeure constant pour une segmentation donnée. Ainsi la courbe n’évolue que dans une seule direction au cours d’un même processus d’évolution. Cette évolution monodirectionnelle impose que, pour détecter une région, une information *a priori* sur sa localisation soit donnée; en effet, le contour initial doit, soit contenir l’objet dans sa globalité, soit être totalement inclus dans l’objet considéré. Amadiou dans [3] propose de modifier le terme lié à la force ballon dans l’expression de la vitesse d’évolution afin de permettre une évolution dans les deux sens à la fois, c’est-à-dire une évolution bidirectionnelle. Autrement dit, sur la même courbe, des points vont évoluer en expansion tandis que d’autres vont évoluer en rétraction. Cette nouvelle formulation de l’approche permet non seulement de détecter les objets de formes complexes (comprenant des angles aigus, des trous, etc.), mais aussi de disposer d’un degré de liberté quant aux différentes positions des contours initiaux (englobant l’objet, entièrement inclus dans l’objet ou à cheval sur la région de l’objet, etc.).

Pour récapituler l’essentiel, nous pouvons dire que les contours actifs géodésiques rassemblent les avantages des contours actifs classiques et géométriques. L’équation d’évolution a une interprétation simple. En effet, chaque point du contour actif doit évoluer

selon la direction de sa normale afin de diminuer la longueur de la courbe  $\Gamma$ .

### 1.2.3 Approches régions

Dans le cadre des approches frontières, l'attache aux données demeure de nature locale puisqu'elle est prise en compte seulement le long du contour courant. De plus, elle n'est calculée qu'en fonction du gradient dans l'image, une information malheureusement sensible au bruit et aux artefacts dans l'image. Ces limitations ont poussé les recherches vers des approches dites « régions » [19, 43, 88, 103] pour lesquelles l'attache aux données dépend de toute l'information contenue dans l'image [91, 97, 47]. Le principe général repose sur l'évolution d'un contour  $\Gamma$  qui partitionne l'image, une fois la convergence atteinte, en plusieurs régions de caractéristiques différentes. Un seul contour permet une segmentation en deux classes  $\Omega_{int}$  et  $\Omega_{ext}$ , où  $\Omega_{int}$  représente le domaine défini par l'intérieur du contour  $\Gamma$ , et  $\Omega_{ext}$  le domaine défini par l'extérieur. L'attache aux données repose généralement sur une modélisation statistique des régions définies par la partition courante, mais on peut aussi trouver des approches qui incorporent également une information locale, située le long du contour. À l'origine des modèles de contours actifs régions, nous pouvons évoquer la fonctionnelle de Mumford et Shah proposée dans [110], qui a servi de référence pour de nombreux travaux, comme par exemple dans [47].

#### La fonctionnelle de Mumford-Shah

Mumford et Shah proposent dans [110] de segmenter une image  $I$  à l'aide d'une fonction image  $u$ , lisse par morceaux, par une minimisation d'énergie :

$$J^{MS}(u, \Gamma) = \int \int_{\Omega} (I - u)^2 dx + \alpha_1 \int \int_{\Omega} |\nabla u|^2 dx + \alpha_2 H^1(\Gamma) \quad (1.10)$$

Où  $H^1$  est la mesure de Hausdorff, qui étend la notion de longueur aux contours non réguliers.

Le premier terme du membre de droite est un terme de fidélité aux données qui force la ressemblance de l'image reconstruite  $u$  avec celle d'entrée. Le second terme impose le lissage de  $u$  partout sauf sur les contours  $\Gamma$ . Quant au troisième terme, il contraint la longueur des contours. Plusieurs simplifications de ce modèle ont été proposées dans la littérature. Nous pouvons évoquer les travaux de Mumford et Shah dans [110] qui proposent d'utiliser une valeur arbitrairement grande du paramètre  $\alpha_1$ , ce qui conduit à favoriser le terme de lissage et donc à réaliser la recherche des régions d'intensité constante, tout en préservant les discontinuités (*i.e.* le « cartoon limit » de la fonctionnelle de Mumford et Shah). L'énergie à minimiser devient alors :

$$J^{MS'}(u, \Gamma) = \int \int_{\Omega} (I - u)^2 dx + \alpha_2 H^1(\Gamma) \quad \text{et} \quad |\nabla u| = 0 \quad \text{sur} \quad \Omega_{\Gamma} \quad (1.11)$$

où  $\Omega_{\Gamma}$  représente le domaine image défini par le contour  $\Gamma$ . D'après d'autres hypothèses présentées par les mêmes auteurs [110], une fois que  $\Gamma$  est fixée, la minimisation conduit à prendre pour  $u$ , dans les différentes régions délimitées par

## 1.2 Contours actifs

---

$\Gamma$ , les valeurs moyennes des niveaux de gris. Pour le cas de deux régions, la fonctionnelle prend alors la forme de [47] :

$$J_{\text{cartoon}}(\Gamma) = \int \int_{\Omega_{\text{int}}} (I - \mu_{\text{int}})^2 dx + \int \int_{\Omega_{\text{ext}}} (I - \mu_{\text{ext}})^2 dx + \alpha_2 H^1(\Gamma) \quad (1.12)$$

$\mu_{\text{int}}$  et  $\mu_{\text{ext}}$  sont les moyennes inconnues des régions  $\Omega_{\text{int}}$  et  $\Omega_{\text{ext}}$ .

Chan et Vese dans [22] ont proposé un modèle de contour actif région (appelé « active contours without edges »), résultant de la dérivation du critère (1.12).

### Quelques critères régions de la littérature

Ces critères reposent sur une modélisation statistique des régions à segmenter. Ils reposent sur l'homogénéité et la similarité à l'intérieur de chaque région, définies à partir de critères spatiaux, comme dans les méthodes de segmentation du type croissance de régions et/ou division de régions. Nous pouvons aussi évoquer les travaux de Yezzi *et al.* [163], qui utilisent la moyenne des niveaux de gris des régions interne et externe comme descripteur et cherchent à maximiser la distance quadratique entre ces moyennes :

$$J = -\frac{1}{2} (\mu_{\text{int}} - \mu_{\text{ext}})^2 \quad (1.13)$$

D'autres travaux dans la littérature traitent des approches régions, comme par exemple Jehan-Besson *et al.* [79, 80] (descripteurs incluant la moyenne et sa variance), Zhu *et al.* [166] (algorithme de « compétition » entre régions contrôlant l'évolution d'un contour actif). Un modèle de régions actives géodésiques est aussi proposé par Paragion *et al.* dans [119], en imagerie médicale, de même que Leventon *et al.* dans [95], qui déterminent des fonctions de densité de probabilité pour leur fonction de distance. Enfin Kim *et al.* [87] présentent une approche générale, où le modèle de segmentation ne repose pas sur des données de référence.

### Équation d'évolution des contours actifs régions

Les approches régions que nous venons de présenter font partie de la famille des approches variationnelles et reposent sur la définition d'une fonctionnelle d'énergie. Afin d'obtenir une équation d'évolution portant sur le contour, le calcul des variations de la fonctionnelle utilisée s'avère indispensable. La forte dépendance des critères régions vis-à-vis de la partition de l'image se manifeste par des intégrales doubles portant sur le domaine image  $\Omega$ . Plusieurs techniques dans la littérature proposent des méthodes pour résoudre ce problème de calcul variationnel. Zhu et Yuille [166] proposent une transformation des intégrales de surface en intégrales de contour dont sont déduites les équations de Lagrange associées à cette énergie. Ces équations sont enfin intégrées dans un schéma dynamique du type descente de gradient afin d'obtenir *in fine* une équation d'évolution du contour [47].

Une approche basée sur une formulation par ensembles de niveaux est proposée dans [139, 23], en introduisant les fonctions de Heaviside  $H$  et de Dirac  $\delta$  définies comme suit :

$$H(z) = \begin{cases} 1 & \text{si } z \geq 0 \\ 0 & \text{si } z < 0 \end{cases} \quad \text{et} \quad \delta(z) = \frac{d}{dz}H(z) \quad (1.14)$$

La fonctionnelle d'énergie s'exprime alors à l'aide d'une fonction hôte  $\Psi$  de type distance :

$$J_{\text{cartoon}}(\Psi) = \nu \int_{\Omega} \delta(\Psi) |\nabla \Psi| dx + \int_{\Omega} (I - \mu_{\text{int}})^2 H(-\Psi) dx + \int_{\Omega} (I - \mu_{\text{ext}})^2 (1 - H(-\Psi)) dx \quad (1.15)$$

Où

$$\mu_{\text{int}}(\Psi) = \frac{\int_{\Omega} I \cdot H(-\Psi) dx}{\int_{\Omega} H(-\Psi) dx}, \quad \mu_{\text{ext}}(\Psi) = \frac{\int_{\Omega} I \cdot (1 - H(-\Psi)) dx}{\int_{\Omega} (1 - H(-\Psi)) dx}$$

On constate que les domaines d'intégration  $\Omega_{\text{int}}$  et  $\Omega_{\text{ext}}$  n'apparaissent plus explicitement. Des équations d'Euler-Lagrange sont ensuite dérivées et une EDP portant sur  $\Psi$  est obtenue par une descente de gradient classique.

## 1.2.4 Choix du modèle

Mis à part les approches basées sur les techniques de seuillage (que nous n'avons pas évoqué dans ce travail), les approches basées sur les frontières et les approches basées sur les régions, on trouve des techniques hybrides qui combinent différentes techniques de segmentation et qui fournissent des résultats bien meilleurs que ceux obtenus par l'une ou l'autre des techniques utilisée seule. Nous pouvons citer, à titre d'exemple, parmi ces approches, les travaux de Haddon et Boyce [73] qui ont proposé une approche basée sur les matrices de cooccurrence unifiant l'information région et la détection des contours. De même, Pavlidis et Liow dans [121] ont décrit une technique intégrant une détection de contours et une croissance de région. Adams et Bischof [2], et Gambotto [53] emploient eux une croissance de régions associée à l'information gradient.

Dans le cadre d'une application telle que l'inspection dimensionnelle et le contrôle qualité, il est possible de formuler certaines hypothèses concernant le contenu de l'image à analyser. On peut ainsi considérer que des informations *a priori* concernant la localisation grossière de l'objet à évaluer dans l'espace de mesure, et donc sa position dans l'image, sont fournies par un système de planification, en amont du processus de segmentation. Il est par conséquent possible de délimiter des zones spécifiques dans l'image où placer les contours initiaux et de leur imposer un mode d'évolution uniquement en expansion ou en contraction. Une approche région permettant la détection de frontières intersectant le contour courant n'est donc pas nécessaire.

Afin de se rapprocher d'une utilisation industrielle, le processus doit satisfaire à des contraintes de temps d'exécution compatibles avec le « temps réel application ». Les approches régions qui prennent en compte l'ensemble de l'information image ne sont donc

### 1.3 Implémentation par les ensembles de niveaux

---

pas adaptées de ce point de vue, puisqu'elles imposent des temps de calcul importants dépendant de la taille de l'image traitée.

Une approche frontière basée sur les contours géodésiques offre une bonne qualité de segmentation, si le contour actif initial est judicieusement positionné, ainsi qu'une relative stabilité du contour détecté. Nous avons par conséquent adopté ce modèle avec une implémentation par ensembles de niveaux, afin de nous affranchir de la gestion des changements de topologie des contours [115].

## 1.3 Implémentation par les ensembles de niveaux

Dans la littérature, on peut envisager deux représentations différentes pour un contour actif. La première est dite explicite (ou lagrangienne) car elle décrit paramétriquement l'évolution spatiale d'un contour composé d'une chaîne de points régulièrement espacés. La vitesse d'évolution affectant chaque point de manière différente, il est impératif de conserver un écart identique entre les points, ce qui nécessite une procédure de ré-échantillonnage périodique du contour [21] ou bien l'inclusion, directement dans le terme de la vitesse d'évolution, d'un terme qui impose un écart fixe [9]. Ces techniques, largement utilisées dans le modèle des contours actifs classiques, présentent certains inconvénients. On peut notamment citer le problème lié au calcul des dérivées spatiales qui dépendent directement du pas spatial, souvent variable, utilisé. D'autre part, la gestion du changement de topologie - la séparation d'un contour initial en deux ou plusieurs contours (splitting) ou la fusion de deux contours ou plus pour n'en former qu'un (merging) - exige une détection coûteuse des auto-intersections et collisions. La seconde représentation est dite implicite (ou eulérienne) car elle décrit le contour comme étant la ligne de niveau zéro d'une fonction scalaire de dimension supérieure. Le changement automatique de la topologie de la courbe est un des avantages majeurs de cette implémentation par ensembles de niveaux [102]. Plusieurs objets peuvent ainsi être détectés simultanément à partir d'un nombre quelconque de contours initiaux. Osher et Sethian [115] ont été les premiers à exploiter les ensembles de niveaux (appelés « level sets » en anglais) pour la propagation de contours actifs géométriques [144, 157].

### 1.3.1 Ensembles de niveaux

L'idée de la représentation utilisée par Osher et Sethian dans [115] consiste à insérer le contour dans un ensemble de dimension supérieure - l'ensemble de niveaux - dont la déformation peut induire un changement de topologie du contour. En dimension deux, le contour actif est une courbe plane fermée. L'ensemble de dimension supérieure dans lequel on insère le contour est donc une surface. Par conséquent, le contour n'est autre que l'intersection de son plan avec cette surface. L'altitude des points immergés de la surface est négative, alors que celle des points émergés est positive. Par simple analogie, cette surface est équivalente à une image bidimensionnelle de hauteurs [33]. Le contour est donc composé, dans cette image, de pixels de valeur nulle. Plus précisément, si un pixel est à l'extérieur du contour - valeur positive - et si au moins un de ses voisins est à l'intérieur - valeur négative -, alors le contour de niveau zéro se situe entre les deux.



Un ensemble de niveaux défini à partir d'un contour  $\Gamma(t)$  supposé fermé, régulier et évoluant dans le plan euclidien, est une fonction  $\Psi(t)$  de la position, dans le plan ou dans l'espace (selon que le contour est une courbe plane ou une surface respectivement) suffisamment régulière. Autrement dit, à tout instant  $t$ , la courbe  $\Gamma(t)$  représente la ligne de niveau 0 d'une fonction de dimension supérieure  $\Psi(t)$ , telle que :

$$\Gamma(t) = \{x | \Psi(x(t)) = 0\} \quad (1.16)$$

Dans le cas des images bidimensionnelles, Osher *et al.* proposent d'utiliser la fonction distance  $\Psi(t)$ , lipschitzienne et dépendante du temps. On dispose ainsi d'une fonction  $\Psi(t)$  définie selon les conventions suivantes (voir la figure 1.6 pour une meilleure compréhension) :

$$\begin{cases} \Psi(x, t) = 0 & \text{si } x \in \Gamma(t) \\ \Psi(x, t) = \varepsilon d(x, \Gamma(t)) & \text{si } x \in \Omega_{int}(t) \\ \Psi(x, t) = -\varepsilon d(x, \Gamma(t)) & \text{si } x \in \Omega_{ext}(t) \end{cases} \quad (1.17)$$

Où :

- $\Omega_{int}$  et  $\Omega_{ext}$  représentent respectivement la région intérieure et extérieure délimitant la courbe  $\Gamma(t)$ .
- la distance du point  $x$  à la courbe  $\Gamma(t = 0)$  est représentée par  $d(x, \Gamma(t)) = \inf_{y \in \Gamma(t)} |x^2 - y^2|$ .
- $\varepsilon = 1$  [117, 33] ou  $\varepsilon = -1$  [32] selon la convention choisie.

Avec cette définition pour  $\Psi$ , on a :

$$\Gamma(t = 0) = \{x \in R^2 | \Psi(x, t) = 0\} \quad (1.18)$$

Comme illustration, considérons l'exemple du cercle unité, où la courbe  $\Gamma$  à l'instant  $t = 0$  représente un cercle décrit par  $\{(x, y) | x^2 + y^2 - 1 = 0\}$  dans le plan  $xy$  (voir figure 1.6(a)). Nous supposons que le cercle est l'ensemble de niveaux  $\Psi = 0$  d'une surface initiale  $z = \Psi(x, y, t = 0)$  dans  $R^3$  (voir figures 1.6(b), 1.6(c) et 1.6(d)).

La courbe  $\Gamma$  représente la courbe de niveau zéro de la surface  $\Psi$ . D'après l'équation (1.17), et en tout point  $x$ , la valeur absolue de  $\Psi$  représente bien la distance minimale au contour. Elle est positive pour tout  $x$  appartenant à l'extérieur de  $\Gamma$ , et négative si  $x$  est à l'intérieur de  $\Gamma$  (nous avons choisi  $\varepsilon = 1$  pour le calcul de notre carte de distance). Cela veut dire que  $\Psi$  est une carte de distance signée. D'un point de vue géométrique, la représentation sous la forme d'un ensemble de niveaux bidimensionnel signifie que la hauteur de la surface, en un point donné, n'est autre que la distance signée par rapport au contour de niveaux zéro de la projection de ce point sur le plan d'altitude zéro - *i.e.* le plan correspondant à  $\Psi = 0$ .

### 1.3 Implémentation par les ensembles de niveaux

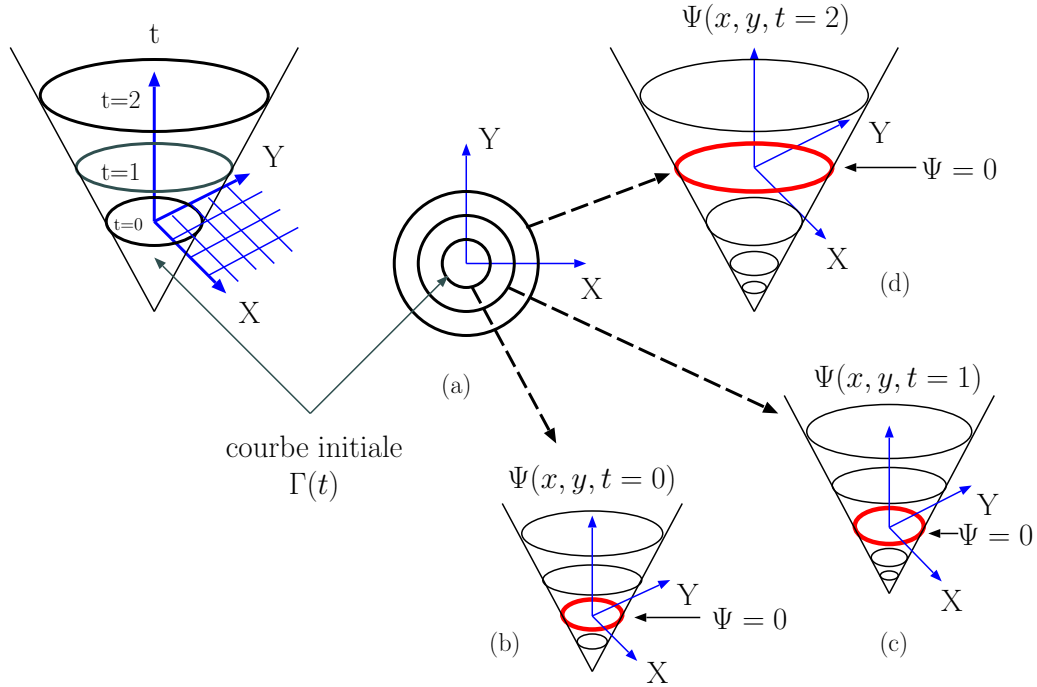


FIG. 1.6 – Représentation de l'évolution d'un contour  $\Gamma$  par l'ensemble de niveaux  $\Psi$  (niveau 0 de cet ensemble).

#### 1.3.2 Équation d'évolution globale de la fonction hôte

Nous allons à présent exprimer l'équation d'évolution du contour selon sa normale, dans le cadre des ensembles de niveaux, et donc développer une équation d'évolution de  $\Gamma$  portant sur sa fonction hôte  $\Psi$ . Puis nous présenterons l'algorithme général régissant l'évolution du contour.

##### Équation d'évolution de la fonction $\Psi$

Pour tout point  $x(q, t)$ , du contour  $\Gamma(t)$ , où  $q$  est un paramètre indépendant du temps, on a :

$$\Psi(x(q, t), t) = 0 \quad (1.19)$$

On obtient alors l'équation suivante en dérivant par rapport au temps :

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} + \left\langle \nabla \Psi, \frac{\partial x}{\partial t} \right\rangle = 0 \quad (1.20)$$

Si l'on introduit l'équation générique d'évolution du contour et la définition de la normale unitaire orientée vers l'intérieur du contour ( $\frac{\partial x}{\partial t} = F\vec{N}$  et  $\vec{N} = -\frac{\nabla \Psi}{|\nabla \Psi|}$ ), on

obtient l'équation d'évolution du contour exprimée dans le formalisme des ensembles de niveaux :

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = F |\nabla \Psi| \quad (1.21)$$

Dans le cas spécifique des contours actifs géodésiques, la force  $F$  est définie par :

$$F = g (\nabla I) (\kappa + a) - \langle \nabla g, N \rangle \quad (1.22)$$

La courbure  $\kappa$  peut être définie par la divergence de la normale :

$$\kappa = \text{div} \left( \frac{\nabla \Psi}{|\nabla \Psi|} \right) \quad (1.23)$$

On obtient alors la formulation par les ensembles de niveaux suivante :

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = g (|\nabla I|) \left( \text{div} \left( \frac{\nabla \Psi}{|\nabla \Psi|} \right) + a \right) |\nabla \Psi| - \langle \nabla g, \nabla \Psi \rangle \quad (1.24)$$

Cette formulation présente un certain nombre d'avantages [102, 3, 33, 144] :

- tant que la vitesse d'évolution  $a$  présente de faibles variations,  $\Psi(x, t)$  reste une fonction de distance. Le niveau 0 de  $\Psi$  correspondant au contour actif peut donc changer de topologie : le contour courant peut ainsi se scinder en plusieurs courbes, qui peuvent ensuite elles-mêmes fusionner entre elles,
- l'espace sur lequel est défini  $x$  peut être discrétisé et l'on peut donc approximer les dérivées spatiales et temporelles par des différences finies,
- les propriétés géométriques du contour peuvent être déterminées à partir de la fonction  $\Psi$ . On peut notamment déterminer la normale  $N$  et la courbure  $\kappa$ ,
- Il est possible d'étendre le calcul à la dimension 3 (cas de l'imagerie volumique), voire même à la dimension  $n$ .

L'équation d'évolution est définie sur tout le domaine image, mais n'a de signification que sur le contour  $\Gamma(t)$ , qui correspond au niveau zéro de la fonction hôte  $\Psi$ . Il existe toutefois plusieurs techniques permettant l'extension de la force  $F$  à l'ensemble du domaine image [102]. Dans le cas des contours actifs géodésiques, il est tout à fait possible de calculer la force  $F$  en chaque point de l'image (hormis les bords bien entendu). La fonction d'attache aux données  $g(|\nabla I|)$  et son gradient  $\nabla g$  sont en effet définis sur toute l'image, et la courbure  $\kappa$  est calculable pour l'ensemble des niveaux de la fonction hôte.

Les principales propriétés des ensembles de niveaux sont, d'une part, la gestion automatique des changements de topologie d'une courbe, et, d'autre part, leur simplicité d'implémentation ainsi que leur stabilité d'un point de vue numérique. Cependant, la construction et la mise en œuvre d'un ensemble de niveaux impliquent certaines précautions, comme cela sera montré d'une manière détaillée dans la section suivante.

### Algorithme général d'évolution de la fonction $\Psi$

La figure 1.8 illustre l'algorithme général d'évolution d'un contour actif  $\Gamma$ . Une fois le contour initial  $\Gamma_0$  placé dans l'image, nous construisons la carte des distances initiale

### 1.3 Implémentation par les ensembles de niveaux

---

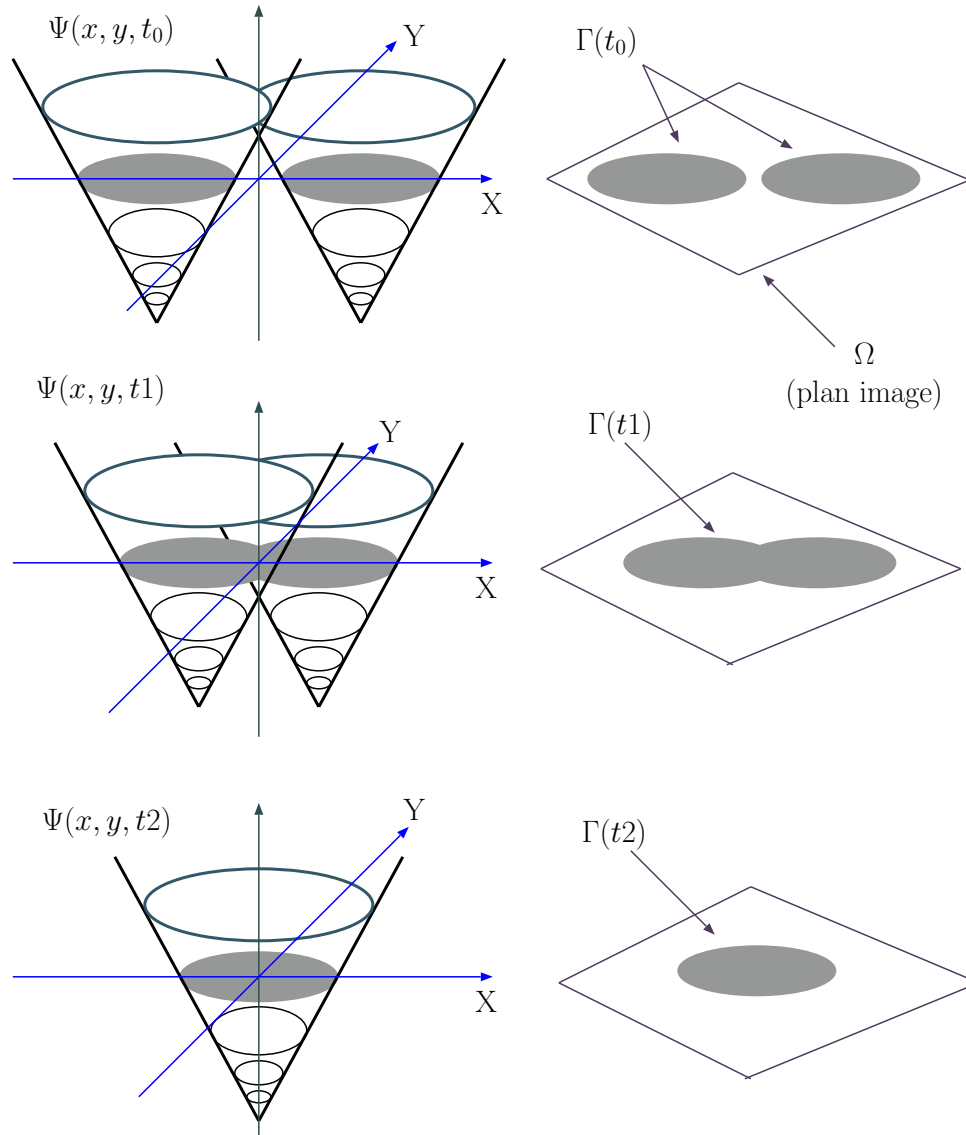


FIG. 1.7 – Implémentation par ensembles de niveaux. Illustration d'un changement de topologie de  $\Gamma$ .

$\Psi^0$  en considérant les points de  $\Gamma_0$  comme formant le niveau zéro de  $\Psi$ .

L'équation d'évolution du contour (1.24) est alors appliquée itérativement en chaque point de l'image. À chaque pas, le niveau zéro de la fonction hôte est construit par approximation, afin de pouvoir déterminer la force  $F$  pour la prochaine itération. Si le contour se stabilise, autrement dit si le niveau zéro est quasi-stable d'une itération à l'autre, on considère que la segmentation est terminée.

Il s'avère que la fonction hôte  $\Psi$  perd sa régularité au cours du temps; le module du gradient peut notamment rapidement tendre vers l'infini lorsque l'on s'éloigne de la courbe de niveau 0. Afin d'assurer que la fonction hôte  $\Psi$  reste une carte des distances au cours des itérations, on choisit d'effectuer régulièrement des réinitialisations de l'ensemble de niveaux (le fait de tolérer une déformation de  $\Psi$  pendant quelques itérations est couramment admis, mais n'a pas de justification théorique). La solution que nous avons retenue a été introduite par Sussman *et al.* dans [151] qui proposent d'appliquer régulièrement à la fonction  $\Psi$  l'EDP suivante :

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \text{sign}(\Psi) (1 - |\nabla \Psi|) \quad (1.25)$$

*sign* représente la fonction signe de  $\Psi$  qui vaut  $-1$  si  $\Psi$  est strictement négative,  $0$  si  $\Psi$  est nulle et  $+1$  si  $\Psi$  est strictement positive.

L'implémentation directe de l'équation d'évolution est très coûteuse en temps de calcul, du fait des nombreuses opérations devant être réalisées sur la totalité des pixels du domaine image  $\Omega$ .

### 1.3.3 Méthode de la Bande étroite (*Narrow Band*)

Afin de pallier les limites de l'implémentation directe, deux alternatives différentes ont été proposées dans la littérature; à savoir la méthode *Narrow Band* [26] et la méthode *Fast Marching* [148]. Cette dernière ne s'applique toutefois que dans le cas où le front se propage de façon monotone, une condition qui n'est pas vérifiée pour les contours actifs géodésiques puisque la vitesse dépend de la courbure même du front.

#### La méthode de la bande étroite

Faire évoluer les contours de niveau élevé en valeur absolue (loin du contour de niveau zéro) n'est finalement pas très utile. Afin de minimiser le nombre d'opérations nécessaires au calcul de l'évolution du front  $\Gamma$ , il est plus intéressant de ne travailler que sur une bande étroite (*Narrow Band*) centrée autour de  $\Gamma$  et de n'évaluer  $\Psi$  que sur ce domaine (voir figure 1.9). Cette technique consistant à ne considérer que les éléments situés à moins d'une certaine distance du contour de niveau zéro a été proposée initialement dans [26] et a été ensuite détaillée par Adalsteinsson *et al.* dans [1]. La vitesse d'évolution n'est donc calculée que dans cette bande étroite, en tenant compte du fait que le niveau zéro correspond au front que l'on cherche à obtenir. Cependant, il faut systématiquement s'assurer que le front  $\Gamma$  reste bien à l'intérieur de la bande au cours du temps. On doit donc la faire évoluer régulièrement. Nous avons pour cela adopté la solution proposée dans [1] et détaillée dans [33] qui consiste à utiliser la bande (ou tube) tant que cela est

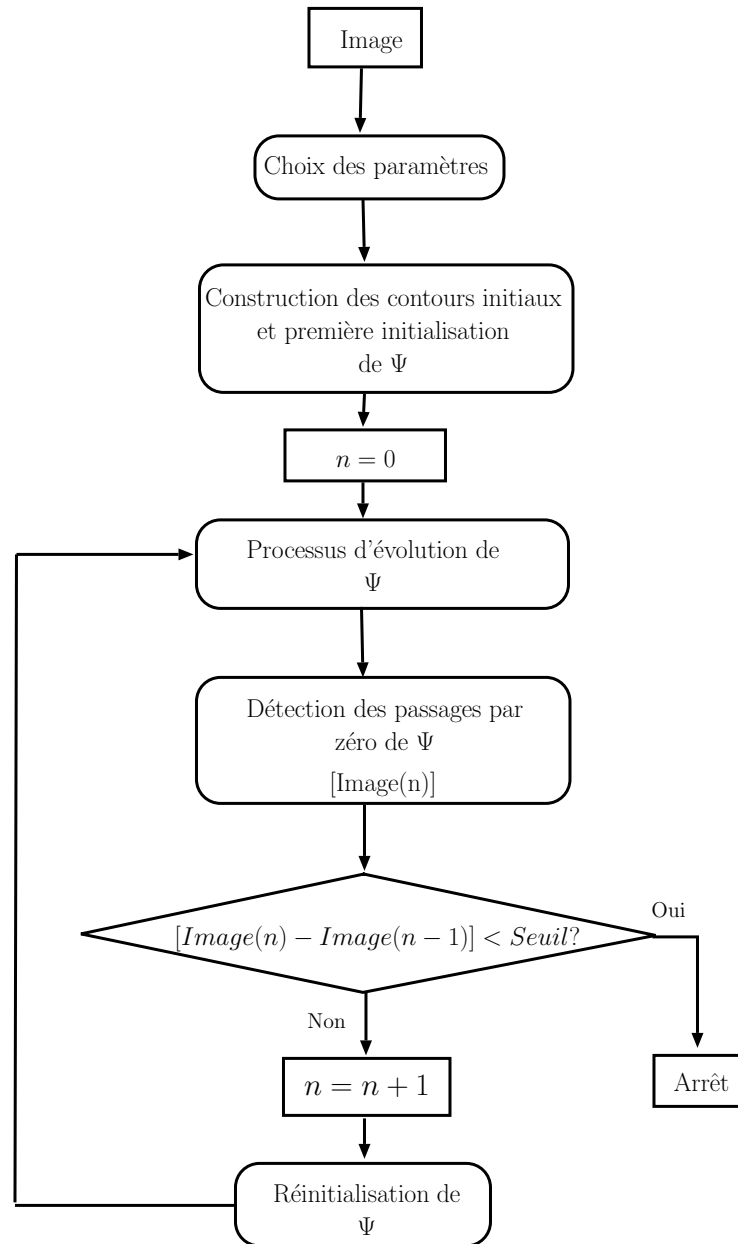


FIG. 1.8 – Algorithme général d'évolution par ensembles de niveaux d'un contour actif  $\Gamma$ .

possible et de la réinitialiser lorsque le front est susceptible de s'approcher des frontières de cette bande étroite. Cette technique a été étudiée en détail dans [1] et son utilisation s'est généralisée par la suite - voir [102, 33, 120, 47].

Le choix de la largeur de la bande est guidé par un compromis. Si la largeur est « faible », le calcul de l'évolution du front est rapide compte tenu du nombre réduit d'éléments à prendre en compte, mais si le contour de niveau zéro est loin de la solution, le risque de franchir la bande est grand, ce qui nécessite plus d'opérations de réinitialisations afin de recentrer la bande. En revanche, si la largeur est « importante », le contour de niveau zéro risque moins de sortir du tube, mais le nombre important d'éléments constituant la bande rend le calcul de l'évolution du front moins rapide.

### Algorithme d'évolution de la fonction $\Psi$

L'algorithme général d'évolution de la fonction  $\Psi$  est ainsi légèrement modifié. Ses principales étapes sont :

1. Initialiser la fonction  $\Psi$  sur une bande étroite autour de  $\Gamma^0$ . On obtient ainsi le tube à l'intérieur duquel la courbe va évoluer.
2. Appliquer l'équation d'évolution à la fonction  $\Psi$  dans le domaine tubulaire.
  - a. si le niveau zéro de la fonction  $\Psi$  s'approche trop des frontières du tube (compte tenu d'un seuil fixé *a priori*) ou si des instabilités sont observées le long de ces bords, retourner à l'étape 1 afin de réinitialiser la fonction  $\Psi$ .
  - b. si le niveau de la fonction  $\Psi$  n'évolue plus, la segmentation de l'image est terminée.
  - c. sinon, retourner au début de l'étape 2.

### 1.3.4 Implémentation algorithmique - mise en œuvre pratique -

Nous allons à présent détailler les différents aspects liés à la discrétisation des équations régissant l'évolution du contour.

#### Équation d'évolution discrète des contours actifs

La discrétisation de l'espace sur lequel est défini un point  $x$  consiste à définir un maillage uniforme de pas  $h$  tel que  $(x_i, y_i) = (ih, jh)$ . L'équation discrète d'évolution du contour s'écrit alors :

$$\frac{\Psi_{ij}^{n+1} - \Psi_{ij}^n}{\Delta t} = F |\nabla_{ij} \Psi_{ij}^n| \quad (1.26)$$

Cette équation peut être développée comme suit :

$$\Psi_{ij}^{n+1} = \Psi_{ij}^n + \Delta t \left( g(|\nabla_{ij} I|) (\lambda_k \kappa(\Psi_{ij}^n) + a) |\nabla_{ij} \Psi_{ij}^n| + \lambda_{CAG} \langle \nabla_{ij} g(|\nabla_{ij} I|), \nabla_{ij} \Psi_{ij}^n \rangle \right) \quad (1.27)$$

### 1.3 Implémentation par les ensembles de niveaux

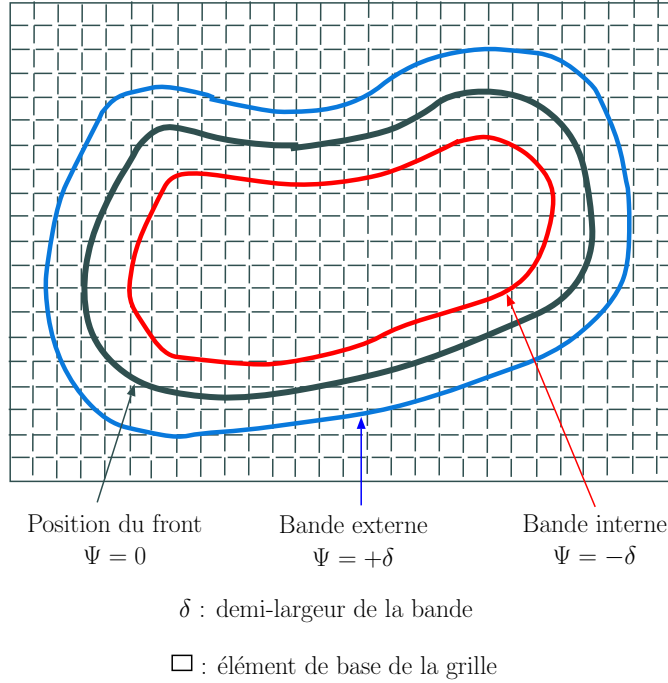


FIG. 1.9 – Bande étroite de demi-largeur  $\delta$  définie autour de l'ensemble de niveau zéro  $\{\Psi = 0\}$ .

avec comme paramètres :

- $\Delta t$ , pas temporel utilisé pour la discrétisation de l'équation d'évolution,
- $\kappa$ , fonction de la courbure,
- $\lambda_k$ , facteur de pondération dépendant de la courbure,
- $\lambda_{CAG}$ , facteur de pondération propre aux contours actifs géodésiques.

#### Initialisation et réinitialisation de la fonction $\Psi$

Le but de la phase d'initialisation est de construire la fonction distance signée  $\Psi$  autour d'un contour donné  $\Gamma$ , à savoir le niveau zéro de  $\Psi$ . Cette phase est nécessaire au début de l'algorithme d'évolution, lorsque l'on a fixé le contour initial  $\Gamma^0$ , et périodiquement au cours de l'évolution de  $\Psi$  pour vérifier le respect de la contrainte  $|\nabla\Psi| = 1$ , qui assure la cohérence de la carte des distances.

La version discrète de l'équation (1.25) correspond à :

$$\Psi_{ij}^{n+1} = \Psi_{ij}^n + \Delta t \text{sign}(\Psi_{ij}^n) (1 - |\nabla_{ij} \Psi_{ij}^n|) \quad (1.28)$$

Le maintien de la position du contour de niveau zéro à l'intérieur de la bande étroite et la stabilité de ce schéma dynamique dépendent de la discrétisation de  $|\nabla\Psi|$ . Plusieurs solutions sont données dans la littérature. Nous pouvons citer à titre d'exemple les travaux



décrits dans [151][143]. Par souci de simplicité de calcul, nous avons adopté l'approximation développée par Debreuve dans [33], fondée sur l'observation de cas particuliers (pour les détails de calcul, voir l'annexe A).

Les avantages de cette initialisation sont, d'une part, sa rapidité (notamment lorsque l'on travaille dans une bande étroite autour du niveau zéro) et, d'autre part, le fait que la connaissance de la position précise du niveau zéro n'est pas nécessaire. En effet, lorsque l'initialisation de  $\Psi$  dans la bande étroite est nécessaire, on force tous les pixels négatifs à la valeur  $-0.5$  et tous les pixels positifs à la valeur  $+0.5$ , puis on applique l'équation (1.28) à  $\Psi$ . À chaque itération, les pixels positifs de gradient nul sont incrémentés de  $\Delta t$ , et les pixels négatifs de gradient nul sont décrémentés de  $\Delta t$  (le paramètre  $\Delta t$  permet donc de régler la finesse de la convergence). Après  $k$  itérations, on obtient une fonction distance sur une bande de largeur  $2\delta = 1 + 2 * k * \Delta t$  autour du niveau zéro.

### Fréquence de réinitialisation de la fonction $\Psi$

À chaque pas temporel  $\Delta t$ , le contour actif (correspondant au niveau 0 de  $\Psi$ ) se déplace d'un pas spatial  $p$  :

$$p = \Psi_{ij}^{n+1} - \Psi_{ij}^n = \Delta t \left( g(|\nabla_{ij} I|) (\lambda_k \kappa(\Psi_{ij}^n) + a) |\nabla \Psi_{ij}^n| + \lambda_{CAG} \langle \nabla_{ij} g(|\nabla_{ij} I|), \nabla_{ij} \Psi_{ij}^n \rangle \right)$$

Puisque la fonction distance signée  $\Psi$  n'a été définie que sur une bande centrée sur le

niveau 0 et de demi-largeur  $\delta$ , l'inégalité suivante doit être respectée :

$$N_{iter} \max(p) < \delta$$

Considérant que  $\max g(|\nabla I|) = 1$  et  $|\nabla \Psi| = 1$ , on peut définir  $\max(p)$  comme étant :

$$\max(p) = \Delta t (\lambda_k \max(|\kappa|) + a + 2\lambda_{CAG})$$

Le nombre maximum d'itérations  $N_{iter}$  de l'équation d'évolution de la fonction  $\Psi$ , entre chaque phase de réinitialisation, peut donc s'exprimer ainsi :

$$\lambda_k \max(|\kappa(\Psi)|) + a + 2\lambda_{CAG} \leq \frac{\delta}{N_{iter} \Delta t} \quad (1.29)$$

Cette équation spécifie quantitativement la contrainte selon laquelle le contour ne doit pas sortir de la bande étroite entre deux réinitialisations. Afin de simplifier les calculs, la valeur maximale de la courbure de la fonction  $\Psi$  est déterminée à partir du contour initial et l'on fait l'hypothèse que la courbe ne comportera jamais de points dont la courbure est supérieure à cette valeur au cours de son évolution.

## 1.4 Application : Construction du masque de l'objet

---

### Détection des passages par zéro

Comme cela a déjà été dit, la connaissance de la position du contour de niveau zéro dans la bande étroite n'est pas indispensable lors des différents traitements. Cependant, si l'on souhaite suivre l'évolution du contour et notamment l'état courant de la segmentation, une matérialisation du contour de niveau zéro s'avère nécessaire. Puisqu'il n'y a aucune raison que les points pour lesquels la fonction  $\Psi$  vaut zéro correspondent aux nœuds de la grille de discrétisation, il est nécessaire de chercher les différences de signe entre deux points consécutifs dans les deux directions horizontale et verticale (par rapport à la grille). Le niveau zéro est alors défini comme étant le point de plus faible valeur de  $\Psi$ . Nous avons pour cela adapté l'algorithme proposé initialement dans [33, 47] (voir le détail des calculs dans l'annexe A).

### Fonction de courbure $\kappa$

La fonction de courbure est calculée comme étant la divergence de la normale, dont une implémentation numérique est :

$$\kappa(\Psi) = \frac{\Psi_{xx}\Psi_y^2 - 2\Psi_{xy}\Psi_x\Psi_y + \Psi_{yy}\Psi_x^2}{(\Psi_x^2 + \Psi_y^2)^{3/2}} \quad (1.30)$$

Les dérivées premières et secondes sont approximées par des différences centrées :

$$\begin{aligned} \Psi_x &= \frac{(\Psi_{i+1,j} - \Psi_{i-1,j})}{2\Delta x} \\ \Psi_{xx} &= \frac{(\Psi_{i+2,j} - \Psi_{i-2,j})}{4\Delta x} \\ \Psi_{xy} &= \frac{(\Psi_{i+1,j+1} - \Psi_{i-1,j+1} - \Psi_{i+1,j-1} - \Psi_{i-1,j-1})}{4\Delta x\Delta y} \end{aligned}$$

On suppose également que  $\Psi_{xy} = \Psi_{yx}$ .

## 1.4 Application : Construction du masque de l'objet

Nous proposons de mettre en œuvre les contours actifs pour réaliser la séparation automatique des données liées à l'objet à évaluer de celles du fond de l'image. Le processus a pour objectif de générer un masque binaire correspondant à l'objet, en prenant en compte des informations *a priori* sur la scène observée fournies par le système de planification. Diverses pièces manufacturées conventionnelles incluant des surfaces gauches ont été utilisées afin de valider expérimentalement l'approche proposée.

Les images utilisées ont été acquises dans des conditions d'illumination réalistes en regard des contraintes industrielles. Une analyse de leur contenu permet de mettre en évidence plusieurs propriétés communes pouvant guider notre travail :

- le fond de l'image est constitué de régions non texturées, de niveaux de gris relativement uniforme,
- l'objet est le plus souvent positionné au centre de l'image,
- les régions de l'image correspondant à l'objet peuvent être nombreuses et de niveaux de gris très différents.

Détecter directement les frontières externes de l'objet est donc délicat à réaliser puisqu'il peut être constitué de plusieurs régions hétérogènes. Il apparaît dès lors plus judicieux de mettre en place une procédure chargée d'isoler les régions correspondant au fond de l'image, puis, en posant comme hypothèse que ce qui n'appartient pas au fond de l'image correspond à l'objet, d'en déduire le masque binaire de l'objet.

### 1.4.1 Génération du masque de l'objet

Les informations *a priori* fournies par le système de planification sont exploitées afin de positionner les contours initiaux dans l'image. Compte tenu des propriétés d'évolution des contours actifs, un positionnement à proximité immédiate des frontières de l'objet n'est pas nécessaire. On autorise ainsi, d'une part, une certaine incertitude sur la position exacte de l'objet dans l'image et, d'autre part, on est assuré de ne pas placer de contour initial à cheval sur une frontière (une évolution des contours uniquement en expansion est donc suffisante). Le réglage des paramètres régissant l'évolution du contour est ensuite réalisé en tenant compte du contenu de l'image.

On applique enfin l'algorithme d'évolution de la fonction  $\Psi$  à l'image. Une fois la convergence atteinte, on affecte la valeur zéro aux pixels situés à l'intérieur des contours fermés obtenus, et la valeur un aux autres pixels de l'image. Ce masque binaire est ensuite combiné logiquement, pixel à pixel, avec l'image des franges projetées sur l'objet, ce qui permet d'éliminer les franges parasites du fond de l'image susceptibles de perturber la procédure de reconstruction 3D.

Le processus de détermination automatique du masque de l'objet est illustré figure 1.10 avec l'image pale de turbine, qui fera l'objet de l'ensemble des essais de segmentation et de reconstruction présentés dans ce travail.

### Test d'arrêt de l'algorithme d'évolution du contour

Le critère d'arrêt utilisé consiste à évaluer la différence de longueur existant entre le contour courant et celui de l'itération précédente. Pour ce faire, il est nécessaire de déterminer le niveau zéro de l'ensemble de niveaux. Mais, d'une part, la connaissance exacte de la position du niveau zéro n'est pas indispensable pour le calcul de l'évolution du contour et, d'autre part, son évaluation est relativement coûteuse en temps de calcul. Par conséquent, le test d'arrêt n'est réalisé que lorsqu'il est nécessaire de réinitialiser la bande étroite, et donc de calculer le niveau zéro. Ce point n'est pas gênant en soit, puisque le nombre d'itérations superflues réalisées est modeste, inférieur à  $N_{iter}$  (souvent de l'ordre de 3 à 4).

Le critère d'arrêt est défini comme étant la différence entre le nombre de points des deux contours rapportée au nombre de points du contour courant :

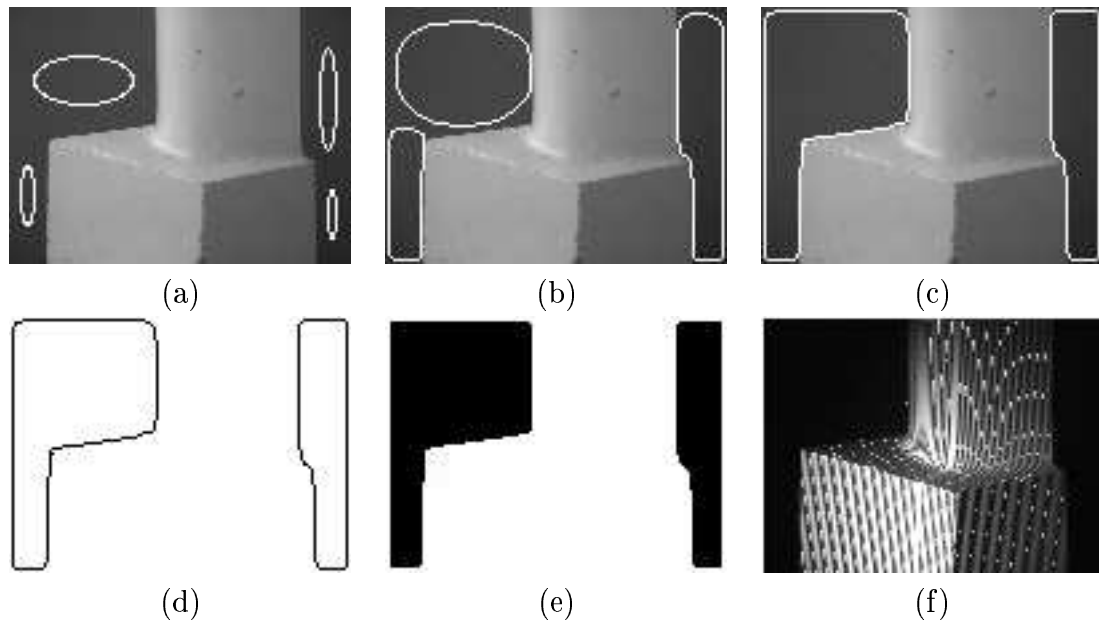


FIG. 1.10 – Construction du masque et détourage de l'objet. (a) Image Pale de turbine  $128 \times 96$  et initialisation des ensembles de niveaux. (b) Évolution intermédiaire après 3 itérations (*temps* = 3s). (c) Contours stabilisés après 7 itérations (*temps* = 7s). (d) Contours fermés pour l'étiquetage. (e) Masque binaire obtenu. (f) Détourage de l'objet (suppression des franges appartenant au fond de l'image).

$$S_{arret} = \frac{|N_C^n - N_C^{n-1}|}{N_C^n} \quad (1.31)$$

On peut ainsi fixer un seuil  $S_{arret}$  correspondant à une fraction de la longueur du contour en dessous de laquelle on considère que la segmentation est stabilisée.

### Diminution du temps de calcul

Le coût algorithmique de la segmentation croît en fonction de la taille du contour, et non en fonction de la taille de l'image comme dans le cas des approches régions, voire de certaines approches frontières. Toutefois, certaines opérations constituent un goulot d'étranglement de la méthode (calcul de la courbure, par exemple). Afin d'obtenir un temps de calcul pour la segmentation compatible avec les contraintes des applications industrielles (temps réel application), l'image originale est échantillonnée à une résolution plus faible (ratio de 4 à 8 dépendant de la taille d'origine de l'image) dans les directions horizontale et verticale. Cette opération implique que la détermination des régions d'intérêt est faite avec une résolution grossière qui introduit par conséquent un effet de crénelage sur les frontières de l'image du masque binaire lors du ré-échantillonnage à la résolution originale. Cela n'affecte toutefois pas la précision de la reconstruction 3D puisque le masque est appliqué à l'image des franges qui, elle, n'est pas ré-échantillonnée.

Par contre, le sous-échantillonnage permet de limiter fortement le temps de calcul nécessaire à la détermination du masque binaire. Afin d'illustrer l'apport d'une telle démarche, nous avons réalisé plusieurs segmentations correspondant à différentes résolutions (voir Tableau 1.1). La qualité du masque obtenu pour chaque résolution (cf. figure 1.11) croît en fonction de la résolution de l'image à segmenter, et cela au prix d'un coût de calcul de plus en plus élevé. Dans le cas de notre application d'inspection dimensionnelle, où la contrainte temps réel est fortement posée, nous avons jugé nécessaire de faire évoluer le contour en utilisant une résolution faible (ratio 4, par exemple, par rapport à l'image originale), afin de gagner en temps de calcul. Le résultat est ensuite ré-échantillonné, une fois le masque obtenu, à la résolution originale. Cette réduction du temps de calcul est obtenue au détriment de la précision du masque, mais cela ne représente pas un handicap dans notre application. En effet, une fois le masque binaire généré appliqué à l'image franges, ce dernier arrive à englober complètement l'objet et à le séparer du fond de l'image. La procédure de ré-échantillonnage effectuée sur le masque binaire génère cependant un certain flou sur les bords du masque (effet de crénelage). Un effet qui n'a aucun impact sur la précision imposée par notre application, car le masque binaire restitué, appliquée à l'image franges originale, délimite correctement la zone d'intérêt à l'intérieur de laquelle la reconstruction 3D est effectuée.

### Analyse de la segmentation obtenue

Plusieurs essais ont été réalisés avec des images de synthèse et réelles afin de tester le comportement de l'approche pour des objets de formes variées plus ou moins com-

## 1.4 Application : Construction du masque de l'objet

---

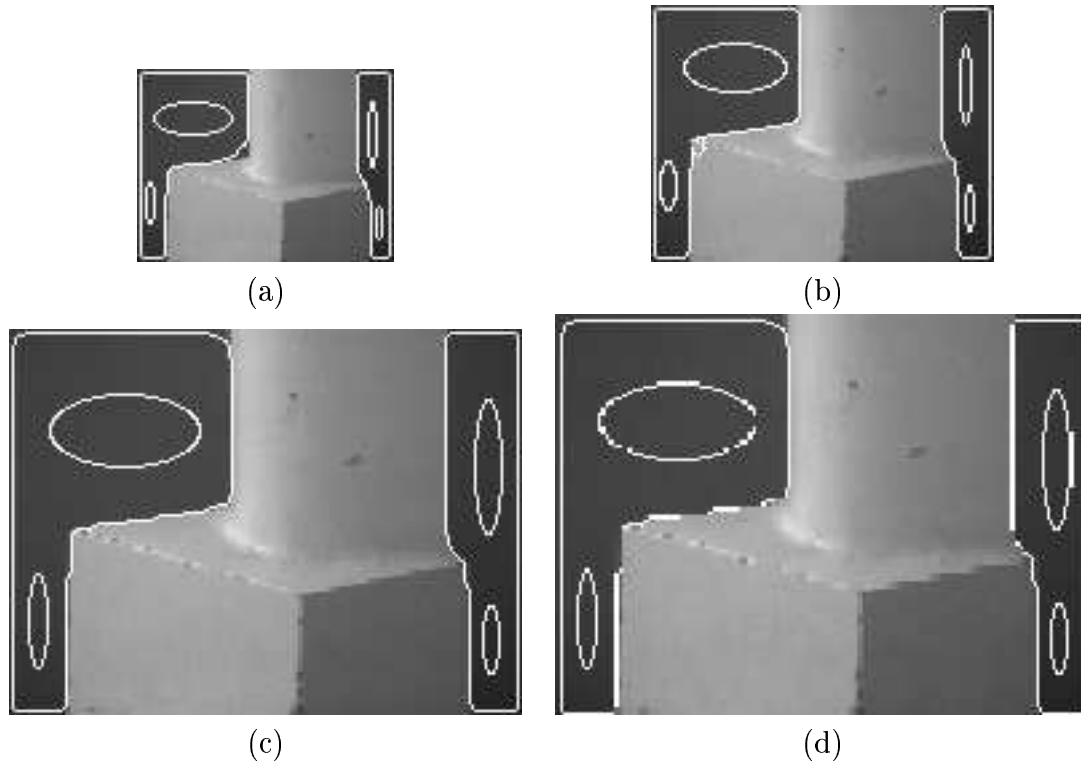


FIG. 1.11 – Diminution du temps de calcul par sous-échantillonnage de l'image originale à des résolutions plus faibles. Image Pale de turbine. (a) Image  $96 * 72$  avec contours stabilisés et initialisations multiples. (b) Image  $128 * 96$ . (c) Image  $192 * 144$ . (d) Image  $384 * 288$ .

TAB. 1.1 – Temps de calcul pour différentes résolutions de l'image originale.

| Résolution | Nombre d'itérations ( $N_{iter}$ ) | Temps de calcul nécessaire ( $t$ ) |
|------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 384*288    | 27                                 | 3mn                                |
| 192*144    | 11                                 | 23s                                |
| 128*96     | 4                                  | 6s                                 |
| 96*72      | 5                                  | 4s                                 |

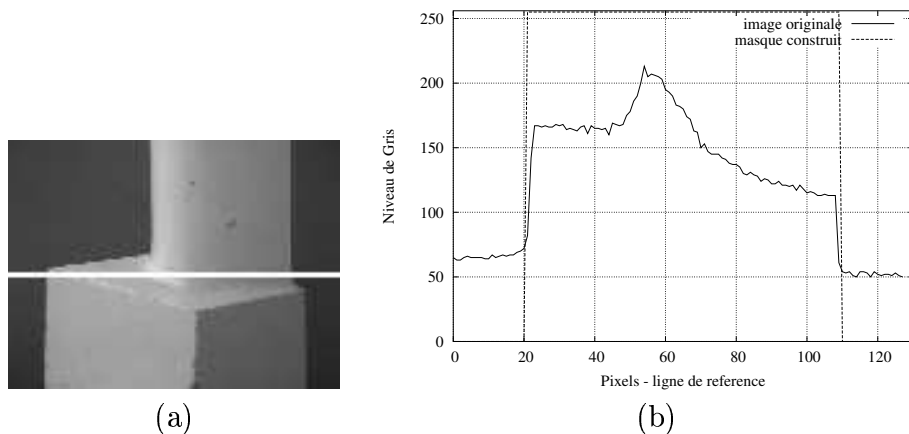


FIG. 1.12 – Précision du masque obtenu (pièce pale de turbine (128 \* 96)). (a) Ligne de référence de l'image. (b) Profils de la ligne de référence de l'image et de son équivalent dans le masque.

plexes. Pour détecter tous les objets d'une image, le ou les contours initiaux doivent, soit contenir entièrement tous les objets à détecter (on parle d'une rétraction), soit être totalement inclus dans l'objet considéré (on parle d'une expansion). C'est l'une des limites de l'approche contours actifs par ensembles de niveaux.

Un autre problème rencontré est lié à la forme géométrique de certains objets ainsi qu'aux conditions d'éclairage dans la scène. On peut observer un arrêt prématuré de la segmentation en présence d'une ombre portée par l'objet sur le fond (ou provoqué par le bras articulé supportant les têtes de mesure, lorsqu'il est proche de l'objet). En effet, la région correspondant à l'ombre est caractérisée par une frontière à fort gradient du niveau de gris (élément principal dans la fonction d'arrêt  $g(\nabla I)$ ) qui va arrêter l'évolution du contour. Ce point n'est toutefois pas nécessairement gênant, puisque cette zone sombre correspond bien souvent à une partie du fond sur laquelle les franges ne sont pas visibles. Bien que le masque généré soit « excessif » puisqu'il déborde de l'objet, il convient à notre application pour délimiter une zone d'intérêt.

Nous pouvons noter aussi une sensibilité au bruit de la segmentation, puisque les décisions sont prises localement (le long du front courant) : si la zone correspondant au fond présente des valeurs de gradient du niveau de gris de même importance que le gradient aux frontières à détecter, alors des contours « parasites » vont être générés au sein de cette zone. Ce comportement est toutefois compensé par la procédure de remplissage des contours, utilisée pour construire le masque de l'objet.

Afin de tester la qualité du masque construit à l'issue de la segmentation présentée, nous avons comparé les profils d'une ligne de référence de l'image avec la ligne équivalente du masque (voir figure 1.12). La superposition des deux courbes dans les zones de niveaux de gris représentant les frontières de l'objet illustre la précision du masque généré [92].

### 1.4.2 Détermination des contours initiaux

La gestion automatique du changement de topologie d'un contour autorise la mise en place de plusieurs contours initiaux.

Il est donc possible de déterminer simultanément plusieurs régions disjointes, puisque les contours évoluent indépendamment les uns des autres (et peuvent éventuellement fusionner). La seule contrainte provient du fait que les paramètres régissant l'évolution du front s'appliquent à la totalité de l'ensemble de niveau ; il peut donc s'avérer délicat de segmenter des régions présentant des gradients de niveaux de gris disparates. Ce problème peut toutefois être contourné efficacement en réalisant plusieurs segmentations indépendantes successives et en additionnant logiquement les masques obtenus (pour rappel, le temps de calcul dépend essentiellement de la longueur du contour traité).

Il peut être judicieux dans certains cas de positionner plusieurs contours initiaux au sein d'une même région et d'anticiper ainsi leur fusion. Le temps de segmentation augmente en effet considérablement dans le cas de contours en « pointe » (cf. le résultat de l'image gobelet de la figure 1.13), c'est-à-dire lorsque seuls quelques pixels du contour poursuivent leur évolution, mais nécessitent des calculs portant sur la totalité du contour. Il est possible de limiter ce phénomène en réalisant une initialisation multiple pour une même région. Les initialisations multiples permettent également de limiter la connaissance *a priori* nécessaire quant à la forme exacte de la région à détecter, et autorisent une plus grande liberté pour la forme des contours initiaux. Il est ainsi possible de généraliser l'utilisation de formes géométriques de type cercle ou ellipse et ainsi de simplifier la phase de planification. La figure 1.13 illustre la segmentation obtenue pour plusieurs images d'objets complexes (comportant des angles aigus, des concavités prononcées ou des trous).

### 1.4.3 Choix de la fonction d'attache aux données

Un choix classique pour la fonction d'attache aux données  $g()$  dépendant du gradient  $\nabla I$  de l'image consiste en [102, 100] :

$$g(\nabla I) = \frac{1}{1 + |\nabla G_\sigma * I|^p} \quad (1.32)$$

$p \geq 1$  et  $\nabla G_\sigma * I$  représente la convolution de l'image  $I$  avec la gaussienne  $G_\sigma(x, y) = \sigma^{-1/2} \exp(-|x^2 + y^2|/4\sigma)$  (on obtient ainsi une version lissée de l'image  $I$ ).

Nous avons opté pour une fonction d'attache aux données du type fonction sigmoïdale (figure 1.14) qui respecte des conditions de monotonie et de décroissance stricte :

$$g(\nabla I) = 1 - \frac{1}{1 + \exp[-(\nabla I - \alpha)/\beta]} \quad (1.33)$$

Le paramètre  $\alpha$  positionne le point d'inflexion de la courbe et le paramètre  $\beta$  règle la pente de la courbe au niveau du point d'inflexion.

Compte tenu des hypothèses faites sur le contenu image, ces paramètres peuvent être fixés automatiquement à partir des caractéristiques de la zone image couverte par les contours initiaux. Le paramètre  $\alpha$  est ainsi déterminé à partir du maximum de  $|\nabla I|$



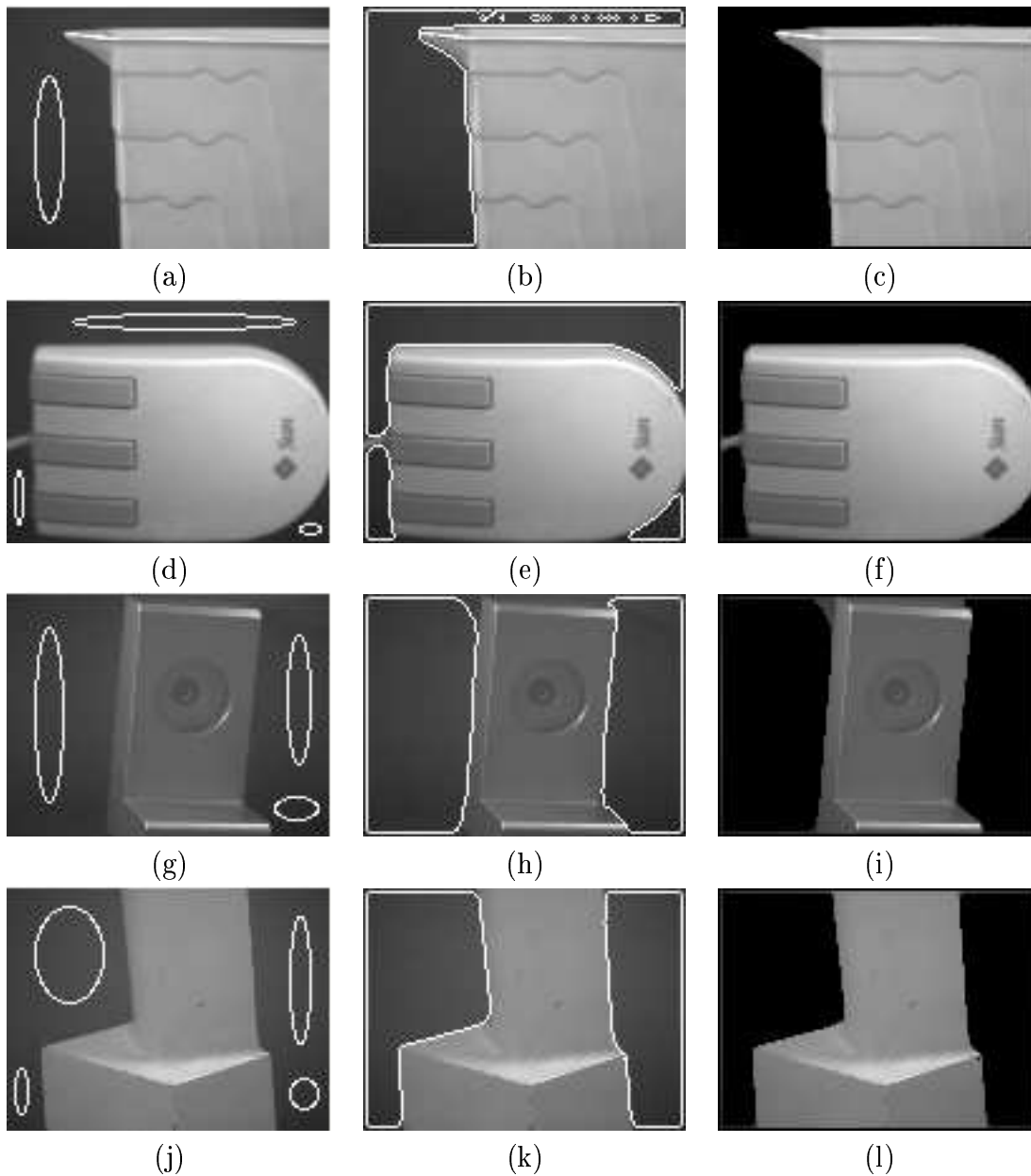


FIG. 1.13 – Segmentation d'images d'objets de formes convexes avec une initialisation multiple. (a) Image Gobelet ( $128 * 96$ ). (b) Contours stabilisés après 59 itérations ( $temps = 32s$ ). (c) Objet extrait. (d) Image Souris ( $128 * 96$ ). (e) Contours stabilisés après 23 itérations ( $temps = 20s$ ). (f) Objet extrait. (g) Image Pièce en L penchée ( $128 * 96$ ). (h) Contours stabilisés après 7 itérations ( $temps = 8s$ ). (i) Objet extrait. (j) Image Pale penchée ( $128 * 96$ ). (k) Contours stabilisés après 7 itérations ( $temps = 9s$ ). (l) Objet extrait.

## 1.4 Application : Construction du masque de l'objet

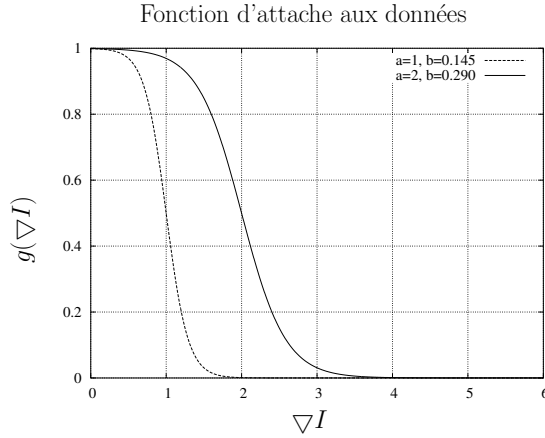


FIG. 1.14 – Fonction d'attache aux données  $g(\nabla I)$  représentée pour deux jeux de paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  différents (notés respectivement  $a$  et  $b$  dans la figure).

pour la région (le niveau du gradient du fond de l'image étant supposé relativement homogène). Le choix de la pente  $\beta$  reste libre mais une valeur minimale est calculée afin d'obtenir  $g(0) = 1$ , compte tenu de la valeur de  $\alpha$ .

### 1.4.4 Influence des paramètres

Nous avons pu constater durant les différentes expériences que la segmentation est souvent délicate à réaliser, compte tenu du nombre important de paramètres entrant en ligne de compte :

- $\Delta t$ , pas temporel lié à la discrétisation de l'équation d'évolution,
- $\lambda_k$ , facteur de pondération dépendant de la courbure,
- $\lambda_{CAG}$ , facteur de pondération propre aux contours actifs géodésiques,
- $a$ , force ballon,
- $\delta$ , largeur de la bande étroite,
- $\alpha$  et  $\beta$ , paramètres de la fonction d'attache aux données.

Certains paramètres sont par ailleurs liés par la contrainte  $\lambda_k \max(|k(\Psi)|) + a + 2\lambda_{CAG} \leq \frac{\delta}{N_{iter}\Delta t}$ .

Comme cela a été déjà évoqué dans le paragraphe 1.3.3, le choix de la largeur  $2\delta$  de la bande étroite a un impact sur le temps d'exécution de la procédure de segmentation, mais n'influe pas sur la qualité de la segmentation obtenue. Nous avons donc fixé *a priori* ce paramètre.

La figure 1.15 illustre les différentes situations expérimentales correspondant à l'application de trois jeux de paramètres différents à deux images. Le Tableau 1.2 récapitule l'ensemble des jeux de paramètres utilisés. Le jeu de paramètres *A* correspond à une segmentation de bonne qualité, le jeu de paramètres *B* à une segmentation marquée par

TAB. 1.2 – Jeux de paramètres appliqués aux deux images images Gobelet et Pale de Turbine de la figure 1.15.

| Paramètre                                | Image Gobelet |      |      | Image Pale |      |      |
|--|---------------|------|------|------------|------|------|
|  | Jeu A         | B    | C    | Jeu A      | B    | C    |
| Nombre d'itérations $N_{iter}$           | 2             | 3    | 4    | 3          | 2    | 2    |
| Terme de courbure $\lambda_k$            | 0.6           | 0.8  | 0.7  | 0.8        | 0.6  | 0.6  |
| Terme géodésique $\lambda_{CAG}$         | 0.28          | 0.14 | 0.14 | 0.14       | 0.28 | 0.28 |
| Force ballon $a$                         | -3            | -2.5 | -2   | -2.5       | -1.2 | -3   |
| Pas temporel $\Delta t$                  | 0.4           | 0.3  | 0.3  | 0.3        | 0.4  | 0.4  |
| Point d'inflexion $\alpha (g(\nabla I))$ | 55.2          | 69   | 41.4 | 69         | 55.2 | 69   |
| Pente de la courbe $\beta (g(\nabla I))$ | 1.4           | 1.55 | 1.25 | 1.55       | 1.4  | 1.55 |

un arrêt précoce de l'évolution du contour. Quant au jeu de paramètres  $C$ , il illustre un échec de la segmentation ; le contour a franchi les frontières de l'objet. Nous remarquons que le jeu de paramètres  $A$ , correspondant à une bonne segmentation, n'est pas le même lorsque le type de l'image change. Cela implique qu'un jeu de paramètres adapté doit être généré pour chaque type d'images à traiter.

Nous avons enfin réalisé, pour chaque type d'images, plusieurs essais de segmentation afin de déterminer le meilleur jeu de paramètres, adapté à l'image, et d'analyser l'influence de chacun de ces paramètres sur la qualité des résultats obtenus. L'ensemble de ces essais a été réalisé en utilisant un jeu de paramètres dont les plages de variation sont rapportées dans le Tableau 1.4. Afin de régler au mieux ces paramètres et d'étudier leur influence sur le comportement de l'évolution des contours actifs, ainsi que sur la qualité des résultats obtenus, nous avons adopté une méthode, complètement différente, pour leur réglage. Nous verrons ainsi dans le chapitre 2, consacré au réglage des paramètres de l'algorithme de segmentation par contours actifs et ensembles de niveaux, une méthode de réglage basée sur une approche qualité exploitant des plans d'expériences.

## 1.5 Conclusion

La détection automatique de la région correspondant à l'objet à évaluer dans l'image de la scène observée est une étape préliminaire indispensable permettant par la suite une reconstruction 3D. Nous avons pour cela proposé une procédure, assurant la séparation des données objet du fond de l'image, fondée sur une technique itérative d'évolution de courbe. La procédure de segmentation mise en œuvre repose sur une approche frontière exploitant l'information gradient de l'image et garantissant l'obtention de contours fermés. Aucun post-traitement spécifique du contour n'est donc nécessaire. Une implémentation par ensemble de niveaux assure la gestion automatique des changements de topologie (fusion et scission) du contour actif. Afin d'accélérer la procédure de segmen-

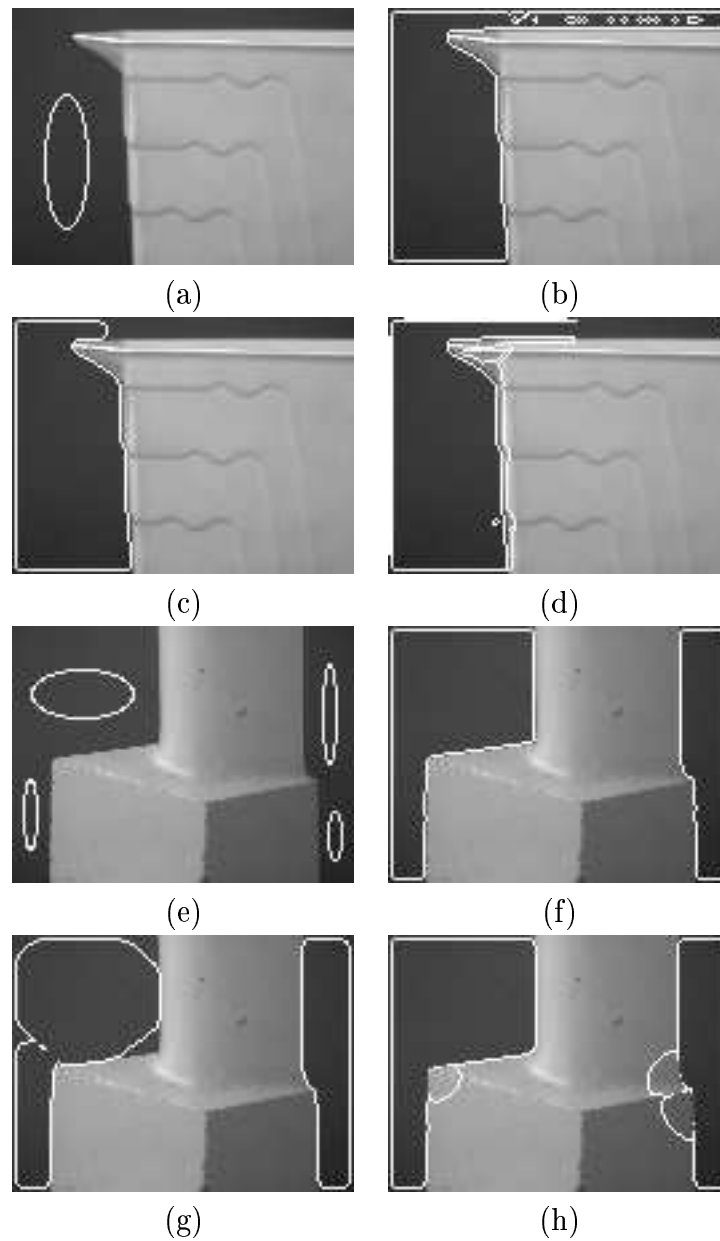


FIG. 1.15 – Influence de la variation des paramètres du modèle de segmentation par contours actifs (cf. tableau 1.2). (a) Image Gobelet  $128 * 96$  et contours initiaux. (b) Segmentation correspondante au Jeu de paramètres A. (c) Jeu de paramètres B. (d) Jeu de paramètres C. (e) Image Pale  $128 * 96$  et contours initiaux. (f) Jeu de paramètres A. (g) Jeu de paramètres B. (h) Jeu de paramètres C.

TAB. 1.3 – Plage de variation des paramètres pour l'ensemble des essais de segmentation.

| Paramètre                                | Valeur minimale | valeur maximale |
|--|-----------------|-----------------|
| Nombre d'itérations $N_{iter}$           | 2               | 5               |
| Terme de courbure $\lambda_k$            | 0.3             | 0.9             |
| Terme géodésique $\lambda_{CAG}$         | 0.0             | 0.42            |
| Force ballon $a$                         | -3.2            | -0.2            |
| Demi largeur de la NB $\delta$           | 4               | 4               |
| Pas temporel $\Delta t$                  | 0.3             | 0.6             |
| Point d'inflexion $\alpha (g(\nabla I))$ | 41.4            | 69              |
| Pente de la courbe $\beta (g(\nabla I))$ | 1.10            | 1.55            |

tation, nous avons choisi de limiter les données à prendre en compte en ne travaillant que sur une bande étroite centrée sur le contour courant.

Ce module de détection s'insérant dans une chaîne d'inspection plus complexe, on suppose que l'on dispose d'informations *a priori* sur la scène observée fournies par un système de planification. Ces connaissances portent notamment sur le nombre, la localisation et la forme générale des régions appartenant au fond, et sont mises à profit afin d'initialiser la segmentation, qui n'est ainsi appliquée qu'à certaines zones particulières de l'image.

Durant nos différents essais de segmentation, et pour une application industrielle temps réel, nous avons pu constater que les temps de calcul nécessaires à la génération des masques binaires ne sont pas forcément négligeables (plage de variations de 4 à 20 secondes). Cela est dû au fait que les contours initiaux ont été placés assez loin des frontières à détecter, afin de mettre en évidence les propriétés des contours actifs. Plusieurs solutions à ce problème de temps de calcul peuvent être proposées : (i) Le positionnement effectif des contours initiaux dépend des connaissances utilisées par le système de planification. Autrement dit, on peut disposer de connaissances *a priori* relativement précises sur la position de l'objet dans l'image, ce qui conduit à une initialisation des contours très proche de la solution recherchée (les frontières de l'objet). De cette manière, l'évolution des contours est beaucoup plus rapide. (ii) L'amélioration du codage pourrait sans doute réduire le coût algorithmique. (iii) Enfin, nous pouvons envisager d'adopter une approche multi-résolution. Cette dernière reposerait initialement sur une analyse de l'image à faible résolution. Après avoir fait évoluer les contours jusqu'à leur stabilisation, on réalise ensuite une analyse de l'image à une résolution supérieure en utilisant comme initialisation les contours obtenus dans l'étape précédente, et ainsi de suite jusqu'à atteindre la résolution initiale. Cette approche présente l'intérêt d'éviter l'effet de crénelage tout en garantissant une vitesse de segmentation satisfaisante.

## 1.5 Conclusion

---

Même si les résultats de segmentation sont satisfaisants dans le cadre de notre application, l'implémentation par ensembles de niveaux met en jeu un nombre considérable de paramètres qu'il s'avère délicat de régler. Les expériences présentées reposent sur un réglage par essais-erreurs et impliquent donc pour chaque type d'images un nombre important d'essais par « tâtonnement ». Dans l'optique de fournir un outil de réglage des paramètres de l'algorithme exploitant les contours actifs, nous avons adopté une approche qualité pour définir ces paramètres. C'est ce que nous allons voir en détail dans le chapitre suivant.



# Chapitre 2

## Réglage des paramètres par plan d'expériences

### 2.1 Introduction

Nous avons pu constater que le résultat de la segmentation d'image par le biais des contours actifs dépendait fortement du réglage des nombreux paramètres qui interviennent, entre autres, dans l'équation d'évolution du contour. Le choix de leurs valeurs dépend en grande partie du contenu des images traitées et fait appel à l'expérience de l'utilisateur. La démarche classique consistant à régler par une succession heuristique d'essais-erreurs les différents paramètres n'est donc pas adaptée si l'on souhaite minimiser l'influence du facteur humain dans le système de reconstruction 3D.

Nous allons donc chercher à mettre en place une méthodologie de réglage de ces paramètres pour optimiser la mise en œuvre dans une application d'inspection industrielle. Nous présentons tout d'abord quelques travaux sur ce thème du réglage, à partir d'éléments bibliographique portant sur les contours actifs. Par la suite, nous développerons la démarche « qualité » que nous avons adoptée. Elle est fondée sur les plans d'expériences (Design Of Experiments - DOE) qui sont très utilisés dans les services « Recherche et Développement » des entreprises travaillant dans divers secteurs d'activité, mais pratiquement ignorés dans le domaine du traitement de l'image, et par les développeurs de logiciel, malgré le nombre souvent important de paramètres à régler dans ces domaines d'activité. La mise en œuvre des plans d'expériences dans le cadre des contours actifs sera ensuite présentée et illustrée par quelques résultats. Enfin, une conclusion synthétisant les travaux réalisés sera présentée.

### 2.2 Quelques approches d'optimisation de la qualité d'une segmentation

Dans cette partie, nous allons faire un bref tour d'horizon des méthodes de réglage de paramètres développées dans le cadre des approches « modèles déformables » et « modèles de contours actifs » en particulier.



Au vu de l'importance de l'influence du terme de régularisation du contour sur la segmentation, de nombreux auteurs se sont penchés sur le réglage du paramètre  $\alpha_1$  contrôlant la continuité de la courbe ainsi que du paramètre  $\alpha_2$  correspondant à sa courbure.

### 2.2.1 Ajustement global hors ligne

Les solutions proposées s'appuient généralement sur une phase d'apprentissage. Les paramètres obtenus sont ensuite utilisables pour une famille d'images présentant sensiblement les mêmes caractéristiques. Bien que la recherche des pondérations soit menée hors ligne, et ne pénalise donc pas le temps effectif de segmentation, le problème fondamental est tout de même de limiter le nombre d'expériences à réaliser afin de déterminer le jeu de paramètres fournissant la meilleure réponse, et cela, pour l'ensemble des images de la famille.

*Bredno et al.* [14] proposent ainsi une approche globale supervisée reposant sur les algorithmes génétiques mais nécessitant de disposer d'un contour idéal de référence. Le critère de qualité est exprimé en fonction de l'aire comprise entre le contour segmenté et le contour idéal. Les pondérations correspondant aux différents paramètres étudiés sont codées dans un chromosome. La puissance exploratoire des algorithmes génétiques est exploitée pour évaluer le résultat de la convergence du contour actif vers sa cible en faisant évoluer ce chromosome.

Rousselle [131] propose d'adopter une démarche « qualité » fondée sur les plans d'expériences permettant de fixer *a priori* le nombre d'essais devant être réalisés et de choisir judicieusement les valeurs correspondantes des pondérations. Une analyse statistique des résultats permet ensuite de déterminer quels sont les paramètres réellement influents sur la qualité de la segmentation et de les optimiser dans une seconde étape.

Ma [98] ne s'intéresse qu'au seul paramètre  $\alpha_1$  et propose une stratégie de réglage itérative. Pour  $k = 1, 2, 3, \dots$ , on teste les valeurs  $\alpha_{1k} = 1.5^k \alpha_0$  (avec  $\alpha_0$  faible). On fait évoluer le contour initial  $C_0$  jusqu'à atteindre une position d'équilibre  $C_k$  telle que le contour soit à une distance moyenne maximale fixé de  $C_0$ . L'analyse de la position des  $C_k$  contours par rapport à la frontière à détecter permet alors de déterminer la meilleure valeur pour  $\alpha_1$ . Il est pour cela nécessaire de définir un contour de référence et de formuler un critère de qualité.

Fisker [46] présente une méthode pour une estimation non supervisée des paramètres reposant sur une formulation bayésienne des modèles déformables. Il considère le modèle comme étant constitué d'une partie décrivant les connaissances *a priori* sur la structure (le patron déformable) et d'une partie qui représente les interactions avec les observations (le contenu image). L'estimation est basée sur une version modifiée de l'algorithme EM (Expectation Maximization).

Larsen [93] propose de définir des limites pour les paramètres d'élasticité du contour actif. Il considère que le contour initial est placé dans une vallée de potentiels correspondant à la frontière à détecter. Il définit ensuite une zone contenant toutes les déformations possibles du contour respectant une condition de distance par rapport au contour initial. Un « dépassement local » se produit lorsque le contour quitte la vallée de potentiels, et un « dépassement global » lorsque le contour quitte cette zone. Il propose d'utiliser un

## 2.2 Quelques approches d'optimisation de la qualité d'une segmentation

---

jeu de paramètres de dépassement locaux ( $\alpha_{1local}$  et  $\alpha_{2local}$ ) qui ne donne pas lieu à un « dépassement global » et, réciproquement, un jeu de paramètres de dépassement globaux ( $\alpha_{1global}$  et  $\alpha_{2global}$ ) qui ne donne pas lieu à un « dépassement local ». Larsen définit les équations permettant de calculer ces deux jeux de paramètres. Elles sont fonction de la longueur totale du contour, du rapport entre l'énergie du contour initial et l'énergie du contour courant, ainsi que de la longueur, de l'angle et de la courbure minimale des segments de contour.

### 2.2.2 Ajustement global en ligne

Dans cette situation, il s'agit d'ajuster automatiquement les paramètres pendant l'évolution du contour actif. La détermination des pondérations est donc adaptée à l'image effectivement traitée et doit par conséquent conduire à une segmentation de meilleure qualité. Le temps global de segmentation est par contre allongé, du fait du calcul lié à l'ajustement des paramètres.

Cohen [29] propose ainsi que les deux paramètres  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  soient ajustés en fonction de la géométrie du contour :

$$\alpha_1 = \left(\frac{1}{N_p}\right)^2 \quad \text{et} \quad \alpha_2 = \left(\frac{1}{N_p}\right)^4 \quad (2.1)$$

$N_p$  correspond au nombre de points du contour courant. Cet ajustement évite le réglage empirique classique, mais n'apporte pas d'amélioration notable sur la qualité de segmentation.

Maurincomme [131] propose d'ajuster les paramètres en fonction du contenu local de l'image. Il divise donc l'espace autour du contour courant en trois régions (ou jeux de points) : le premier jeu de points est constitué du contour lui-même, le second est pris à l'intérieur de la courbe et le troisième à l'extérieur. Pour chaque région, il calcule les valeurs moyennes des niveaux de gris et du gradient, qu'il utilise ensuite pour adapter les paramètres  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$ .

### 2.2.3 Ajustement local en ligne

Dans ce cas, l'évolution de chaque point du contour est régie par ses propres valeurs de paramètre qui sont ajustées automatiquement au cours de l'évolution du contour. Les pondérations sont donc ajustées localement en fonction du contenu image et/ou de la géométrie du contour. Il va de soi que cette approche est extrêmement coûteuse en temps de calcul.

Ainsi, Gao [131] échantillonne de manière non uniforme le contour courant et obtient une liste de points de contrôle. Il détermine la valeur des paramètres pour chacun de ces points de contrôle selon les relations :

$$\alpha_{1i} = A(1 - e^{-1.67 \cdot 10^{-3} d_i}) \quad \text{et} \quad \beta_{1i} = B \cdot e^{-10^{-2} k_i} \quad (2.2)$$

$d_i$  représente la distance entre deux points,  $k_i$  représente la courbure et  $A$  et  $B$  deux constantes déterminées empiriquement.

Dans une application de détection des contours d'une bouche vue dans une image, Delmas [34] exploite les équations de la forme géométrique vers laquelle le contour actif doit converger. Le contour est ainsi initialisé à partir des valeurs des coefficients calculées d'après le modèle géométrique des lèvres, ainsi que des valeurs moyennes des gradients. Au cours de l'évolution de la courbe, les grandeurs géométriques de la bouche sont recalculées et cet auteur met à jour le coefficient  $\alpha_2$ , qui est fonction de la courbure locale.  $\alpha_1$  est conservé constant.

Dans [28], Cohen propose que les paramètres  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  soient déterminés localement à chaque itération  $i$  par deux équations différentielles faisant apparaître des matrices diagonales d'éléments  $\alpha_{1i}$  et  $\alpha_{2i}$  avec  $i \in [1, N]$ . Ces équations peuvent être résolues par le biais d'un système de  $N$  équations différentielles du premier et du deuxième ordre. Delmas [34] reproduit les travaux de Cohen avec une amélioration pour le calcul de  $\alpha_1$ . Il montre notamment que la valeur de  $\alpha_1$  en un point quelconque est inversement proportionnelle aux valeurs de la dérivée de la position du contour actif et du potentiel externe en ce point. Ces travaux restent toutefois difficilement exploitables, car ils reposent sur l'inversion d'une matrice de rigidité pour chaque point du contour et à chaque itération.

Rousselle [131] ne fixe pas *a priori* les coefficients mais les laisse se déterminer localement de manière aléatoire. Il s'appuie pour cela sur une analyse de l'algorithme itératif « greedy », proposé par William et Shah [160], consistant à faire évoluer chaque point du contour l'un après l'autre, dans son propre voisinage. À chaque itération et pour chaque point du voisinage, une énergie totale est calculée à partir des différentes énergies normalisées (les coefficients de pondération sont déterminés de manière globale). Le point choisi comme nouveau point sera le point d'énergie minimale. La convergence du contour actif est assurée en n'acceptant un jeu de paramètres que s'il diminue l'énergie totale calculée avec ce nouveau jeu.

### 2.2.4 Synthèse

Les approches de réglage des paramètres en cours d'évolution du contour sont généralement très coûteuses en temps de calcul, notamment si l'on considère des ajustements locaux. De plus, leur formulation est très dépendante de l'application et ces approches ne sont souvent exploitables que pour une implémentation particulière des contours actifs. Bien que permettant un contrôle très fin du contour, elles sont donc délicates à mettre en œuvre dans un cadre général.

Compte tenu de l'application envisagée, on peut admettre que les conditions d'acquisition sont sensiblement les mêmes pour la totalité de la séquence d'images utilisée pour reconstruire l'objet à évaluer. Les images devant être segmentées ont ainsi sensiblement les mêmes caractéristiques en ce qui concerne les zones qui seront traitées ; le fond est par exemple toujours constitué de régions uniformes non texturées. On peut donc envisager de déterminer expérimentalement et hors ligne un jeu de paramètres qui sera valide pour toute une famille d'images présentant sensiblement les mêmes caractéristiques.

L'intérêt des méthodes d'ajustement global hors ligne réside également dans le fait qu'elles n'imposent pas de limite au nombre de paramètres étudiés. Il est ainsi possible de régler d'autres paramètres que  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$ . Nous avons donc retenu une approche se basant sur une démarche qualité et utilisant les plans d'expériences afin de satisfaire

## 2.3 Éléments fondamentaux des plans d'expériences

---

deux objectifs : d'une part, rationaliser le travail expérimental devant être réalisé pour déterminer un jeu de paramètres optimal et, d'autre part, déterminer quels sont les paramètres les plus pertinents de l'ensemble de la procédure de segmentation. Ce dernier point trouvera notamment une utilité lors des phases d'ajustement automatique en ligne des paramètres de segmentation, compte tenu des conditions réelles d'acquisition.

## 2.3 Éléments fondamentaux des plans d'expériences

La Méthodologie de Recherche Expérimentale (MRE) est un ensemble de méthodes et de modes de raisonnement destinés à tout expérimentateur désirant optimiser l'efficacité de sa recherche expérimentale, quel que soit son domaine d'activité. Pour ce faire, cette méthodologie va l'aider à exprimer aux mieux son problème et lui proposer les stratégies expérimentales (enchaînement de plans d'expériences dans le temps) les plus économiques et les plus informatives, en fonction des objectifs qu'il s'est fixé et des moyens dont il dispose.

La méthode des plans d'expériences n'est pas une technique nouvelle de réglage et d'optimisation de paramètres. Elle date du début du siècle, avec les travaux de Fisher (1925), qui a su définir un protocole expérimental ayant comme objectif non seulement de minimiser le nombre d'essais, mais aussi de maximiser la précision des résultats obtenus. Cette méthode de recherche expérimentale est plus connue sous le nom de « plans d'expériences », ou « Design Of Experiments » chez les anglo-saxons. Elle a été utilisée pour la première fois par les agronomes, pour qui le coût d'une campagne d'expériences est considérable, autant en ce qui concerne la durée des essais que du point de vue financier. Cette technique est toutefois restée relativement confidentielle et il a fallu attendre les années 1980, et notamment les travaux de Taguchi [152, 125] qui a su simplifier et clarifier l'utilisation des plans d'expériences, pour que la diffusion de ces derniers se fasse vers d'autres domaines d'application. Le développement de l'informatique et la puissance de calcul qui l'accompagne ont également permis leur essor et leur utilisation dans des domaines aussi divers que l'électrotechnique [67], la métallurgie, la géologie, ou la mécanique des roches [96].

### 2.3.1 Principe et terminologie

Un système ou un processus réagit en fonction de différents facteurs  $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_N$  qui sont susceptibles de le modifier. Afin de modéliser le comportement d'un processus, une méthode classique d'étude consiste à mesurer la réponse  $y_k$  du système en faisant varier une variable  $X_i$  tout en laissant fixe les  $N-1$  autres variables, puis à répéter la méthode pour les autres variables. À partir de plusieurs essais, il est alors possible d'établir une relation de cause à effet entre la réponse  $Y$  et les différentes variables  $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_N$ .

Afin d'éviter le tâtonnement, il faut adopter une démarche rigoureuse dans l'établissement et la conduite des essais. La spécificité des plans d'expériences tient au fait que l'on fait varier simultanément plusieurs variables dans chaque expérience et cela de manière raisonnée et programmée *a priori* (approche statistique). Le principe de la mé-

thode consiste donc à ne pas étudier tous les points du maillage défini par les variables d'entrée  $X_i$ , mais à étudier seulement certains points choisis en respectant une contrainte d'orthogonalité que nous détaillerons un peu plus loin dans ce chapitre. Cette approche permet d'étudier un très grand nombre de variables en limitant le nombre des essais.

L'analyse des mesures expérimentales [61, 108, 67, 130] est faite à l'aide d'une régression linéaire multiple. Une analyse de variance permet de déterminer, pour un taux de confiance  $\alpha$ , les variables dont l'influence est significative.

Nous introduisons d'abord la terminologie propre du domaine, puis nous détaillons le modèle mathématique utilisé.

### Définitions

**Expérience.** Une expérience représente un essai effectué pour étudier un phénomène.

**Réponse.** On peut la définir par la grandeur que l'on mesure pour connaître l'effet des facteurs influant sur le système.

**Facteur.** Un facteur est une variable ou un état qui agit sur le système étudié. Il peut être de type continu (température, vitesse) ou discret (état ouvert ou fermé, présent ou absent). Il est fondamental que le facteur soit maîtrisé dans ses possibilités de réglage.

**Niveaux d'un facteur.** Les niveaux d'un facteur correspondent aux valeurs que peut prendre ce dernier au cours des essais. Bien souvent, on étudie un facteur en utilisant deux niveaux, symbolisés dans les tables par  $+1$  et  $-1$ , ou  $x^+$  et  $x^-$ .

**Facteur significatif.** C'est un facteur qui modifie de façon significative la réponse du système lorsqu'il change de niveau.

**Matrice d'expérience.** C'est une matrice qui représente (sous forme codée ou normée) l'ensemble des expériences à réaliser. En d'autres termes, c'est un Tableau d'éléments  $x_{ij}$  constitué de  $N$  lignes, correspondant aux  $N$  expériences à réaliser, et de  $k$  colonnes, correspondant aux  $k$  variables étudiées [131].

**Plan factoriel.** Il s'agit d'un plan d'expériences regroupant toutes les combinaisons possibles de niveaux des facteurs.

**Effet.** L'effet d'un facteur  $x$  correspond à la variation de la réponse  $y$  lorsque  $x$  passe d'un niveau  $x_1$  à un niveau  $x_2$ . D'une manière graphique, comme l'indique la figure 2.1, plus la pente est forte, plus l'effet est important.

## 2.3 Éléments fondamentaux des plans d'expériences

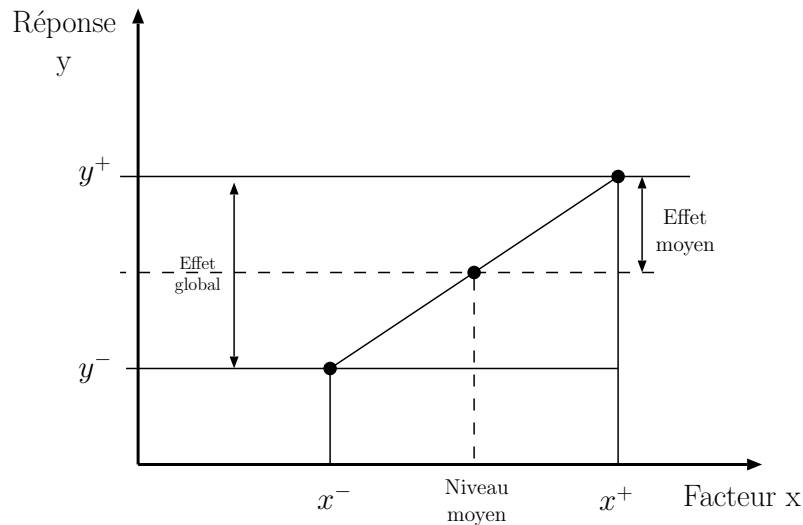


FIG. 2.1 – Effet d'un facteur. L'effet global d'un facteur représente l'influence du facteur sur la réponse quand il passe du niveau  $x^-$  à  $x^+$ . L'effet moyen d'un facteur représente l'influence du facteur sur la réponse quand il passe du niveau  $x^-$  au niveau moyen et du niveau moyen au niveau  $x^+$ .

**Interactions** Une interaction s'exprime par l'influence du niveau d'un facteur sur l'effet d'un autre facteur en regard des objectifs recherchés. La figure 2.2 illustre graphiquement l'interaction de deux facteurs  $x_1$  et  $x_2$ . Une interaction entre deux facteurs est qualifiée d'interaction d'ordre 2, entre trois facteurs d'interaction d'ordre trois, etc. Dans la pratique, il est d'usage de négliger les interactions d'ordre élevé (3 ou plus).

**Notion de modèle** La régression linéaire multiple est une méthode d'analyse de données quantitative mettant en évidence le lien entre la réponse, notée  $Y$ , d'un système et plusieurs variables d'entrées (aléatoires ou contrôlées, c'est-à-dire connues sans erreurs) que l'on note  $X_1, X_2, \dots, X_k$ . Le bruit de mesure, la dérive des appareils, etc. font que la valeur observée  $y_i^{obs}$  de  $Y$  obtenue lors de la réalisation de l'expérience d'indice  $i$  diffère de la valeur  $y_i$  attendue d'une quantité aléatoire  $\varepsilon_i$ , généralement supposée distribuée selon une loi normale de Laplace-Gauss. Un modèle mathématique couramment utilisé dans le cadre des plans d'expériences est du type linéaire ou polynomial du 1<sup>er</sup> degré et s'écrit :

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 X_1 + \dots + \alpha_k X_k + \alpha_{12} X_1 X_2 + \dots + \alpha_{1k} X_1 X_k + \dots + \alpha_{1\dots k} X_1 \dots X_k + \varepsilon \quad (2.3)$$

Dans ce modèle,  $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{1\dots k}$  et  $\varepsilon$  sont des variables aléatoires.

On appelle ajustement du modèle toute solution du système de  $n$  équations, correspondant aux  $n$  expériences effectuées, ci-après :

$$y_i = a_0 + a_1 x_{i1} + \dots + a_k x_{ik} + a_{12} x_{i1} x_{i2} + \dots + a_{1k} x_{i1} x_{ik} + \dots + a_{1\dots k} x_{i1} \dots x_{ik} + \varepsilon_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2.4)$$

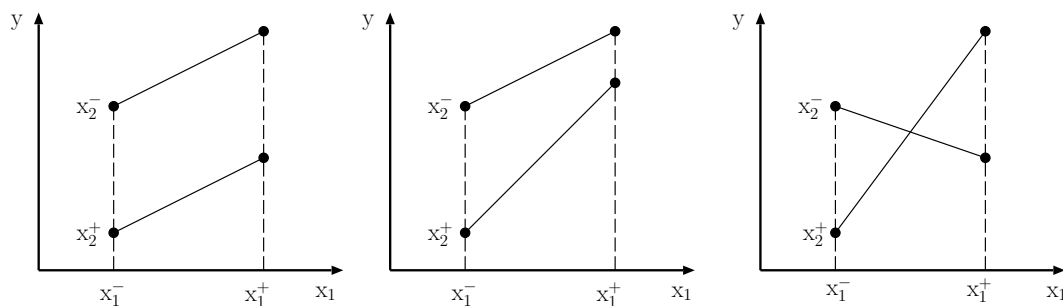


FIG. 2.2 – Interactions des facteurs  $x_1$  et  $x_2$  dans trois cas. (a) Pas d'interaction : le niveau du facteur  $x_2$  n'a aucune incidence sur l'effet produit par  $x_1$  ; graphiquement, les droites sont parallèles. (b) Faible interaction : le niveau du facteur  $x_2$  influe sur l'effet produit par  $x_1$  ; graphiquement, les droites convergent ou divergent. (c) Forte interaction : le niveau du facteur  $x_2$  est déterminant sur l'effet produit par  $x_1$  ; graphiquement, les droites sont sécantes.

Dans ce système :

- $y_i, x_{i1}, \dots, x_{ik}$  sont les valeurs observées lors de la réalisation des expériences,
- les  $\varepsilon_i$  sont les résidus d'ordre  $i$  observés lors de la réalisation des expériences. Ils sont définis par  $\varepsilon_i = y_i - \text{somme}(a_k x_{ik})$ ,
- $a_0, a_1, \dots, a_{1\dots k}$  sont les estimateurs des variables aléatoires  $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{1\dots k}$ .

L'ajustement par moindres carrés fournit les estimateurs  $a_0, a_1, \dots, a_{1\dots k}$  conduisant à un minimum pour la somme des carrés des résidus.

On obtient alors :

$$Y^{obs} = a_0 + a_1 X_1 + \dots + a_k X_k + a_{12} X_1 X_2 + \dots + a_{1k} X_1 X_k + \dots + a_{1\dots k} X_1 \dots X_k \quad (2.5)$$

Une fois les coefficients  $a_0, a_1, \dots, a_{1\dots k}$  identifiés à l'aide des plans d'expériences, il est possible d'estimer la réponse attendue pour des valeurs quelconques de ces facteurs.

### 2.3.2 Plans factoriels

L'analyse par les plans d'expériences vise à obtenir un certain nombre d'informations quantitatives et qualitatives sur le système étudié, notamment sur :

- les effets des facteurs et leur influence sur la réponse (quels sont les facteurs influents et non influents ?),
- l'existence ou non d'interactions (influence d'un paramètre sur l'état d'un autre paramètre eu égard aux objectifs recherchés) entre les différents facteurs,
- la valeur des facteurs permettant d'optimiser la réponse (dans notre cas la qualité de la segmentation).

La méthode des plans d'expériences permet de tirer des conclusions en faisant varier les facteurs simultanément (donc en optimisant le nombre d'expériences). Il existe pour ce faire plusieurs types de plan nécessitant plus ou moins de connaissances sur le modèle

## 2.3 Éléments fondamentaux des plans d'expériences

---

et offrant différentes propriétés statistiques. On peut notamment citer les plans orthogonaux, les plans centraux composites [83] développés dans la méthodologie des surfaces de réponses, les plans optimaux [65], les plans en blocs [83, 8], etc.

Nous avons choisi d'utiliser les plans orthogonaux car on peut les construire à partir de quelques règles élémentaires (certains plans sont directement fournis sous la forme de tables), leurs propriétés statistiques sont intéressantes, leur analyse est relativement simple, et ce sont les plus anciens, donc les mieux maîtrisés. Ces plans factoriels se présentent sous la forme de plans complets ou de plans fractionnaires, la forme à retenir dépendant de l'objectif recherché.

### Cas particulier : les plans à deux niveaux

Le nombre de niveaux pris par les facteurs définit les limites du domaine d'étude. Le choix de ce nombre dépend du type de l'influence du facteur : pour estimer une influence linéaire, deux niveaux suffisent, alors que pour estimer une influence non linéaire (quadratique par exemple), trois niveaux au moins sont nécessaires. Les niveaux sont ensuite généralement équi-répartis dans le domaine de variation d'un facteur afin qu'ils soient les plus représentatifs possibles des variations du facteur.

Dans la pratique, on se limite généralement à une plage de variation restreinte, pour laquelle on suppose qu'un facteur a, sur la variable étudiée, un effet se traduisant par une fonction monotone. Les plans à deux niveaux sont donc couramment utilisés car ils correspondent souvent à la réalité physique et sont simples à définir et à analyser.

Dans un souci de clarté, l'ensemble des développements présentés dans la suite concernent les plans à deux niveaux, mais ils peuvent sans difficulté être étendus aux plans de niveaux quelconques.

**Plan factoriel complet.** Un plan complet contient toutes les combinaisons possibles de niveaux des facteurs. On note ce plan  $X^k$  pour signifier le nombre d'expériences à effectuer avec l'ensemble des combinaisons d'un système comportant  $k$  facteurs à  $X$  niveaux chacun. Pour  $k$  facteurs, la matrice d'expériences d'un plan à deux niveaux comporte  $k$  colonnes et  $2^k$  lignes. On la construit à l'aide de l'algorithme de Yates [8] qui consiste à alterner les  $-1$  et les  $+1$  toutes les  $2^{j-1}$  lignes pour la  $j^{eme}$  colonne ( $j = 1, \dots, k$ ).

Par exemple, pour 3 facteurs à 2 niveaux, on obtient le plan  $2^3$  constitué des 8 configurations présentées Tableau 2.1.

La matrice des effets d'un plan factoriel complet possède autant de colonnes que de facteurs et d'interactions à étudier. Le nombre de lignes, c'est-à-dire le nombre d'expériences à réaliser, est uniquement fonction du nombre de facteurs et de niveaux. À toute interaction entre deux variables  $X_i$  et  $X_j$ , on fait ainsi correspondre une colonne que l'on baptise  $X_i X_j$  et dont on obtient les valeurs en faisant le produit ligne à ligne des colonnes des variables  $X_i$  et  $X_j$ .

On calcule l'effet d'un facteur (ou d'une interaction) comme étant la différence des moyennes des réponses déterminées respectivement pour le niveau supérieur et le niveau inférieur.

La matrice des effets du plan  $2^3$  est donnée Tableau 2.2.



TAB. 2.1 – Plan complet  $2^3$ .

| Exp. N° | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | Rep.  |
|---------|-------|-------|-------|-------|
| 1       | -1    | -1    | -1    | $y_1$ |
| 2       | +1    | -1    | -1    | $y_2$ |
| 3       | -1    | +1    | -1    | $y_3$ |
| 4       | +1    | +1    | -1    | $y_4$ |
| 5       | -1    | -1    | +1    | $y_5$ |
| 6       | +1    | -1    | +1    | $y_6$ |
| 7       | -1    | +1    | +1    | $y_7$ |
| 8       | +1    | +1    | +1    | $y_8$ |

TAB. 2.2 – Matrice des effets du plan complet  $2^3$ .

| Exp. N° | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_1X_2$ | $X_1X_3$ | $X_2X_3$ | $X_1X_2X_3$ | Rep.      |
|---------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|-------------|-----------|
| 1       | -1    | -1    | -1    | +1       | +1       | +1       | -1          | $y_1$     |
| 2       | +1    | -1    | -1    | -1       | -1       | +1       | +1          | $y_2$     |
| 3       | -1    | +1    | -1    | -1       | +1       | -1       | +1          | $y_3$     |
| 4       | +1    | +1    | -1    | +1       | -1       | -1       | -1          | $y_4$     |
| 5       | -1    | -1    | +1    | +1       | -1       | -1       | +1          | $y_5$     |
| 6       | +1    | -1    | +1    | -1       | +1       | -1       | -1          | $y_6$     |
| 7       | -1    | +1    | +1    | -1       | -1       | +1       | -1          | $y_7$     |
| 8       | +1    | +1    | +1    | +1       | +1       | +1       | +1          | $y_8$     |
| Effet   | $E_1$ | $E_2$ | $E_3$ | $E_{12}$ | $E_{13}$ | $E_{23}$ | $E_{123}$   | $y^{moy}$ |

## 2.3 Éléments fondamentaux des plans d'expériences

---

Pour un plan construit avec l'algorithme de Yates, les coefficients  $a_0, a_1, \dots, a_{1\dots k}$  du modèle utilisé pour la régression linéaire multiple sont en fait les effets des différents facteurs :  $a_0$  est la réponse théorique au centre du domaine de variation des facteurs (réponse moyenne  $y^{moy}$ ),  $a_i$  est l'effet moyen  $E_i$  du facteur  $X_i$  et  $a_{ij}$  est l'effet moyen  $E_{ij}$  de l'interaction entre les facteurs  $X_i$  et  $X_j$ . Ce résultat permet de s'affranchir de tout calcul matriciel.

On peut montrer que la meilleure précision sur ces coefficients est obtenue si l'on fait varier les niveaux de tous les facteurs à chaque expérience et si toutes les expériences participent à l'estimation de chaque coefficient. Pour construire un plan d'expériences satisfaisant à ces conditions, les mathématiciens ont énoncé des critères d'optimalité. Fisher et Yates [8] ont ainsi montré que l'indépendance des estimations des coefficients du modèle pouvait être assurée par une matrice orthogonale ; en d'autres termes, que pour tout couple de facteurs, chaque niveau de l'un est associé à chaque niveau de l'autre un même nombre de fois, indépendamment du couple de facteurs choisi. Le français Jacques Hadamard a également démontré que, pour obtenir en  $n$  expériences une variance minimale, la matrice des effets  $E$  devait vérifier la relation  $E^T E = nI_n$  où  $I_n$  est la matrice identité d'ordre  $n$ . Un plan factoriel complet construit avec l'algorithme de Yates satisfait à ces conditions.

Un plan complet permet d'estimer les effets principaux des facteurs, ainsi que de toutes les interactions, et donc d'identifier l'ensemble des paramètres du modèle. Mais, si le nombre de facteurs ou de niveaux augmente, alors le nombre d'expériences à réaliser devient rapidement prohibitif.

**Plan factoriel fractionnaire.** On peut se demander s'il est vraiment nécessaire de réaliser toutes les expériences du plan factoriel complet afin d'estimer le modèle du système. Pour répondre, Phan Tan Luu [124] s'est ainsi posé la question suivante : nous devons faire des expériences, mais lesquelles ? Les expériences à effectuer sont évidemment celles qui vont apporter les informations désirées. Supposons qu'il existe un ensemble d'expériences possibles, et que dans cet ensemble existe celles qui conduisent aux informations désirées. On peut alors essayer de trouver ce sous-ensemble, comprenant moins d'expériences (et donc plus économique à réaliser), mais apportant une information de qualité suffisante pour répondre aux objectifs du plan.

Les plans fractionnaires sont ainsi un cas particulier des plans factoriels complets, pour lesquels tous les niveaux de chaque facteur sont utilisés, mais pas toutes les combinaisons de niveaux possibles (les plans de Taguchi sont un exemple de plans fractionnaires).

On se fixe donc comme objectif de réaliser, pour l'étude de  $k$  facteurs, non pas un nombre total de  $2^k$  expériences, mais seulement de  $2^{k-p}$  expériences. Pour cela, on va déduire un sous-plan à partir du plan complet  $2^k$  (correspondant donc au nombre d'expériences souhaitées). Les  $k-p$  colonnes correspondant aux facteurs du plan complet sont affectées aux premiers facteurs du sous-plan, et  $p$  colonnes d'interactions de la matrice des effets du plan complet sont affectées aux  $p$  facteurs restants. On dit que l'on a aliasé

TAB. 2.3 – Matrice d'expériences d'un plan fractionnaire  $2^{4-1}$ . La colonne du facteur  $X_4$  correspond à la colonne de l'interaction  $X_1X_2X_3$  du plan  $2^3$ .

| Exp.      | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | Rep.      |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 1         | -1    | -1    | -1    | -1    | $y_1$     |
| 2         | +1    | -1    | -1    | +1    | $y_2$     |
| 3         | -1    | +1    | -1    | +1    | $y_3$     |
| 4         | +1    | +1    | -1    | -1    | $y_4$     |
| 5         | -1    | -1    | +1    | +1    | $y_5$     |
| 6         | +1    | -1    | +1    | -1    | $y_6$     |
| 7         | -1    | +1    | +1    | -1    | $y_7$     |
| 8         | +1    | +1    | +1    | +1    | $y_8$     |
| Contraste | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ | $A_4$ | $y^{moy}$ |

TAB. 2.4 – Tableau de correspondance des degrés de liberté.

|             | Nombre de <i>ddl</i> correspondant       |
|-------------|--|
| Moyenne     | 1  |
| Facteur     | Nombre de niveaux - 1                    |
| Interaction | Produit des <i>ddl</i> de chaque facteur |

des facteurs par des interactions. Le Tableau 2.3. présente une matrice d'expériences d'un plan fractionnaire  $2^{4-1}$ , déterminée à partir de la matrice d'expériences du plan complet  $2^3$  (cf. Tableau 2.2). Le même nombre d'expériences permet donc d'étudier les effets de ces facteurs supplémentaires, au prix toutefois de l'impossibilité d'étudier les effets des interactions aliasant des facteurs.

Un plan fractionnaire doit vérifier un certain nombre de propriétés dont la première est l'orthogonalité. Cette propriété est fondamentale pour la précision des estimations et pour être capable de calculer les effets d'un facteur, indépendamment des autres facteurs, à partir des résultats du plan. Une seconde condition porte sur le nombre minimum d'expériences qu'il est nécessaire de réaliser afin de déterminer l'ensemble des coefficients du modèle. Il faudra réaliser au moins autant d'expériences qu'il y a de degrés de liberté. Le nombre de degrés de liberté total du modèle s'obtient en additionnant les degrés de liberté (*ddl*) définis dans le Tableau 2.4.

À partir d'un plan complet, il est possible de construire plusieurs plans fractionnaires orthogonaux permettant l'analyse du même nombre de facteurs. De nombreuses méthodes permettant de construire ces sous-ensembles de plans existent, la plus diffusée étant celle de Box et Hunter [13].

## 2.3 Éléments fondamentaux des plans d'expériences

---

Dans le cas des plans fractionnaires, on ne parle plus d'effet mais de contraste. En effet, si l'on analyse le contraste obtenu pour un facteur  $X_i$  donné du plan fractionnaire  $2^{k-p}$ , on s'aperçoit qu'il correspond à l'addition de l'effet de ce facteur  $X_i$  dans le plan complet  $2^k$  et de l'effet d'une ou plusieurs interactions entre facteurs de ce plan  $2^k$  (le recours à un générateur d'alias permet de définir aisément cette addition). Le résultat obtenu est toutefois satisfaisant si la valeur de l'effet de cette interaction peut être négligé devant la valeur de l'effet principal.

La réduction du nombre d'expériences a donc un prix : moindre précision des estimateurs (moins d'expériences sont effectuées pour un facteur donné) et estimation non des effets des facteurs, mais des effets de leurs alias. Il n'est donc plus possible d'étudier toutes les interactions entre facteurs. Une connaissance approfondie du phénomène étudié est donc nécessaire pour recourir aux plans fractionnaires.

### 2.3.3 Interprétation des effets et analyse de variance

La réponse observée pour chaque expérience permet une première interprétation immédiate des mesures. Eu égard à l'objectif à atteindre (maximiser ou minimiser la réponse), il est en effet possible de choisir parmi les expériences réalisées, le jeu de paramètres ayant conduit au maximum ou au minimum de la réponse.

Il est toutefois possible que la combinaison optimale des facteurs se situe hors des jeux d'essai du plan. Le modèle permet cependant d'estimer la réponse pour des essais non réalisés. Si le modèle ne contient pas de polynômes de degré supérieur à 1 et s'il ne fait apparaître aucune interaction entre facteurs, alors il suffit d'optimiser chaque facteur indépendamment des autres pour obtenir le jeu de paramètres optimum. Si le modèle fait apparaître des interactions d'ordre 2, toutes disjointes, alors il est nécessaire d'optimiser séparément les facteurs qui n'entrent pas en interaction et les couples de facteurs en interaction. Pour les modèles contenant des polynômes de degré élevés et/ou beaucoup d'interactions, il est nécessaire de recourir à des techniques d'optimisation plus complexes telles que les méthodes de gradient (algorithme proposé par Powell [128]) ou de programmation linéaire en nombres entiers [8].

On peut noter qu'il existe des algorithmes de recherche des meilleurs sous-modèles permettant d'éliminer les termes superflus d'un modèle initial, dans le but d'interpréter au mieux les variations de la réponse. Parmi les différents critères d'ajustement du modèle les plus couramment rencontrés, on peut citer la variance résiduelle minimale et le coefficient de corrélation reliant la réponse observée à la réponse estimée par le modèle. Le principe de base de ces algorithmes de recherche consiste à définir un arbre binaire exhaustif des sous-modèles, qui indique tous les chemins possibles permettant de passer d'un sous-modèle à un autre (la relation d'ordre correspond à l'inclusion des modèles les uns dans les autres). Si le nombre de variables du modèle de départ est faible, il est possible de réaliser une recherche exacte (on obtient alors la liste des  $n$  meilleurs sous-modèles). Sinon, seule une recherche heuristique est envisageable (on obtient alors une estimation de la distance qui sépare le modèle du meilleur sous-modèle).

La notion d'effet permet quant à elle de quantifier l'influence des différents facteurs sur la réponse (et cela indépendamment du type de modèle utilisé). Nous rappelons que l'effet d'un facteur ou d'une interaction est la différence des moyennes des réponses

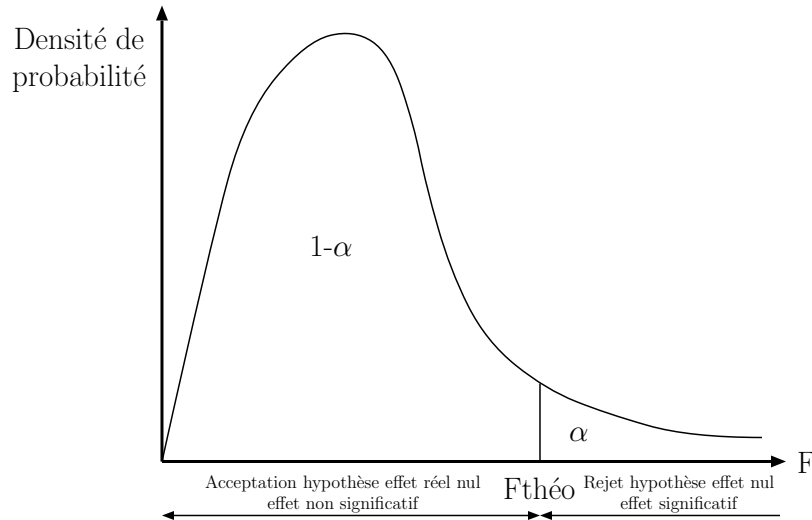


FIG. 2.3 – Loi de Snedecor-Fisher.

associées au niveau supérieur et au niveau inférieur. L'interprétation est simple : plus la valeur numérique de l'effet est importante eu égard à la moyenne des réponses, plus la réponse est sensible à une modification de la valeur du facteur considéré (dans la plage de valeurs correspondant aux niveaux fixés).

Un outil supplémentaire d'analyse statistique est toutefois nécessaire afin de déterminer dans quelle mesure on peut se fier aux résultats obtenus.

L'analyse de variance consiste à calculer le rapport  $F_{exp}$  entre la variance de l'effet d'un facteur et la variance résiduelle totale. Si on fait l'hypothèse que ce facteur n'a pas d'influence sur le système, alors le rapport  $F_{exp}$  suit une loi de Snedecor-Fisher dont la distribution est présentée dans la figure 2.3. Le test de validité consiste à fixer un taux de confiance  $(1 - \alpha)$ , de déduire de la loi une valeur  $F_{theo}$  que l'on compare ensuite au rapport  $F_{exp}$  calculé à partir d'une somme des carrés des écarts ( $SCE$ ).

Si  $F_{exp} > F_{theo}$ , le facteur en question est significatif, donc influent ; par contre si  $F_{exp} < F_{theo}$ , alors le facteur n'est pas significatif [131].

La somme des carrés des écarts des effets du facteur  $X_i$  s'exprime par :

$$SCE(X_i) = \frac{N}{n_{X_i}} \sum_{n=1}^{n_{X_i}} (E_{X_i}^n)^2 \quad (2.6)$$

Avec :

- $N$ , nombre d'expériences réalisées,
- $n_{X_i}$ , nombre de niveaux du facteur  $X_i$ ,
- $E_{X_i}^n$ , effet du facteur  $X_i$  au niveau  $n$ .

La somme des carrés des écarts des réponses est quant à elle donnée par :

$$SCE_{total} = \sum (y_i - y_{moy})^2 \quad (2.7)$$

## 2.3 Éléments fondamentaux des plans d'expériences

---

Avec :

- $y_i$ , réponse de l'expérience  $i$ ,
- $y_{moy}$ , moyenne des réponses.

On peut ensuite calculer la variance associée à chaque facteur, à chaque interaction, ainsi qu'aux résidus en faisant intervenir le nombre de degrés de liberté qui leur sont respectivement associés :

$$VAR(X_i) = \frac{SCE(X_i)}{(n_{X_i} - 1)} \quad (2.8)$$

$$VAR(X_i X_j) = \frac{SCE(X_i X_j)}{[(n_{X_i} - 1)(n_{X_j} - 1)]} \quad (2.9)$$

$$VAR(residus) = \frac{SCE_{total} - \sum SCE_{(facteurs\ et\ interactions)}}{(ddl_{total} - \sum ddl_{facteurs\ et\ interactions})} \quad (2.10)$$

$ddl_{total}$  est égale à  $N - 1$ .  $F_{exp}$  est enfin obtenu par le rapport entre la variance du facteur ou de l'interaction et la variance des résidus.

Après avoir choisi le risque  $\alpha$  (généralement 1% ou 5%), on recherche dans la table de Snedecor-Fisher la valeur  $F_{theo}$  associée au  $ddl$  du facteur noté  $\nu_1 = (n_{X_i} - 1)$  et au  $ddl$  du résidu noté  $\nu_2 = (N - \sum n_{X_i})$ .

Si  $F_{exp} > F_{theo}(\alpha, \nu_1, \nu_2)$ , alors le facteur en question est considéré significatif avec une confiance  $(1 - \alpha)$ . Son influence sur la réponse est importante pour la plage de variations considérée.

### 2.3.4 Synthèse

Après avoir présenté les plans d'expériences et les éléments permettant, par la suite, de guider l'analyse des résultats, nous allons à présent détailler la méthodologie permettant de nous guider pour la mise en œuvre des plans d'expériences.

En premier lieu, il faut définir le critère de qualité devant être mesuré et être capable de quantifier la réponse du système. Pour ce faire, il est possible de recourir à l'appréciation d'un ou plusieurs experts ou de définir une métrique applicable automatiquement. Le jugement d'un expert introduit nécessairement une part de subjectivité dans l'analyse, que l'on peut toutefois compenser en partie en réalisant plusieurs fois la même expérience et en moyennant les réponses obtenues.

Puis, il est nécessaire de recenser les variables que l'on suppose intervenir dans le processus étudié et de définir un modèle mathématique (modèle linéaire, quadratique, etc.). Une connaissance approfondie du phénomène étudié est donc nécessaire, afin de limiter le champ d'investigation et de définir les plages de variation couvertes par les différents facteurs.

Il est ensuite capital de fixer l'objectif du travail expérimental : s'agit-il de rechercher les facteurs influents ? d'étudier les interactions entre les différents facteurs ? d'optimiser un jeu de facteurs ? Comme nous l'avons déjà souligné, l'objectif à atteindre influence le choix du type de plan devant être mis en œuvre. Pour traiter un problème donné, il

est ainsi souvent nécessaire de recourir successivement à plusieurs plans d'expériences différents, chacun permettant de répondre à un objectif donné.

Compte tenu du nombre de facteurs étudiés, de leurs niveaux et du nombre d'expériences que l'on s'autorise, il est possible de déterminer le plan d'expériences à mettre en œuvre pour atteindre l'objectif fixé.

La réalisation des expériences consiste simplement à mesurer la réponse du système pour les différents jeux de paramètres prévus dans le plan d'expériences mis en place.

L'interprétation des résultats s'appuie, d'une part, sur le calcul des effets des facteurs et l'identification des paramètres du modèle, afin de déterminer un jeu de paramètres optimal et, d'autre part, sur l'analyse de variance, afin d'identifier les paramètres significatifs.

Une dernière étape consiste à valider le modèle identifié en réalisant un ensemble d'essais de confirmation dont les résultats seront comparés à ceux prédits par le modèle identifié.

## 2.4 Mise en œuvre des plans d'expériences dans le cadre des contours actifs

Nous avons appliqué la méthodologie des plans d'expériences au réglage des paramètres de « l'algorithme des contours actifs », dans le cadre de la construction du masque binaire intervenant dans le module de reconstruction tridimensionnelle.

La génération des matrices d'expériences et l'analyse de variance ont été réalisées en utilisant le logiciel NemrodW<sup>1</sup> [108]. Mais, comme nous l'avons déjà précisé, l'interprétation des résultats doit toujours se faire en regard des objectifs fixés.

### 2.4.1 Modélisation du processus de segmentation

#### Quantification automatique de la réponse

Nous définissons la qualité d'une segmentation comme étant la capacité à détecter les frontières de l'objet le plus précisément possible. La vitesse de segmentation n'entre donc pas en ligne de compte dans le cadre de nos évaluations.

Afin d'éviter la subjectivité d'un expert dans la notation des résultats de segmentation, nous avons opté pour un système automatique de notation et d'évaluation de la qualité de la segmentation. Ceci permet d'une part d'éliminer la variabilité naturelle de l'appréciation humaine, et d'autre part d'envisager l'exploitation du système de notation dans un cadre d'applications industrielles. La notation étant exempte de toute subjectivité, nous n'avons donc à effectuer qu'une seule expérience pour un jeu de paramètres donné.

La qualité de la segmentation est ainsi évaluée en comparant la position du contour généré avec la position d'un contour de référence correspondant aux frontières de l'objet devant être déterminé. Le critère ne doit pas nécessairement estimer une distance

---

<sup>1</sup>Un outil performant pour construire des stratégies expérimentales optimales, et pour analyser les résultats d'un plan d'expériences.



FIG. 2.4 – Contour de référence correspondant à une image de l'objet pale de turbine.

moyenne séparant les contours (délicate à exploiter), mais doit mettre en évidence les phénomènes d'arrêt prématuré de l'évolution du contour et de dépassement des frontières. Nous utilisons pour cela le rapport entre le nombre de points communs aux deux contours et le nombre total de points constituant le contour généré.

Le critère de qualité est calculé automatiquement, une fois la stabilisation du contour actif atteinte, et varie sur une plage de 0 à 1. Afin d'éviter une notation trop rigoureuse (la frontière de référence idéale étant rarement atteinte), nous avons choisi d'imposer au contour de référence une largeur de 3 pixels, centrée sur les frontières de l'objet. Un exemple en est donné figure 2.4.

### Recensement des facteurs

Les divers paramètres intervenant dans toute chaîne de traitement d'images portent sur les conditions d'acquisition, les algorithmes de traitement mis en œuvre, et enfin sur l'évaluation de la qualité des traitements (ici de segmentation).

Puisque nous cherchons à réaliser une segmentation optimale pour une famille d'images (analyse d'une séquence d'images du même objet acquises dans des conditions proches), en utilisant le système de notation décrit pour évaluer les résultats, seuls les paramètres liés à la procédure de segmentation par contours actifs sont à prendre en compte.

Comme nous l'avons présenté dans le chapitre précédent, nous pouvons ne pas tenir compte de certains paramètres :

- La largeur  $\delta$  de la bande étroite n'a d'influence que sur la vitesse de segmentation.
- La forme et la position des contours initiaux n'ont pas d'influence sur la précision de la segmentation, si l'on considère vérifiée l'hypothèse d'homogénéité du niveau de gris des régions à segmenter. Nous choisissons d'utiliser des ellipses comme contours initiaux.
- Le critère d'arrêt utilisé pour tester la stabilisation du contour actif porte uniquement sur sa géométrie (plus précisément sa longueur) et non sur sa position relative dans l'image.
- Le paramètre  $N_{iter}$  fixe le nombre d'itérations au sein de la bande étroite et n'a pas d'influence sur la précision de la segmentation. Il sera ajusté en fonction de la valeur prise par les autres paramètres.

Par conséquent, nous allons limiter l'étude aux 6 paramètres suivants :



- $\Delta t$ , pas temporel utilisé pour la discrétisation de l'équation d'évolution,
- $\lambda_k$ , facteur de pondération dépendant de la courbure,
- $\lambda_{CAG}$ , facteur de pondération propre aux contours actifs géodésiques,
- $a$ , force ballon,
- $\alpha$  et  $\beta$ , paramètres de la fonction d'attache aux données.

Pour chaque réglage de notre jeu de 6 paramètres,  $\delta$  et  $N_{iter}$  seront ajustés afin de satisfaire la contrainte  $\lambda_k \max(|k(\Psi)|) + a + 2\lambda_{CAG} \leq \frac{\delta}{N_{iter}\Delta t}$ .

Le domaine de variation autorisée pour chacun de ces facteurs a été déterminé à partir de l'ensemble des essais réalisés lors de la validation expérimentale de la méthode de segmentation par contours actifs (Tableau 1.3 du chapitre 1).

### Choix du modèle

Nous choisissons un modèle linéaire polynomial du premier degré, faisant apparaître (dans un premier temps) toutes les interactions d'ordre deux. Dans cette représentation, le chiffre en exposant indique les degrés de liberté (*ddl*) et le chiffre en indice le nombre de niveaux associés au facteur.

$$\begin{aligned}
 y = & m + a_{(2)}^1 + b_{(2)}^1 + c_{(2)}^1 + d_{(2)}^1 + e_{(2)}^1 + f_{(2)}^1 \\
 & + ab^1 + ac^1 + ad^1 + ae^1 + af^1 \\
 & + bc^1 + bd^1 + be^1 + bf^1 + cd^1 + ce^1 \\
 & + cf^1 + de^1 + df^1 + ef^1
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

### Objectifs des expériences

Nous cherchons à déterminer un jeu de paramètres optimal eu égard à la précision souhaitée pour la segmentation. Ce jeu doit être valide pour la famille d'images correspondant à la séquence d'images à acquérir (voir un exemple de séquence figure 2.5) en vue de la reconstruction tridimensionnelle complète de l'objet.

Compte tenu du nombre important de facteurs considérés, il apparaît nécessaire de réaliser différents plans d'expériences afin de déterminer successivement :

1. L'influence des interactions entre facteurs. Si certaines ne sont pas significatives, nous pourrions simplifier le modèle linéaire et recourir aux plans fractionnaires pour poursuivre l'étude.
2. Les facteurs les plus influents. Ces facteurs feront l'objet d'une analyse poussée afin d'optimiser leur valeur.
3. Le jeu de paramètres capable de fournir la meilleure réponse.

Nous réalisons l'ensemble des expériences avec une image représentative de la séquence, puis nous validons le jeu de paramètres sous-optimal obtenu en l'appliquant aux autres images de la série.

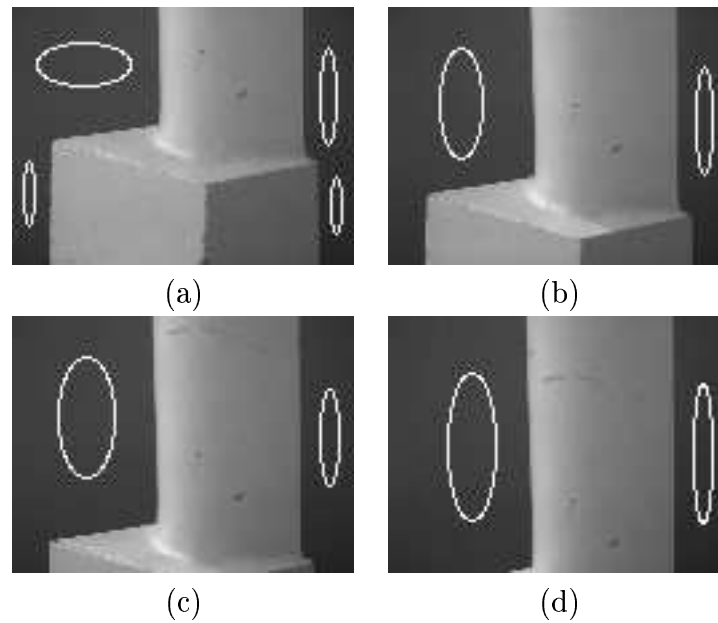


FIG. 2.5 – Images à niveaux de gris correspondant à une séquence représentative de 4 acquisitions. Les contours initiaux sont représentés en blanc.

### 2.4.2 Étude des interactions entre facteurs

Dans ce premier plan, il ne s'agit pas de trouver les meilleures valeurs pour les paramètres, ni même le jeu de paramètres optimal, mais d'étudier s'il existe effectivement des interactions non significatives entre les facteurs afin de simplifier le modèle le cas échéant.

#### Choix du plan d'expériences

Nous utilisons un plan factoriel complet  $2^6$  de 64 expériences. Les niveaux des facteurs correspondent aux valeurs extrêmes trouvées lors de la phase des essais-erreurs (cf. chapitre 1) et sont résumés dans le Tableau 2.5.

#### Calcul des effets et interprétation des résultats

Les expériences sont réalisées en mesurant la réponse du système pour chaque jeu de paramètres prévu par le plan. La matrice des effets moyens de chaque facteur et de chaque interaction indiquée dans le Tableau 2.6, est alors déterminée à partir des réponses obtenues.

Afin d'interpréter les résultats, nous avons effectué une analyse de variance ayant pour objectif de déterminer le degré d'influence des facteurs et des interactions.  $F_{theo}$  est obtenue en parcourant la table de Snedecor-Fisher, avec pour paramètres  $\nu_1 = 2 - 1$  et  $\nu_2 = 32 - 22$  et un seuil de risque de 5%. On obtient une force théorique  $F_{theo} = 4.96$  que l'on va comparer avec  $F_{exp}$ , calculée pour chaque facteur et interaction. Les résultats de cette analyse de variance sont présentés dans le Tableau 2.7.

TAB. 2.5 – Valeurs des niveaux 1 et 2 du plan  $2^6$  pour chaque facteur.

| Facteur                                   | Niveau 1 | Niveau 2 |
|---|----------|----------|
| a (courbure)                              | 0.3      | 0.9      |
| b (force ballon)                          | -3.2     | -0.2     |
| c (terme géodésique)                      | 0        | 0.42     |
| d (pas temporel)                          | 0.3      | 0.6      |
| e (fonction d'arrêt - point d'inflexion)  | 1        | 2        |
| f (fonction d'arrêt - pente de la courbe) | 1.10     | 1.55     |

TAB. 2.6 – Matrice des effets du plan  $2^6$  (facteurs et interactions).

|   | a           | b           | c           | d           | e           | f            |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 1 | -0.15       | <b>2.55</b> | <b>0.63</b> | <b>0.26</b> | -0.29       | <b>0.007</b> |
| 2 | <b>0.17</b> | -2.53       | -0.62       | -0.24       | <b>0.21</b> | 0.006        |

|   | ab    | ac    | ad    | ae    | af    | bc    | bd    | be    |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | -1.01 | 1.11  | 0.03  | 0.05  | 0.005 | -0.57 | -0.25 | -0.17 |
| 2 | 1.02  | -1.10 | -0.02 | -0.03 | 0.008 | 0.58  | 0.27  | 0.18  |

|   | bf    | cd    | ce     | cf    | de    | df    | ef    |
|---|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 0.007 | 0.001 | 0.01   | 0.005 | -0.21 | 0.007 | 0.005 |
| 2 | 0.006 | 0.01  | -0.001 | 0.008 | 0.22  | 0.006 | 0.008 |

## 2.4 Mise en œuvre des plans d'expériences dans le cadre des contours actifs

TAB. 2.7 – Analyse de variance du plan 2<sup>6</sup>.

| Facteur | <i>SCE</i> | <i>ddl</i> | <i>Var</i> | $F_{exp}$    | $F_{theo}$ à 95% | Significatif |
|---------|------------|------------|------------|--------------|------------------|--------------|
| a       | 0.82       | 1          | 0.82       | 0.17         | 4.96             | NON          |
| b       | 206.45     | 1          | 206.45     | <b>44.02</b> | 4.96             | OUI          |
| c       | 12.5       | 1          | 12.5       | 2.66         | 4.96             | NON          |
| d       | 2.00       | 1          | 2.00       | 0.42         | 4.96             | NON          |
| e       | 2.05       | 1          | 2.05       | 0.43         | 4.96             | NON          |
| f       | 0.00       | 1          | 0.00       | 0.01         | 4.96             | NON          |
| ab      | 16.48      | 1          | 16.48      | <b>3.51</b>  | 4.96             | NON          |
| ac      | 19.53      | 1          | 19.53      | <b>4.16</b>  | 4.96             | NON          |
| ad      | 0.01       | 1          | 0.01       | 0.00         | 4.96             | NON          |
| ae      | 0.02       | 1          | 0.02       | 0.00         | 4.96             | NON          |
| af      | 0.00       | 1          | 0.00       | 0.00         | 4.96             | NON          |
| bc      | 5.29       | 1          | 5.29       | 1.13         | 4.96             | NON          |
| bd      | 1.08       | 1          | 1.08       | 0.23         | 4.96             | NON          |
| be      | 0.49       | 1          | 0.49       | 0.10         | 4.96             | NON          |
| bf      | 0.00       | 1          | 0.00       | 0.00         | 4.96             | NON          |
| cd      | 0.00       | 1          | 0.00       | 0.00         | 4.96             | NON          |
| ce      | 0.00       | 1          | 0.00       | 0.00         | 4.96             | NON          |
| cf      | 0.00       | 1          | 0.00       | 0.00         | 4.96             | NON          |
| de      | 0.74       | 1          | 0.74       | 0.16         | 4.96             | NON          |
| df      | 0.001      | 1          | 0.001      | 0.00         | 4.96             | NON          |
| ef      | 0.00       | 1          | 0.00       | 0.00         | 4.96             | NON          |
| Résidus | 46.93      | 10         | 4.69       |              |                  |              |

### Synthèse

L'analyse de variance révèle une grande influence de la force ballon représentée par le facteur  $b$ , une influence évidente et attendue. Nous nous attendions toutefois aussi à une influence de certains autres paramètres, notamment la courbure.

En ce qui concerne les interactions, elles semblent, de manière générale, assez peu prononcées, c'est-à-dire qu'elle ne sont pas significatives. Nous avons observé que certaines interactions (en gras dans le Tableau 2.7), telles que « courbure-force ballon » et « courbure-terme géodésique », apparaissent comme étant assez significatives, par rapport aux autres interactions, si on compare leurs forces expérimentales respectives.

Le jeu de paramètres obtenu n'est pas optimal. Ceci est normal, car le but de ce premier plan est d'étudier l'influence des interactions afin de réduire le nombre de facteurs et de déterminer l'ensemble des paramètres influents. Ces observations nécessitent cependant d'être confirmées, ce qui nous conduit à mettre en œuvre un deuxième plan d'expériences.

Il est important de mentionner qu'un facteur est jugé influent si, lorsqu'il change de niveau, il modifie de façon significative la réponse du système. L'analyse de variance n'a donc de sens que pour la plage de variation étudiée.

### 2.4.3 Détermination des facteurs influents (ou significatifs)

Dans cette partie de l'étude, nous avons souhaité, d'une part, vérifier si les facteurs influents se limitent à ceux trouvés dans la première étude (plan  $2^6$ ) et, d'autre part, trouver un jeu de paramètres optimal conduisant à une qualité pour la segmentation la meilleure possible.

#### Détermination du plan

Nous prenons quatre niveaux par facteur, afin de couvrir une large plage de variations par facteur. Nous ne prenons pas en considération les interactions, car la première étude a établi qu'elles sont peu influentes, en général, sur la réponse du système. Le Tableau 2.8 regroupe les valeurs des niveaux par facteur.

Afin de limiter le nombre d'expériences, nous avons décidé de mettre en œuvre un plan fractionnaire pour lequel nous avons vérifié la propriété d'orthogonalité (le nombre d'expériences est supérieur ou égal au Plus Petit Commun Multiple (PPCM) du produit du nombre de niveaux de toutes les actions (facteurs ou interactions) disjointes prises deux à deux). Le plan fractionnaire  $L_{25}$ , en utilisant la notation de Taguchi, de 6 facteurs à 4 niveaux chacun contient ainsi 25 expériences.

Nous gardons le même système de notation que celui utilisé avec le premier plan. Nous réalisons ensuite les 25 expériences.

#### Calcul des effets

Le calcul des effets pour chaque facteur et pour chaque niveau est résumé dans le Tableau 2.9. L'analyse des effets conduit aux niveaux préconisés dans le Tableau 2.10 qui permettent d'obtenir la meilleure segmentation. La segmentation obtenue avec ces

## 2.4 Mise en œuvre des plans d'expériences dans le cadre des contours actifs

TAB. 2.8 – Valeurs des quatre niveaux de chaque paramètre du plan  $L_{25}$ .

| Facteur | Niveau 1 | Niveau 2 | Niveau 3 | Niveau 4 |
|---------|----------|----------|----------|----------|
| a       | 0.3      | 0.5      | 0.7      | 0.9      |
| b       | -3.2     | -2.2     | -1.2     | -0.2     |
| c       | 0        | 0.14     | 0.28     | 0.42     |
| d       | 0.3      | 0.4      | 0.5      | 0.6      |
| e       | 1        | 1.5      | 2        | 2.5      |
| f       | 1.1      | 1.25     | 1.4      | 1.55     |

TAB. 2.9 – Effets des différents paramètres pour chaque niveau du plan  $L_{25}$ .

|   | a           | b           | c           | d           | e           | f           |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | -0.3        | <b>1.65</b> | 0.16        | <b>0.65</b> | -0.67       | -0.57       |
| 2 | 0.17        | 1.25        | <b>0.48</b> | 0.00        | 0.39        | 0.46        |
| 3 | <b>0.57</b> | -0.04       | 0.19        | -0.80       | 0.08        | 0.10        |
| 4 | -0.12       | -4.49       | -0.96       | -0.45       | <b>0.89</b> | <b>0.60</b> |

réglages est satisfaisante, mais elle n'est pas optimale. Cela s'explique par le fait que les plans d'expériences donnent un jeu de paramètres qui correspond à une bonne expérience, parmi d'autres, mais pas forcément la meilleure. Cependant, si l'on veut obtenir un jeu de paramètres optimal, il faut choisir une nouvelle et « bonne » matrice d'expériences. C'est l'objet de l'étude de la section 2.4.4.

### Analyse de variance

Enfin, nous avons effectué une analyse de variance, avec une table de Snedecor-Fisher ayant pour paramètres  $\nu_1 = 3$  et  $\nu_2 = 6$  avec un seuil de risque  $\alpha$  de 5%. On obtient  $F_{theo} = 4.76$ . Le Tableau 2.11 résume cette analyse de variance.

TAB. 2.10 – Niveaux préconisés après analyse des effets du plan  $L_{25}$ .

|                         | a   | b    | c    | d   | e   | f    |
|-------------------------|-----|------|------|-----|-----|------|
| Niveaux préconisés      | 3   | 1    | 2    | 1   | 4   | 4    |
| Valeurs correspondantes | 0.7 | -3.2 | 0.14 | 0.3 | 2.5 | 1.55 |

TAB. 2.11 – Analyse de variance du plan  $L_{25}$ .

| Facteurs | $SCE$  | $ddl$ | $VAR$ | $F_{exp}$    | $F_{theo}$ | Significatif |
|----------|--------|-------|-------|--------------|------------|--------------|
| a        | 2.86   | 3     | 0.95  | 0.61         | 4.76       | NON          |
| b        | 152.79 | 3     | 50.93 | <b>32.85</b> | 4.76       | OUI          |
| c        | 7.58   | 3     | 2.52  | 1.62         | 4.76       | NON          |
| d        | 7.90   | 3     | 2.63  | 1.69         | 4.76       | NON          |
| e        | 8.75   | 3     | 2.91  | 1.87         | 4.76       | NON          |
| f        | 5.66   | 3     | 1.88  | 1.21         | 4.76       | NON          |
| Résidus  | 9.32   |       |       |              |            |              |

## Synthèse

D'après les résultats obtenus par l'analyse de variance, on relève une grande influence du facteur  $b$  représentant la force ballon, un résultat qui vient confirmer celui obtenu par le premier plan. La force ballon est donc assez significative. La courbure, le terme géodésique, le pas temporel et les deux termes de la fonction d'attache aux données n'apparaissent que peu influents sur la sortie du système; ce qui confirme, ici aussi, les résultats du premier plan, en accord avec notre intuition.

Le passage à un troisième plan, avec de bons choix pour la matrice d'expériences et les niveaux par facteur, sur des plages réduites, s'avère indispensable si l'on cherche à optimiser le jeu de paramètres.

### 2.4.4 Optimisation du jeu de paramètres

#### Choix de la « bonne » matrice d'expériences

Le choix du plan d'expériences est primordial pour déterminer un jeu de paramètres optimal. Ce choix dépend, en fait, de l'information recherchée, de la nature et du nombre de facteurs étudiés. Pour une étude quantitative des réponses, le choix de la matrice d'expériences varie selon la nature du modèle étudié, qui peut être soit du premier degré, soit du deuxième degré. Si le modèle est du premier degré, les matrices factorielles conviennent, ainsi que les matrices d'Hadamard qui elles donnent des matrices optimales. Par contre, pour les modèles du deuxième degré, les matrices de Doehlert, composite centrée, hybride, de Box-Benkhen, équiradiale et « à la carte » conduisent à une bonne optimisation du jeu de paramètres. L'approche par surfaces de réponse, en utilisant les matrices d'expériences de Doehlert [162], présente une alternative intéressante (calcul de surfaces à partir desquelles on tire un jeu optimal).

Nous avons retenu un modèle du premier degré, et nous avons choisi d'utiliser une matrice factorielle (de construction aisée), afin d'optimiser le jeu de paramètres obtenu par le deuxième plan d'expériences. L'exploitation successive des plans (trois au total dans notre cas), avec des niveaux de plus en plus proches du jeu de paramètres trouvé

## 2.4 Mise en œuvre des plans d'expériences dans le cadre des contours actifs

TAB. 2.12 – Niveaux par facteur du plan  $L_{16}$ .

| Facteur | Niveau 1 | Niveau 2 | Niveau 3 |
|---------|----------|----------|----------|
| a       | 0.7      | 0.8      | 0.9      |
| b       | -3.2     | -3.0     | -2.8     |
| c       | 0        | 0.14     | 0.28     |
| d       | 0.3      | 0.4      | 0.5      |
| e       | 1.5      | 2.0      | 2.5      |
| f       | 1.25     | 1.40     | 1.55     |

TAB. 2.13 – Effets des différents paramètres du plan  $L_{16}$ .

| Facteur | a           | b           | c          | d           | e           | f           |
|---------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 1       | -0.1        | -0.19       | 0.1        | 0.7         | 0.03        | -0.44       |
| 2       | <b>0.41</b> | <b>0.17</b> | -0.69      | <b>0.88</b> | <b>0.54</b> | <b>0.53</b> |
| 3       | 0.7         | -0.13       | <b>1.3</b> | -2.43       | -1.09       | -0.58       |

avec le plan précédent, devrait conduire à une solution optimale.

Dans cette analyse, nous prenons trois niveaux par facteur, en choisissant des valeurs autour du jeu de paramètres du plan précédent (c'est-à-dire du plan  $L_{25}$ ).

### Choix des niveaux

Après avoir vérifié la propriété d'orthogonalité, nous avons choisi un plan fractionnaire  $L_{16}$  de 6 facteurs à 3 niveaux chacun, soit un total de 16 expériences (voir Tableau 2.12).

### Calcul des effets

Les résultats obtenus avec ces réglages, sur l'image de la pale de turbine (voir figure 2.6(a)), montrent que le masque obtenu est de bonne qualité. Le jeu de paramètres correspondant est sous-optimal (ce que traduit une réponse du système de  $y = 9.03$ , sur une échelle de 10). Avec une plage des niveaux des facteurs assez étroite autour d'un jeu de paramètres sous-optimal, il ne faut pas espérer observer une grande influence des facteurs, pour la simple raison que, si l'on fait varier un facteur avec des niveaux proches, il sera systématiquement jugé non influent (même s'il était influent dans les 1<sup>er</sup> et 2<sup>eme</sup> plans compte tenu des plages de variation des niveaux choisies). L'analyse des effets est présentée dans le Tableau 2.13. Les niveaux préconisés correspondants sont présentés dans le Tableau 2.14.



TAB. 2.14 – Niveaux préconisés du plan  $L_{16}$ .

|                         |     |      |      |     |     |      |
|-------------------------|-----|------|------|-----|-----|------|
|                         | a   | b    | c    | d   | e   | f    |
| Niveaux                 | 2   | 2    | 3    | 2   | 2   | 2    |
| Valeurs correspondantes | 0.8 | -3.0 | 0.28 | 0.4 | 2.0 | 1.40 |

TAB. 2.15 – Analyse de variance du plan  $L_{16}$ .

| Facteurs | $SCE$ | $ddl$ | $VAR$ | $F_{exp}$    | $F_{theo}$ | Significatif |
|----------|-------|-------|-------|--------------|------------|--------------|
| a        | 3.56  | 2     | 1.82  | 1.8          | 9.55       | NON          |
| b        | 0.43  | 2     | 0.21  | 0.2          | 9.55       | NON          |
| c        | 11.6  | 2     | 5.8   | 5.74         | 9.55       | NON          |
| d        | 38.23 | 2     | 19.11 | <b>18.92</b> | 9.55       | OUI          |
| e        | 7.89  | 2     | 3.94  | 3.9          | 9.55       | NON          |
| f        | 4.32  | 2     | 2.16  | 2.13         | 9.55       | NON          |
| Résidus  | 3.05  | 3     | 1.01  |              |            |              |

### Analyse de variance

Comme pour chaque plan, une analyse de variance est nécessaire afin d'étudier l'influence des différents facteurs sur la sortie du système. Normalement, nous ne devrions pas observer une influence plus importante du facteur « force ballon », car ses niveaux ont été choisis trop proches les uns des autres. La réponse du système à ce facteur ne va donc pas comporter de changements significatifs.

Nous avons effectué une analyse de variance avec une force théorique  $F_{theo} = 9.55$  (en prenant  $\nu_1 = 1$ ,  $\nu_2 = 3$ , et un taux  $\alpha$  de 5%). Tous les résultats obtenus par cette analyse sont présentés dans le Tableau 2.15.

### Synthèse

Les résultats confirment effectivement la faible influence prédite de la force ballon. Ils viennent aussi confirmer notre interprétation concernant le choix des niveaux par facteur (si on choisit des niveaux trop proches, le facteur devient peu influent et donc peu significatif). Les autres facteurs sont toujours peu influents sur la sortie du système, à l'exception du facteur  $d$  qui représente le pas temporel et qui devient significatif. Ce paramètre apparaît ici comme significatif, mais nous rappelons que les résultats d'un plan dépendent toujours de l'objectif qui lui a été fixé. Ainsi, ce troisième plan a été conçu afin de déterminer un jeu de paramètres optimal, et non pas pour étudier l'influence des facteurs. Nous considérons ce plan comme une réussite, car il a conduit à un jeu de paramètres sous-optimal, ainsi qu'à une confirmation de nos hypothèses concernant

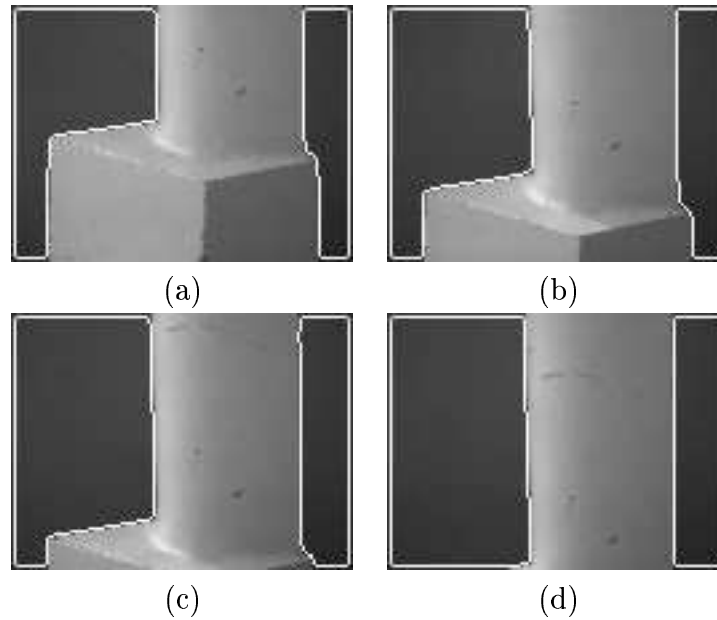


FIG. 2.6 – Application du jeu de paramètres sous-optimal obtenu à la séquence d'images présentée figure 2.5. Amélioration de la segmentation.

l'importance du choix des niveaux par facteur. Le Tableau 2.16 donne les valeurs de ce jeu de paramètres sous-optimal. La figure 2.6 illustre l'amélioration apportée par l'utilisation de ce jeu à la qualité du résultat de la segmentation.

### 2.4.5 Essais de confirmation

Il s'agit dans cette dernière étude d'un complément d'essais que nous avons voulu faire afin de confirmer, d'une part, la justesse du modèle étudié, nos hypothèses sur les facteurs et, d'autre part, tous les résultats obtenus avec les plans déjà présentés. Par ailleurs, dans une étude par plan d'expériences, les essais de confirmation représentent une étape indispensable dans la stratégie expérimentale globale. Nous cherchons aussi à étudier l'influence des facteurs et des interactions, autour d'un jeu de paramètres sous-optimal, afin de vérifier que les résultats en terme d'influence des paramètres ne vont pas être modifiés. Une hypothèse qui *a priori* a une forte probabilité d'être vérifiée. Mais nous n'avons aucun moyen de confirmer *a priori* cette hypothèse. C'est pour ces raisons qu'il est nécessaire de réaliser cette étude de confirmation en prenant en compte, et les facteurs, et leurs interactions.

#### Choix du modèle et niveaux

**Modèle avec interaction** Nous prenons en compte tous les facteurs du modèle, ainsi que toutes les interactions possibles, ce qui nous donne un plan de 32 expériences avec 21 facteurs et interactions. Une analyse de variance est réalisée autour d'une force théorique  $F_{theo} = 4.96$ , avec  $\nu_1 = 1$ ,  $\nu_2 = 10$  et un seuil de risque de 5%. Le Tableau 2.17 récapitule

TAB. 2.16 – Jeu de paramètres sous-optimal du plan  $L_{16}$ .

| Paramètre                                | Valeur |
|--|--------|
| Nombre d'itérations $N_{iter}$           | 2      |
| Terme de courbure $\lambda_k$            | 0.8    |
| Terme géodésique $\lambda_{CAG}$         | 0.28   |
| Force ballon $a$                         | -3     |
| Demi largeur de la NB $\delta$           | 4      |
| Pas temporel $\Delta t$                  | 0.4    |
| Point d'inflexion $\alpha (g(\nabla I))$ | 55.2   |
| Pente de la courbe $\beta (g(\nabla I))$ | 1.40   |

TAB. 2.17 – Valeurs des niveaux du plan  $2^6$ .

| Facteur | Niveau 1 | Niveau 2 |
|---------|----------|----------|
| a       | 0.6      | 0.8      |
| b       | -3.2     | -3.0     |
| c       | 0.14     | 0.28     |
| d       | 0.3      | 0.4      |
| e       | 2        | 2.5      |
| f       | 1.4      | 1.55     |

les niveaux choisis par facteur pour ce plan.

### Analyse des effets

Le Tableau 2.18 indique les niveaux préconisés après analyse des effets. Le résultat obtenu avec ce réglage est satisfaisant, même si le jeu de paramètres est sous-optimal. Rappelons que ce n'est pas le but de cette expérience, le jeu sous-optimal ayant déjà été obtenu dans le plan précédent. L'objectif, ici, est de voir si les interactions deviennent significatives si l'on choisit les niveaux autour d'un jeu de paramètres sous-optimal. L'analyse de variance (voir Tableau 2.19) effectuée autour du jeu de paramètres sous-optimal nous confirme, qu'en ce qui concerne les interactions, elles sont assez peu prononcées, ce qui confirme les résultats trouvés précédemment.

Nous considérons que ce plan a satisfait aux objectifs fixés. En effet, il nous a apporté la confirmation de la non influence des interactions entre facteurs.

**Essai sans interactions** Nous ne nous sommes pas arrêté à ce stade et nous avons exécuté un autre plan à six facteurs à trois niveaux (plan  $L_{16}$ ). Avec ce plan, nous

## 2.4 Mise en œuvre des plans d'expériences dans le cadre des contours actifs

TAB. 2.18 – Niveaux préconisés du plan 2<sup>6</sup>.

|                         | a   | b    | c    | d          | e | f    |
|-------------------------|-----|------|------|------------|---|------|
| Niveaux                 | 1   | 2    | 2    | 1 ou 2     | 1 | 2    |
| Valeurs correspondantes | 0.6 | -3.0 | 0.28 | 0.3 ou 0.4 | 2 | 1.55 |

TAB. 2.19 – Analyse de variance du plan 2<sup>6</sup>.

| Facteur | <i>SCE</i> | <i>ddl</i> | <i>VAR</i> | <i>F<sub>exp</sub></i> | <i>F<sub>theo</sub></i> | Significatif |
|---------|------------|------------|------------|------------------------|-------------------------|--------------|
| a       | 1.03       | 1          | 1.03       | 0.32                   | 4.96                    | NON          |
| b       | 13.1       | 1          | 13.1       | 4.13                   | 4.96                    | NON          |
| ab      | 0.57       | 1          | 0.57       | 0.17                   | 4.96                    | NON          |
| c       | 24.22      | 1          | 24.22      | 7.64                   | 4.96                    | OUI          |
| ac      | 8.76       | 1          | 8.76       | 2.76                   | 4.96                    | NON          |
| bc      | 10.24      | 1          | 10.24      | 3.23                   | 4.96                    | NON          |
| d       | 0.00       | 1          | 0.00       | 0                      | 4.96                    | NON          |
| ad      | 0.64       | 1          | 0.64       | 0.20                   | 4.96                    | NON          |
| bd      | 0.57       | 1          | 0.57       | 0.17                   | 4.96                    | NON          |
| cd      | 0.70       | 1          | 0.70       | 0.22                   | 4.96                    | NON          |
| e       | 0.81       | 1          | 0.81       | 0.25                   | 4.96                    | NON          |
| ae      | 2.19       | 1          | 2.19       | 0.69                   | 4.96                    | NON          |
| be      | 2.07       | 1          | 2.07       | 0.65                   | 4.96                    | NON          |
| ce      | 2.56       | 1          | 2.56       | 0.80                   | 4.96                    | NON          |
| de      | 1.84       | 1          | 1.84       | 0.58                   | 4.96                    | NON          |
| f       | 0.00       | 1          | 0.00       | 0.00                   | 4.96                    | NON          |
| af      | 0.00       | 1          | 0.00       | 0                      | 4.96                    | NON          |
| bf      | 0.00       | 1          | 0.00       | 0.00                   | 4.96                    | NON          |
| cf      | 0.00       | 1          | 0.00       | 0.00                   | 4.96                    | NON          |
| df      | 0.00       | 1          | 0.00       | 0.00                   | 4.96                    | NON          |
| ef      | 0.00       | 1          | 0.00       | 0.00                   | 4.96                    | NON          |
| Résidus | 31.7       | 10         | 3.17       |                        |                         |              |

TAB. 2.20 – Analyse de variance du plan  $L_{16}$ .

| Facteur | $SCE$ | $ddl$ | $VAR$ | $F_{exp}$ | $F_{theo}$ | Significatif |
|---------|-------|-------|-------|-----------|------------|--------------|
| a       | 7.5   | 2     | 3.75  | 1.18      | 9.55       | NON          |
| b       | 2.37  | 2     | 1.18  | 0.37      | 9.55       | NON          |
| c       | 46.62 | 2     | 23.31 | 7.37      | 9.55       | NON          |
| d       | 36.34 | 2     | 18.17 | 5.75      | 9.55       | NON          |
| e       | 1.96  | 2     | 0.98  | 0.31      | 9.55       | NON          |
| f       | 10.58 | 2     | 5.29  | 1.67      | 9.55       | NON          |
| Résidus | 9.49  | 3     | 3.16  |           |            |              |

voulons simplement vérifier les observations faites au travers des différents plans déjà réalisés, en accord avec ce que dicte l'utilisation des plans d'expériences. Si on utilise un plan d'expériences, on trouve un jeu de paramètres sous-optimal parmi les jeux testés, mais qui n'est pas forcément le plus optimal. Pour arriver à un réglage optimal, il est nécessaire de définir un plan dont les niveaux par facteur sont très proches les uns des autres. De cette manière, on est assuré d'obtenir un jeu de paramètres presque optimal (ou sous-optimal).

Les niveaux du plan  $L_{16}$  ont été choisis autour du jeu de paramètres sous-optimal. On ne devrait observer aucun facteur significatif, les niveaux étant trop proches les uns des autres. Il est aussi évident qu'une faible variation des facteurs ne va pas modifier de façon significative la réponse du système.

L'analyse de variance est présentée dans le Tableau 2.20. Les résultats obtenus montrent clairement qu'aucun facteur n'est significatif.

## 2.5 Conclusion

Nous avons montré l'intérêt lié à l'utilisation des plans d'expériences dans le domaine du traitement d'images, et plus particulièrement dans le cadre du réglage des paramètres d'une procédure complexe telle que la segmentation par contours actifs par ensembles de niveaux. L'objectif principal était d'améliorer la qualité de la segmentation en étudiant la totalité des facteurs impliqués avec un minimum d'expériences. L'objectif secondaire était d'obtenir une connaissance plus fine de l'influence des paramètres. Cette information, délicate à obtenir par l'intermédiaire d'autres méthodes d'analyse, trouvera toute son utilité dans la phase de reconstruction partielle de l'objet que nous étudierons dans le chapitre suivant. En effet, lors de cette étape, la procédure de segmentation est effectuée en prenant en compte le jeu de paramètres sous-optimal résultant des conditions réelles ou supposées d'acquisition. Or, ces conditions sont susceptibles de fluctuer lors de l'analyse en ligne de l'objet et donc de rendre la procédure de segmentation plus aléatoire. Notre connaissance des paramètres influents de cette procédure permettra dans ce cas de fixer une plage autorisée de variations pour chaque facteur et, donc, dans une certaine mesure, de mettre en place un mécanisme de correction automatique.

L'interprétation des résultats obtenus et les conclusions qui en sont tirées quant au comportement des contours actifs ne sont bien sûr valables que pour le type d'images effectivement analysé par les plans d'expérience. Nous avons pu toutefois constater que les jeux de paramètres déterminés par cette méthode étaient valides pour toute une famille d'images présentant sensiblement les mêmes caractéristiques. Il reste malgré tout souhaitable de réaliser pour chaque nouvelle famille d'images l'ensemble des opérations présentées.

Par ailleurs, cette méthode par plans d'expérience présente l'intérêt majeur de pouvoir être mise en œuvre hors ligne de façon systématique avec les séquences d'images utilisées pour planifier les traitements. En effet, l'ordre des expériences à mener est toujours le même : étudier les interactions, identifier les facteurs influents, puis déterminer un jeu de paramètres optimal. Le nombre de facteurs est figé, par exemple à 6 paramètres pour les contours actifs. Il en résulte que seul un ensemble réduit de plans complets et fractionnaires est susceptible d'être utilisé. Les plans d'expériences et les matrices d'effet correspondantes étant répertoriés au sein de tables, il est aisé d'envisager l'automatisation partielle du processus. La réalisation de l'ensemble des expériences et la notation de la réponse du système sont automatiques. L'interprétation des résultats par l'analyse de variance peut aussi dans une certaine mesure être automatisée. L'opérateur chargé des expériences n'intervient donc que pendant la définition du contour de référence propre à chaque type d'images étudié, et pendant la validation du jeu de paramètres sous-optimal. Ces deux tâches ne demandent aucune expertise dans le domaine des plans d'expériences et ne nécessitent qu'une connaissance limitée en traitement d'images.



# Chapitre 3

## Contrôle de l'acquisition et de la reconstruction 3D partielle

### 3.1 Introduction

Le développement d'un système complet d'inspection et de contrôle qualité nécessite de coordonner un ensemble de processus complexes permettant l'acquisition des données, leur évaluation dimensionnelle ainsi que leur comparaison avec un modèle de référence. Le système, à l'aide d'un premier module de gestion, doit ainsi être capable de contrôler en ligne le ou les capteurs (stéréoscopique, lumière structurée, lumière polarisée, etc.) afin de réaliser toutes les opérations d'acquisition et de reconstruction 3D partielle planifiées. Il repose également sur une synthèse des connaissances *a priori* liées au modèle de l'objet ainsi qu'au système d'acquisition, élaborée hors ligne, et alimentant en paramètres nécessaires aux traitements un second dispositif en charge du contrôle du capteur et de l'évaluation des images. Le système de planification doit donc faire coopérer ces deux modules distincts. Nous allons présenter dans ce chapitre le module en charge du contrôle du capteur (dans notre cas, il s'agit d'une tête de mesure faisant appel à la lumière structurée). Nous présenterons dans le chapitre 4 le deuxième module prenant en charge la planification de la reconstruction 3D complète et l'évaluation dimensionnelle.

Le module de contrôle de la tête de mesure doit être capable de gérer automatiquement l'enchaînement des procédures d'acquisition des images, de traitement des données images et de reconstruction partielle 3D, en fonction d'un ensemble de paramètres fixés *a priori* (hors ligne). Puisqu'il s'agit de contrôler en ligne la tête de mesure, le module doit adapter dynamiquement son comportement aux conditions réelles de prise de vue et donc modifier, si nécessaire et automatiquement, les paramètres d'acquisition, de traitement des données, voire l'enchaînement même des opérations. Il est par conséquent nécessaire de définir une modélisation comportementale de la tête de mesure.

Quelques systèmes de planification utilisables pour ce contrôle sont présentés dans la section 2. La représentation comportementale du capteur, modélisé comme un agent en utilisant le formalisme des graphes de situations, est détaillée dans la section 4, après avoir présenté dans la section 3 ce formalisme, bien adapté au contrôle de la tête de mesure « lumière structurée ». Une conclusion ainsi que des perspectives liées à cette



partie du travail sont données dans la section 5.

## 3.2 Systèmes de planification applicables au contrôle des têtes de mesures

Nous présentons dans cette section quelques travaux liés à la planification et à la modélisation comportementale. Il s'agit, d'une part, des approches reposant sur les réseaux de tâches hiérarchiques utilisés pour la planification et, d'autre part, des approches reposant sur les graphes de situations. Une synthèse, ainsi qu'une analyse justifiant le choix de l'approche adoptée pour notre système de planification, en vue d'une reconstruction/évaluation 3D d'objets, sont présentées à la fin de cette section.

### 3.2.1 Réseaux de Tâches Hiérarchiques (HTN)

Traditionnellement, le problème de la planification est posé sous la forme d'une recherche d'une séquence d'actions exécutables par un agent ; c'est-à-dire une séquence d'actions qui peuvent faire transiter un agent d'un état initial vers un état souhaité, en donnant uniquement une description des actions à exécuter dans l'espace de travail. Mali *et al.* [99] étudient dans leurs travaux les planificateurs, reposant sur des « réseaux de tâches hiérarchiques » (Hiérarchical Task Network (HTN)), comme un sur-ensemble des systèmes de planification orientés « action », dans lesquelles les tâches abstraites et leurs schémas de réduction associés fournissent, d'une manière implicite, la solution désirée. Mali *et al.* [99] définissent les schémas de réduction par le biais de chemins constitués par des tâches non primitives dans les réseaux de tâches. Mali *et al.* [99] montrent que le fait de convertir des actions non primitives, en utilisant les schémas de réduction d'actions (voir figure 3.1 pour une illustration), en actions primitives ou non, constitue une excellente démarche pour capturer l'expertise humaine. Le mécanisme peut aussi être employé pour la planification d'un contrôle. Les planifications utilisant cette technique de réduction de schémas sont connues sous le nom de HTN [134, 159, 39]. Deux types de tâches composent les HTNs : les tâches primitives et/ou les tâches composées (ou non primitives). Les tâches primitives sont accomplies en exécutant simplement une action associée, tandis que les tâches composées sont définies à l'aide d'un ou plusieurs réseaux de tâches. Ces réseaux sont semblables à des graphes dont les noeuds sont les tâches, et les liens les relations de succession entre ces tâches. Ces liens décrivent naturellement l'ordre dans lequel les tâches doivent être exécutées. Si le réseau de tâches comprend uniquement des tâches primitives, il est appelé « réseau de tâche primitives ». Les HTNs ont été utilisés dans plusieurs applications, par exemple pour la construction de plates-formes spatiales, pour des opérations de planification militaire, et pour l'analyse multi-images.

Les schémas de réduction sont utilisés pour la planification d'un contrôle de deux manières : descendante (top-down) ou ascendante (bottom-up). Dans la version « top-down », qu'on trouve souvent implémentée dans les formalismes HTNs, la planification commence par des tâches non primitives. Les schémas de réduction sont utilisés pour réduire ces tâches en actions « concrètes » (tenant compte des interactions). En sens inverse (c'est-à-dire du bas vers le haut), les solutions « partielles » générées par un plan

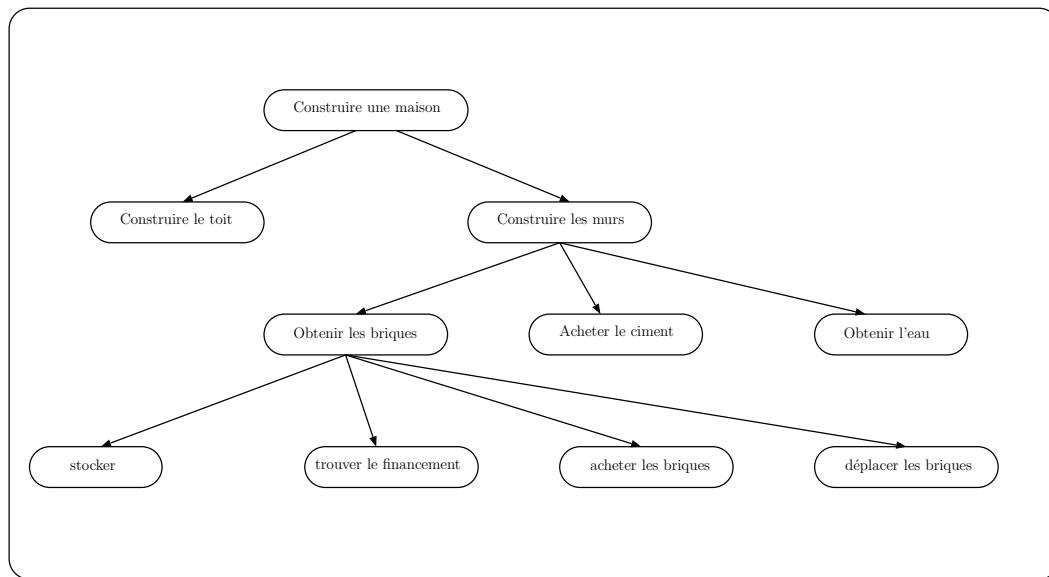


FIG. 3.1 – Plan de Tâches Hiérarchiques pour la construction d'une maison (figure extraite de Amol - 98 [99]).

orienté action sont analysées, d'une manière incrémentale, en introduisant des schémas de réduction.

Arens *et al.* [4] ont montré qu'une planification basée sur les HTNs est beaucoup plus adaptée à la planification, que celle basée sur un formalisme de planification de type *STRIPS* [45]. Cette performance s'explique, sans doute, par le fait que l'utilisateur peut gérer la recherche de plans en définissant les parcours en partant de tâches composées (décrites comme réseaux de tâches); ce qui limite l'espace de recherche. Cependant, ces approches restent fortement dépendantes du réseau de tâches de base, ce qui leur laisse peu de capacité d'adaptation face à certaines erreurs de planification.

### 3.2.2 Graphes de Situations (SGT)

Les graphes de situations (Situation Graph Trees (SGT)) constituent un formalisme de représentation comportementale développé pour la vision cognitive. Ils se présentent sous la forme de graphes décrivant, par une représentation schématique, l'ensemble des comportements possibles d'un agent dans un système donné. L'exploitation première des SGTs a été de construire automatiquement une description textuelle du contenu d'une séquence vidéo ou d'en créer une à partir d'une description textuelle (problème inverse) [4, 5]. Les connaissances décrivant le comportement d'un agent sont modélisées dans le SGT : chaque schéma de situation constitue un élément du graphe et correspond à un comportement particulier de l'agent. L'ensemble des situations dans lesquelles l'agent est susceptible de se trouver est ainsi décrit par une collection de schémas de situation connectés en graphes de situations [5]. Le passage d'une situation à une autre est déterminé à partir de l'analyse du contenu de l'image courante de la séquence vidéo

par un traitement d'images conduisant à fixer la valeur de prédicats élémentaires (par exemple, les coordonnées de l'agent « véhicule » dans la scène sont  $(x_1, y_1)$ ) pour évaluer des prédicats plus complexes (par exemple, « l'agent traverse la ligne médiane »).

Gonzales *et al.* [58] ont développé un système générique d'évaluation du comportement d'une personne (Human Sequence Evaluation (HSE)) en adaptant leur modèle d'action au formalisme des SGTs. Ils analysent le contenu d'une séquence vidéo afin de suivre une personne et de décrire son comportement dans une scène (ils disposent pour cela du modèle de l'agent « une personne » ainsi que de celui de la scène dans laquelle l'agent se déplace). Le système transforme les données images en primitives géométriques et génère la description conceptuelle correspondante (interprétation du comportement de l'agent sous la forme d'une séquence d'images de synthèse) et inversement. Les auteurs décrivent leur système HSE [59] comme un schéma modulaire, où chaque module est spécifique à un type de tâches.

### 3.2.3 Choix d'une « stratégie »

Les HTNs sont basés sur un formalisme adapté à l'élaboration et à l'exécution d'une séquence particulière de tâches. Par contre, une fois la séquence définie, l'enchaînement des actions ne peut plus être modifié. Les capacités d'adaptation d'un système reposant sur les HTNs sont donc limitées. Le formalisme des SGTs est quant à lui adapté à une représentation comportementale : il synthétise l'ensemble des situations dans lesquelles un agent peut se trouver, et c'est l'observation de l'agent qui détermine la séquence de situations effectivement instanciées. L'élaboration d'un graphe de situations (c'est-à-dire la détermination des schémas et des liens existants entre situations) n'est pas fixée par le formalisme.

La comparaison de ces représentations (cf. Tableau 3.1) permet de dégager plusieurs caractéristiques :

- la commande temporelle des tâches dans les HTNs est une relation d'ordre, alors que la relation de prédiction définie pour les SGTs est plus générale,
- puisque l'ordre temporel est strict entre les différentes tâches, les HTNs n'autorisent pas de cycles dans leur structure, contrairement aux SGTs. Les cycles et les liens d'auto-prédiction des SGTs peuvent toutefois être modélisés par des HTNs spécifiques [4],
- dans les HTNs, les effets des tâches peuvent se cumuler ou s'annuler. En revanche, dans les SGTs, les effets des actions ne se combinent pas explicitement.

Si l'on admet une analogie entre les schémas de situation d'un SGT et les tâches et schémas de réduction d'un HTN, on peut dire qu'un HTN est similaire à une instanciation particulière d'un SGT. De même, un SGT est assimilable à tous les HTNs qui peuvent être construits à partir de ses schémas de situation.

Arens et Nagel [4] proposent de combiner les deux formalismes dans une approche « hybride », afin de bénéficier des avantages de chaque approche, à savoir la capacité d'observation des SGTs et la possibilité de planification des HTNs. Plus précisément, on peut exprimer la connaissance comportementale représentée par un SGT dans le

### 3.3 Représentation comportementale à l'aide de SGTs

---

TAB. 3.1 – Correspondances entre les approches HTN et SGT.

| HTNs            | SGTs            |
|-----------------|-----------------|
| précondition    | schéma d'état   |
| tâche primitive | schéma d'action |
| décomposition   | spécialisation  |
| ordre temporel  | prédiction      |
| effet d'action  | -               |
| -               | cycles          |

formalisme propre aux HTNs.

#### Pourquoi les SGTs ?

Le module assurant le contrôle de la tête de mesure doit être capable de gérer automatiquement l'ensemble des procédures de la chaîne de traitement et, notamment, de prendre en compte les conditions réelles d'acquisition et les résultats fournis par les différentes procédures. Il peut donc être amené à modifier, au cours de l'évolution de l'application, le comportement de la tête de mesure, pour, par exemple, ajuster des paramètres fixés *a priori*, changer le point de vue de la caméra, ou modifier les conditions d'illumination.

Dans ce cadre, la modélisation par les graphes de situations présente l'intérêt majeur de pouvoir mettre en place des cycles permettant de répéter certaines séquences d'opérations si nécessaire (ajustement de paramètres par exemple). Bien que le formalisme ne guide pas la conception d'un SGT, il est aisé de modifier un graphe existant (ajout de situations) et de l'enrichir par le biais de spécialisations.

Un ensemble d'outils permettant le développement et l'exécution de graphes de situations sont mis à disposition par leurs auteurs [140, 167]. Nous pouvons citer le logiciel de conception de graphes « SGTEditor », ainsi que le moteur d'inférence « F-limette » permettant le parcours d'un SGT. Il faut toutefois rappeler que ces outils ont été développés pour des applications portant sur la description du comportement d'un agent à partir de l'analyse d'un flux vidéo ; c'est-à-dire des applications générant une simple description. Une adaptation de ces outils à notre problème, qui implique d'agir dans la scène, s'avère donc nécessaire (voir la section 3.4.4 pour l'implémentation logicielle).

### 3.3 Représentation comportementale à l'aide de SGTs

Nous allons analyser la représentation comportementale d'un agent en utilisant les graphes de situations. Dans notre cas, l'agent est une tête de mesure (lumière structurée, stéréoscopique, lumière polarisée). Nous indiquons dans la suite quels sont les constituants de base d'un graphe, comment un graphe de situation est conçu, et quel est la

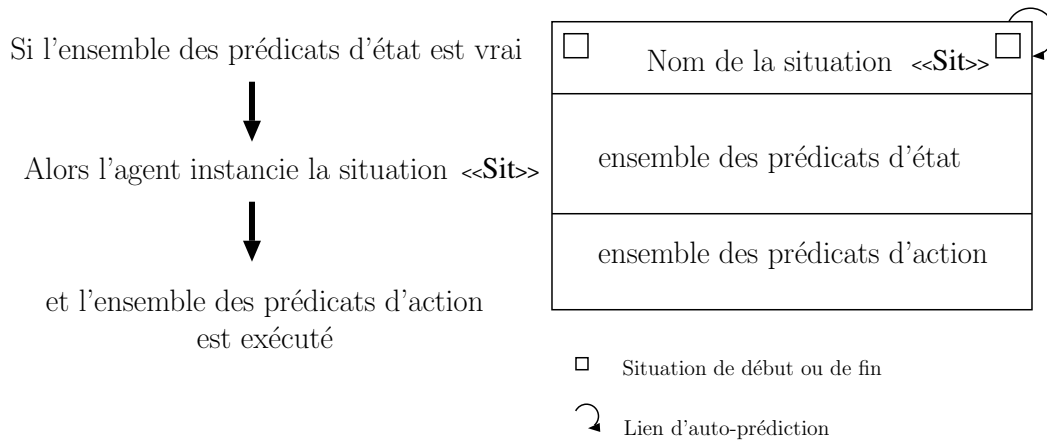


FIG. 3.2 – Schéma de situation (élément de base d'un SGT).

manière de parcourir un graphe.

### 3.3.1 Schéma de situation

Un SGT [4][5][111] décrit le comportement d'un agent en termes de situations dans lesquelles ce dernier peut se trouver. L'élément de base est donc le schéma de situation (situation scheme) qui correspond à un comportement spécifique de l'agent.

Il est constitué de deux éléments (voir figure 3.2) : un schéma d'état décrivant, à l'aide de prédicats logiques (binaires ou flous), l'état de l'agent ainsi que celui de son environnement, et un schéma d'action, constitué également de prédicats logiques, décrivant l'ensemble des actions que l'agent doit exécuter si la situation est instanciée.

Si l'ensemble des prédicats d'état d'un schéma est satisfait, l'agent instancie le schéma de situation correspondant (qui modélise donc son comportement courant) et toutes les actions du schéma sont exécutées.

### 3.3.2 Constitution d'un graphe de situations

Un graphe de situation est constitué d'un ensemble de schémas de situation connectés les uns aux autres.

Certains schémas de situation peuvent être marqués comme étant soit des situations de début (start situation) constituant des points d'entrée du graphe, soit des situations de fin (end situation) constituant des points de sortie du graphe.

Les schémas de situation sont reliés par des liens de prédiction orientés (prediction edges) [4]. Un schéma de situation peut posséder un lien d'auto-prédiction (self prediction); un agent peut donc rester dans une même situation pendant plusieurs pas temporels. Les graphes peuvent également comporter des cycles de schémas de situation (ce que les HTNs ne permettent pas).

Afin de raffiner un schéma de situation, il est toujours possible de le spécialiser (en introduisant un niveau d'abstraction supplémentaire) en connectant le schéma à un nou-

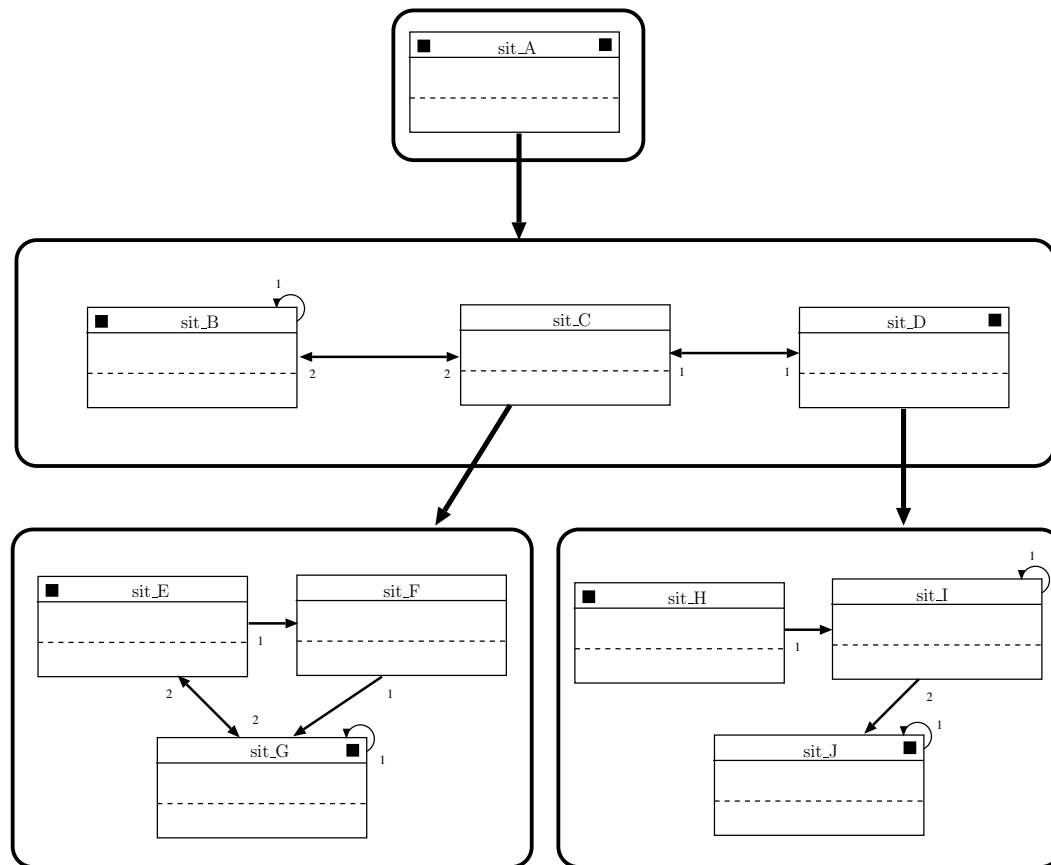


FIG. 3.3 – Exemple d'un arbre de graphes de situations.

veau graphe de situations par le biais d'un lien de spécialisation (specialisation edges) [113]. Des spécialisations multiples d'un même schéma de situation sont possibles, mais un graphe de situations donné ne peut être une spécialisation que d'un seul schéma de situation.

Un schéma de situation connecté récursivement à plusieurs graphes de situations forme un arbre de graphes de situations (un exemple est donné figure 3.3).

#### 3.3.3 Parcours d'un graphe de situations

Le parcours d'un SGT repose sur l'évaluation de prédicats d'état et consiste à déterminer la séquence de situations qu'un agent est amené à instancier, compte tenu de son comportement. Dans les applications classiques des SGTs, les valeurs des prédicats d'état sont tirées d'un flux vidéo. Une chaîne de traitement d'images spécifique fournit ainsi pour chaque image de la séquence un ensemble de valeurs de prédicat relatives à l'agent (sa position dans l'image, son orientation, sa vitesse, etc.). On obtient ainsi une séquence temporelle de prédicats d'état élémentaires. Le parcours du graphe consiste ensuite à instancier à chaque pas temporel les schémas de situation adéquats en tenant compte des valeurs des prédicats d'état correspondants.

À un pas temporel donné, un schéma de situation peut être instancié si les trois conditions suivantes sont vérifiées :

- l'ensemble de ses prédicats d'état est vérifié,
- il est connecté par un lien de prédiction ou de spécialisation au schéma de situation précédemment instancié,
- le schéma de situation précédemment instancié a exécuté avec succès l'ensemble de ses actions.

Au premier pas temporel (1<sup>ère</sup> image de la séquence), le parcours débute par l'évaluation du schéma d'état de la situation de début du graphe racine. Si la situation est instanciée, alors le parcours se poursuit en évaluant d'abord les graphes de situations accessibles par des liens de spécialisation, ensuite les situations accessibles par des liens de prédiction (l'indice des liens de prédiction détermine l'ordre d'évaluation). Si une situation remplit les trois conditions citées ci-dessous, alors elle est instanciée et le parcours se poursuit en repartant de cette situation.

Lorsqu'une situation spécialisée est instanciée, les situations du graphe de spécialisation sont évaluées à partir de sa situation de départ. Puis, une fois l'une des situations de fin de ce graphe atteinte, le parcours est repris à partir de la situation spécialisée. Ce mode opératoire suppose implicitement qu'un même graphe ne puisse pas spécialiser deux situations.

Lorsqu'aucune situation ne peut plus être instanciée, le parcours de l'arbre se termine pour le pas temporel correspondant. À chaque nouveau pas temporel (nouvelle image), le parcours du SGT débute avec la dernière situation instanciée lors du pas temporel précédent, et ainsi de suite jusqu'à l'évaluation complète de la séquence. Le retour au graphe racine de l'arbre n'est donc pas nécessaire en fin de parcours.

### 3.4 Contrôle des têtes de mesure pour une reconstruction 3D partielle

Le module de reconstruction partielle a en charge non seulement l'exécution des tâches spécifiées *a priori* par le système de planification global, mais doit également être en mesure d'adapter les traitements planifiés en fonction des conditions réelles d'acquisition (localisation effective de l'objet dans la scène, paramètres d'éclairage légèrement différents de ceux du modèle, etc.) et des résultats effectifs des traitements (figures de mérite non atteintes ou trop faibles, reconstruction 3D partielle incohérente, etc.).

#### Adaptation des SGTs à la modélisation du comportement de la tête de mesure

Des modifications sont nécessaires pour définir convenablement l'ensemble des règles gouvernant le parcours du graphe et l'instanciation des situations. De même, les prédicats alimentant le moteur d'inférence (« F-limette », dans notre cas) doivent être adaptés.

Dans notre cas, les prédicats d'état ne sont plus fournis par un flux vidéo, mais par notre module de planification. À chaque acquisition planifiée *a priori* dans la séquence va correspondre un indice temporel auquel on associe un ensemble de prédicats logiques d'état liés aux paramètres des actions à réaliser : système d'acquisition à utiliser, type des

### 3.4 Contrôle des têtes de mesure pour une reconstruction 3D partielle

---

sources d'éclairage à activer, paramètres *a priori* des procédures de traitement, figures de mérite associées, etc. Le mode de parcours du SGT se trouve donc être modifié, puisque chaque pas temporel correspond à une nouvelle acquisition, « indépendante » de la précédente. Il est donc nécessaire, à l'issue du parcours du graphe pour un pas temporel donné, que la situation de fin du graphe racine soit instanciée. En effet, si cela n'était pas le cas, cela signifierait que l'enchaînement des opérations exécutées conduit à un échec, traduisant probablement une erreur de conception du graphe. Cette condition de retour au graphe racine va donc être déterminante pour la conception même du SGT modélisant le comportement de la tête de mesure, et également pour l'établissement des règles de parcours du SGT.

Par ailleurs, les prédicats d'action ne doivent plus se limiter à spécifier l'état de l'agent (logique « d'observation ») correspondant à la situation instanciée. En effet, les prédicats d'action des situations correspondent dans notre application aux traitements nécessaires à la reconstruction 3D partielle de l'objet : génération par contours actifs du masque de l'objet, segmentation et numérotation des franges, détermination des coordonnées 3D des points image, etc. La prise en compte du résultat de ces actions par le biais des prédicats d'état nous permettra aussi de mettre en place un comportement auto-adaptatif de l'agent. En effet, puisque les actions exécutées lors de l'instanciation d'une situation sont susceptibles de modifier les prédicats d'état d'autres situations, il est possible de définir des boucles de correction à l'aide de schémas de situation spécifiques. D'un point de vue pratique, les résultats des différents traitements sont évalués à l'aide de figures de mérite définies *a priori*. Nous passons ainsi d'une logique « d'observation » à une logique « d'action ».

Ce comportement original permet à l'agent représentant la tête de mesure de déterminer automatiquement, dans l'ensemble des séquences de schémas de situation possibles, la séquence à instancier la plus adaptée (dans notre application, la séquence générant la reconstruction 3D partielle la plus précise), compte tenu des conditions effectives d'acquisition.

#### 3.4.1 Procédures mises en œuvre

Le système de contrôle de la tête de mesure « lumière structurée » doit fournir une description 3D de l'objet en réalisant toutes les opérations d'acquisition et de reconstruction 3D partielle planifiées. Il s'agit notamment d'enchaîner l'appel des procédures chargées de :

- la modification du point de vue,
- l'acquisition de l'image,
- la génération du masque de l'objet,
- la segmentation et de la numérotation des franges,
- la détermination des coordonnées 3D des points image (cette procédure repose sur une procédure d'étalonnage de la caméra et de l'espace de mesure réalisée hors ligne).



Deux procédures supplémentaires (partiellement implémentées) s'avèrent également être nécessaires afin d'assurer une relative autonomie du système de mesure. Il s'agit de :

- la comparaison des données 3D acquises avec les données de référence,
- l'ajustement des conditions d'éclairage.

### Modification du point de vue

Pour une application de contrôle qualité nécessitant une grande précision, et compte tenu de la résolution limitée de la caméra CCD utilisée, il est nécessaire dans notre cas de restreindre le volume d'acquisition (sensiblement équivalent à un cube de 5 cm de côté). Cette contrainte nous amène donc à acquérir plusieurs images complémentaires de l'objet, afin de couvrir la totalité de sa surface et donc d'obtenir une reconstruction complète.

Un déplacement de la tête de mesure par rapport à l'objet à évaluer est la solution retenue dans le cadre de notre application, en utilisant un robot de mesure pour ces déplacements. Cette configuration offre beaucoup de liberté quant au choix du point de vue et permet l'analyse d'objets de grandes dimensions. On pourrait toutefois envisager la solution inverse; c'est-à-dire déplacer l'objet devant la tête de mesure. Dans cette configuration, correspondant à la version prototype du robot de mesure utilisée pour l'ensemble de nos expériences, l'objet est placé sur un plateau dont la position est gérée par une table de contrôle micrométrique.

La modification du point de vue est donc obtenue en spécifiant 3 paramètres de translation  $T_x$ ,  $T_y$  et  $T_z$ , ainsi qu'une matrice de rotation  $R$  à 3 paramètres (1 seul paramètre dans la version prototype).

La figure 3.4 illustre le dispositif utilisée pour les différents essais de reconstruction 3D.

### Acquisition d'image

L'information 3D est obtenue par l'étude de la déformation de la projection d'un motif lumineux régulier sur l'objet à analyser [84, 60]. Comme nous l'avons décrit dans le chapitre 1, une image sans projection de motif, acquise dans les mêmes conditions, est aussi acquise afin d'isoler l'objet du fond de l'image.

La procédure d'acquisition permet donc, pour un point de vue donné, d'acquérir successivement deux images : l'une avec le projecteur allumé et l'autre avec le projecteur éteint.

### Génération du masque de l'objet

Afin de limiter l'étape de reconstruction aux seuls points correspondant effectivement à l'objet, nous avons juger nécessaire de développer une procédure de prétraitement consistant à isoler la région de l'objet du fond de l'image. Cette opération est réalisée en appliquant sur l'image avec franges un masque binaire correspondant à la zone couverte par l'objet. Ce masque est généré à partir de l'image sans franges, en appliquant notre méthode de segmentation par contours actifs présentée dans le premier chapitre.

### 3.4 Contrôle des têtes de mesure pour une reconstruction 3D partielle

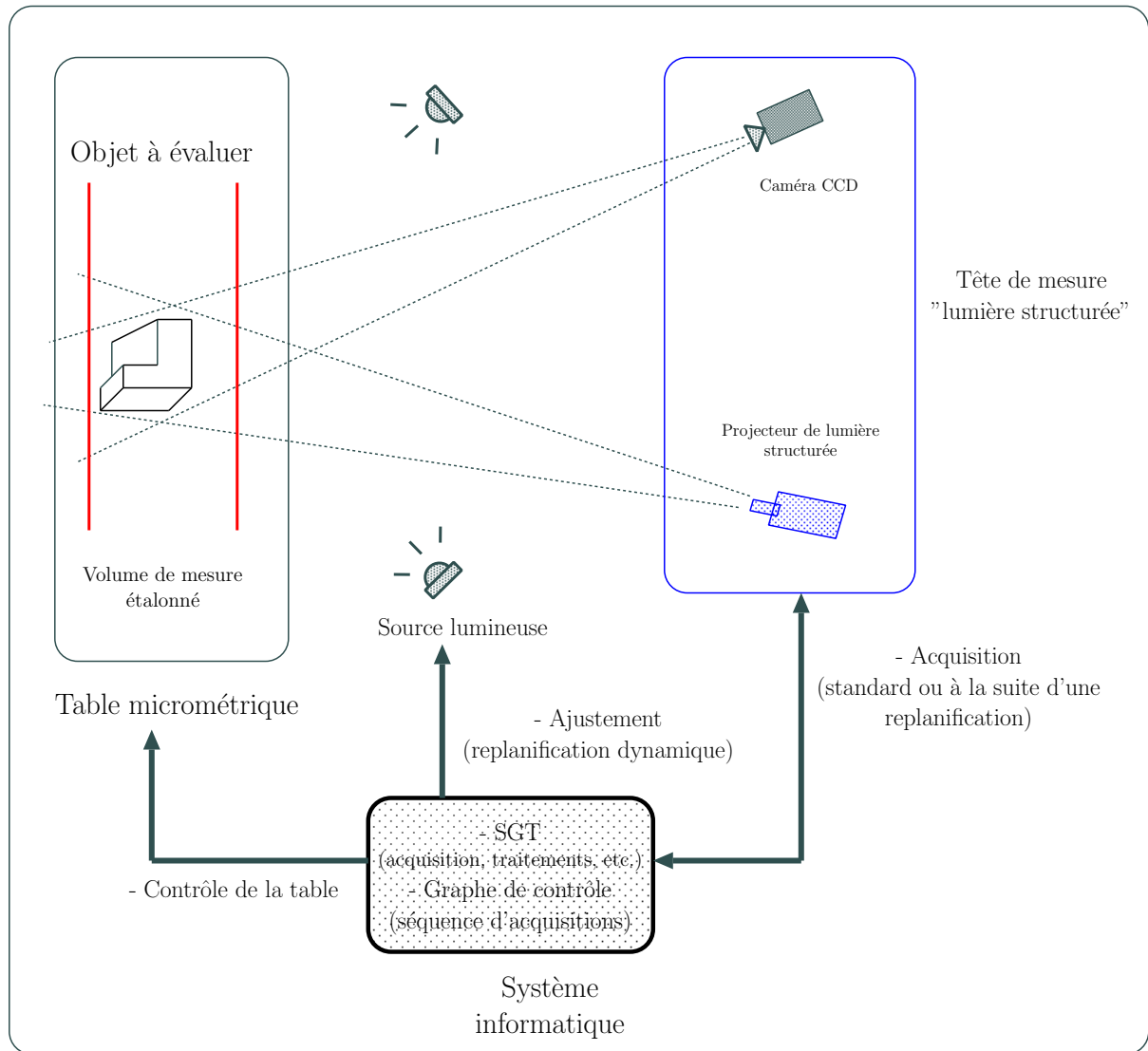


FIG. 3.4 – Schéma de principe du dispositif de reconstruction 3D.

Pour mémoire, la mise en œuvre de cette procédure nécessite de fixer des contours initiaux et un ensemble de paramètres : la largeur de la bande étroite, le nombre d'itérations autorisées avant de réinitialiser la bande, le pas temporel utilisé pour la discrétisation de l'équation d'évolution, le facteur de pondération dépendant de la courbure, le facteur de pondération propre aux contours actifs géodésiques, la force ballon, les paramètres de la fonction d'attache aux données, ainsi que le paramètre d'arrêt utilisé pour tester la stabilisation du contour actif. Ces paramètres sont déterminés hors ligne en utilisant les plans d'expériences, comme décrit dans le chapitre 2.

### Segmentation et numérotation des franges

À partir de l'image franges, à laquelle a été appliqué le masque de l'objet, une détection de ces franges est en premier lieu effectuée. L'analyse d'une ligne de référence dans l'image permet ensuite de détecter la frange centrale, puis de numérotter successivement les franges (par incrémentation vers la droite et par décrémentation vers la gauche).

Le filtrage de type Canny-Deriche utilisé nécessite de régler un seul paramètre. La numérotation des franges exige de définir une ligne de référence dans l'image sur laquelle on est certain de trouver la frange centrale.

### Détermination des coordonnées 3D des points image

La détermination des coordonnées 3D des points de l'image consiste à déterminer pour tout pixel de coordonnées  $(u, v)$  dans l'image, et appartenant à la frange d'indice  $i$ , le point de coordonnées  $(X, Y, Z)$  exprimées dans le repère de la caméra. Cette procédure est particulièrement rapide puisque qu'elle repose simplement sur une interpolation dans l'espace de mesure discrétisé pendant l'étalonnage.

Le pas de mesure horizontal étant imposé par la position des franges, le seul paramètre à fixer est le pas d'échantillonnage vertical de l'image. Il est ainsi possible de déterminer les coordonnées 3D de la totalité des pixels des franges, ou de définir un pas vertical en rapport avec le pas de mesure horizontal. On obtient ainsi en sortie une matrice dont chaque élément correspond aux coordonnées  $(X, Y, Z)$  d'un point de l'image (le triplet  $(0, 0, 0)$  est utilisé dans le cas où l'information 3D n'a pas pu être obtenue).

L'étalonnage de l'espace de mesure consiste à déterminer dans un premier temps les paramètres intrinsèques et extrinsèques de la caméra seule à l'aide d'une mire, puis, dans un deuxième temps, à discrétiser l'espace de mesure. On utilise pour cela un plateau vertical sur lequel sont projetées les franges et que l'on déplace le long d'une droite  $D$  devant la caméra (usuellement selon une direction proche de celle de l'axe optique du capteur et en limitant le parcours à une zone conduisant à une image nette du plan). Chaque acquisition d'une image de franges correspond donc à une position particulière  $D_j$  du plateau, avec un incrément de déplacement  $\delta D$  par rapport à la position précédente. La position de départ  $D_0$  correspond à la position de la mire utilisée pour étalonner la caméra. L'application des procédures de détection et de numérotation de franges permet ensuite d'obtenir un échantillonnage de l'espace de mesure qui met en correspondance des paires  $(u, v, i)$  et  $(X, Y, Z)$ . Cette procédure est réalisée hors ligne et ne doit être reprise que si la géométrie de la tête de mesure est modifiée, c'est-à-dire si la position ou

### 3.4 Contrôle des têtes de mesure pour une reconstruction 3D partielle

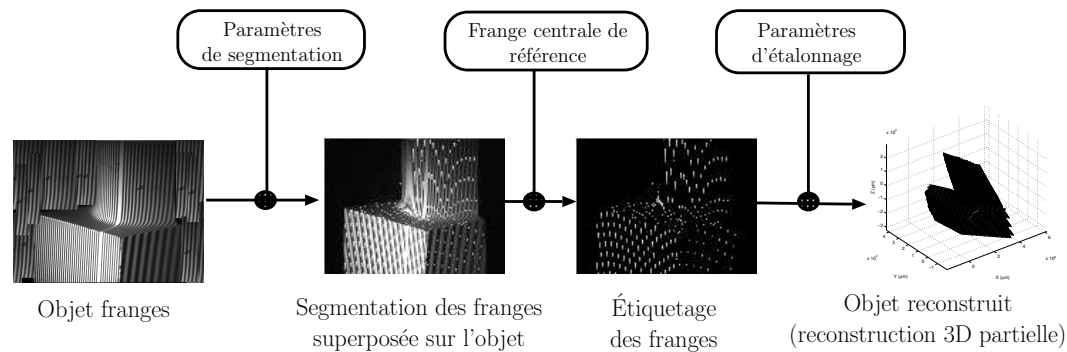


FIG. 3.5 – Procédure de reconstruction 3D partielle.

l'orientation de la caméra par rapport au projecteur de lumière est modifiée. La figure 3.5 illustre la procédure de reconstruction 3D partielle utilisée.

#### Comparaison des données 3D réelles/données de référence

Il est nécessaire dans un premier temps d'exprimer les deux jeux de données dans un même repère. Le processus d'évaluation de l'objet consiste ensuite à comparer, en utilisant un critère de distance, les données 3D observées (nuages de points 3D réels) avec les données du modèle de référence (nuage de points 3D, expression analytique de la surface, ou modèle CAO).

Le module de contrôle de la tête de mesure n'a pas en charge l'évaluation dimensionnel. Il doit toutefois délivrer une information 3D partielle proche de celle prévue lors de la planification de la séquence d'acquisition. La procédure de comparaison doit, en résumé, permettre de distinguer trois cas de figure :

- les données acquises sont conformes aux données de référence,
- on relève l'absence de certaines données requises (à la suite d'une acquisition et/ou d'un traitement inadéquats),
- certaines données sont non conformes, compte tenu des données de référence (par exemple, dans le cas d'une pièce défectueuse).

#### Ajustement des conditions d'éclairage

Le nombre, le type et la position des différentes sources lumineuses utilisées sont fixes. On dispose pour chaque source de son modèle d'illumination, que l'on peut exploiter pour la planification de la séquence d'acquisitions, ainsi que dans une procédure d'ajustement de l'intensité des sources lumineuses si nécessaire.

#### 3.4.2 Représentation comportementale de la tête de mesure « lumière structurée »

Afin de valider notre approche, nous avons développé un graphe de situations synthétisant toutes les configurations que la tête de mesure « lumière structurée » peut

rencontrer pour générer une reconstruction 3D partielle (correspondant à une acquisition). Les différentes étapes du processus d'acquisition et de reconstruction 3D sont ainsi modélisées par des schémas de situation dont les schémas d'action correspondent aux traitements à réaliser. La conception du graphe ne dépend que du système d'acquisition utilisé et est indépendante de l'objet à reconstruire.

Les actions exécutées lors de l'instanciation d'une situation étant susceptibles de modifier les prédicats d'état fixés *a priori* pour d'autres situations, le parcours du graphe dépend du résultat des différentes actions réalisées par la situation instanciée.

Le SGT requiert donc, lors de son instanciation, la vérification d'un ensemble de prédicats d'état correspondant notamment au type de capteur à utiliser, aux valeurs des paramètres des procédures de traitement, aux figures de mérite devant être atteintes par ces procédures, etc. Au fur et à mesure du parcours du graphe, les résultats des différents traitements (images segmentées, matrice correspondant à la reconstruction 3D, etc.) sont stockés sous la forme de fichiers, afin de pouvoir être exploités par la suite par le module contrôlant l'application et effectuant l'inspection dimensionnelle proprement dite (voir chapitre 4).

Dans une application industrielle de contrôle qualité, les conditions effectives de prise de vue peuvent être légèrement différentes de celles prévues lors de la planification (par exemple, du fait d'un positionnement différent de la pièce, de conditions d'illumination changeantes ou d'une dérive dans le temps de certains éléments du dispositif). Face à ces événements imprévus, il est important que le système, via le SGT, soit capable d'adapter automatiquement son comportement en tenant compte des conditions réelles d'acquisition et des résultats partiels des différentes procédures. Il peut ainsi être nécessaire de modifier la valeur de certains paramètres de traitement (par exemple, taille d'une fenêtre d'intérêt dans l'image, valeurs de seuil, ajustement d'un coefficient, etc.) si des figures de mérite prédéfinies ne sont pas réalisées (par exemple, échec de la segmentation de l'image). Cette correction automatique peut également amener le processus à ajuster, dans un deuxième temps, les paramètres physiques de l'application (par exemple, ajustement de la position et de l'orientation de la tête de mesure, modification des conditions d'éclairage).

Ces deux types d'ajustement sont implémentés de façon différente au sein du graphe. Les ajustements locaux spécifiques à certaines procédures sont intégrés dans des graphes spécialisant les situations concernées, alors que les ajustements globaux, qui ont un impact sur l'ensemble des traitements, sont intégrés dans une situation particulière (« planification dynamique ») située dans le graphe spécialisant la situation racine. Cette organisation garantit que les ajustements locaux seront mis en œuvre en premier (ils n'ont pas d'impact sur les procédures qui suivent et bien souvent la modification de la valeur d'un paramètre suffit). Les ajustements globaux ne seront ainsi activés que si les ajustements locaux ne parviennent pas à remédier au problème rencontré.

La figure 3.6 donne un exemple de graphe de situations utilisé dans le cadre de la reconstruction 3D.

### 3.4 Contrôle des têtes de mesure pour une reconstruction 3D partielle

---

#### Niveau 0 : Le graphe racine

La situation racine de début du graphe permet de s'assurer que l'agent à contrôler correspond bien à la tête de mesure « lumière structurée » (on teste la valeur du prédicat d'état « agent » transmis par le module de planification). La situation de fin du graphe racine fournit une évaluation du déroulement du parcours (reconstruction 3D obtenue à partir des paramètres *a priori*, reconstruction 3D obtenue en modifiant les paramètres *a priori*, ou échec de la reconstruction 3D), transmise au module de planification en charge de l'inspection dimensionnelle, en vue d'une éventuelle action corrective en cas d'échec.

#### Niveau 1 : Les situations de base

Ce graphe est constitué de cinq situations de base décrivant l'acquisition et la reconstruction 3D partielle :

**Déplacement** (situation de début) : Elle assure le contrôle des mouvements de la tête de mesure « lumière structurée ».

**Acquisition** : Cette situation a en charge non seulement l'acquisition des images à niveaux de gris (avec et sans franges), mais également, s'il y a lieu, l'ajustement du contraste des images.

**Traitement** : Ce schéma exécute les procédures de construction du masque binaire, de segmentation ainsi que de numérotation des franges.

**Reconstruction\_partielle** (situation de fin) : Cette situation génère le nuage de points 3D à partir des points images mesurés et compare ce résultat aux données de référence prévues.

**Planification\_dynamique** : Cet élément du graphe modifie les conditions d'acquisition en ajustant les conditions d'illumination ou en changeant le point de vue de la tête de mesure (instanciation conditionnelle).

Ces situations ont toutes été spécialisées, afin d'être capable de mettre en place les différentes procédures ainsi que les boucles d'ajustement locales.

#### Parcours du graphe

Si l'on s'en tient à ce niveau de spécialisation, le parcours du graphe se traduit par la séquence :

déplacement > acquisition > traitement > reconstruction\_partielle.

Le passage d'une situation à l'autre n'est réalisé que si les données fournies par la situation précédente satisfont les figures de mérite fixées *a priori*.

Si la reconstruction partielle obtenue est conforme à ce qui était attendu, alors le SGT a atteint son objectif. Il arrête son exécution et rend la main au module de planification en charge de l'inspection dimensionnelle (passage de la situation de fin du schéma « reconstruction\_partielle » à la situation de fin du graphe racine).

Si la reconstruction partielle obtenue n'est que partiellement conforme à ce qui était attendu, alors deux cas de figure peuvent se présenter :

Soit certaines données mesurées ne sont pas conformes aux données prévues (divergence des mesures) : Dans ce cas, le SGT a toutefois rempli son rôle et il est probable que la pièce inspectée soit défectueuse. Il peut donc interrompre son fonctionnement (passage de la situation de fin du schéma « reconstruction\_partielle » à la situation de fin du graphe racine) et laisser le module de planification prendre la décision appropriée.

Soit certaines données prévues n'ont pas pu être mesurées (absence de mesures) : le SGT va alors chercher à ajuster les conditions d'acquisition afin de « récupérer » l'information manquante. C'est précisément le rôle de la situation « planification\_dynamique » qui va d'abord déterminer de nouveaux paramètres pour les conditions d'éclairage (par exemple, afin de renforcer le contraste dans l'image) ou pour le point de vue du capteur (déplacement de l'objet dans notre cas). Ensuite, ce schéma va faire de nouveau appel aux situations de base.

Les liens de prédiction orientés qui lient la situation « planification\_dynamique » aux situations « acquisition » et « déplacement » permettent ainsi la mise en œuvre de cycles du type :

- déplacement > acquisition > traitement > reconstruction\_partielle > planification\_dynamique > acquisition > traitement > reconstruction\_partielle
- déplacement > acquisition > traitement > reconstruction\_partielle > planification\_dynamique > déplacement > acquisition > traitement > reconstruction\_partielle

La figure 3.6 illustre les liens de prédiction existants entre les schémas de situation de base (et correspondant au SGT générique que nous avons développé).

La figure 3.7 présente le résultat d'une reconstruction 3D partielle correspondant à une acquisition unique par la tête de mesure. Le nuage de points 3D obtenu résulte d'un parcours normal du graphe et satisfait aux conditions de conformité prévues *a priori* dans la planification. En d'autres termes, dans ce cas, les primitives géométriques mesurées satisfont les critères de correspondance avec les primitives prédéfinies à partir du modèle de référence.

### 3.4 Contrôle des têtes de mesure pour une reconstruction 3D partielle

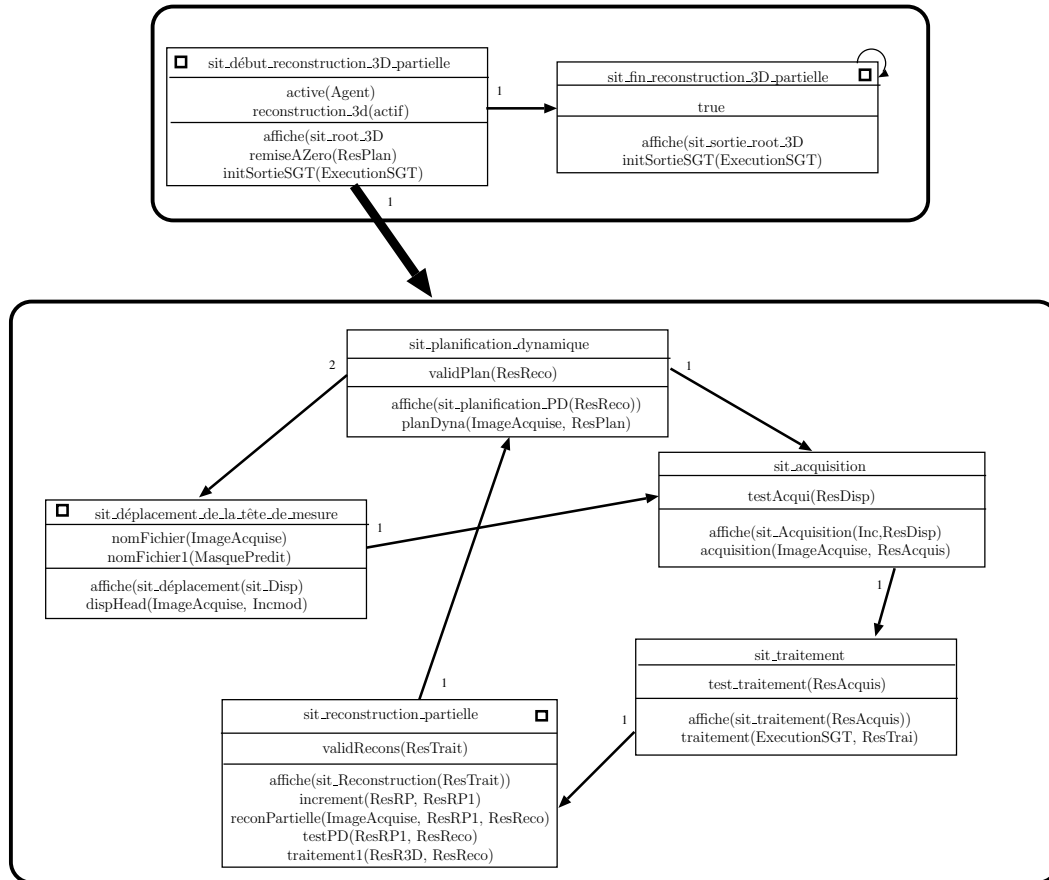
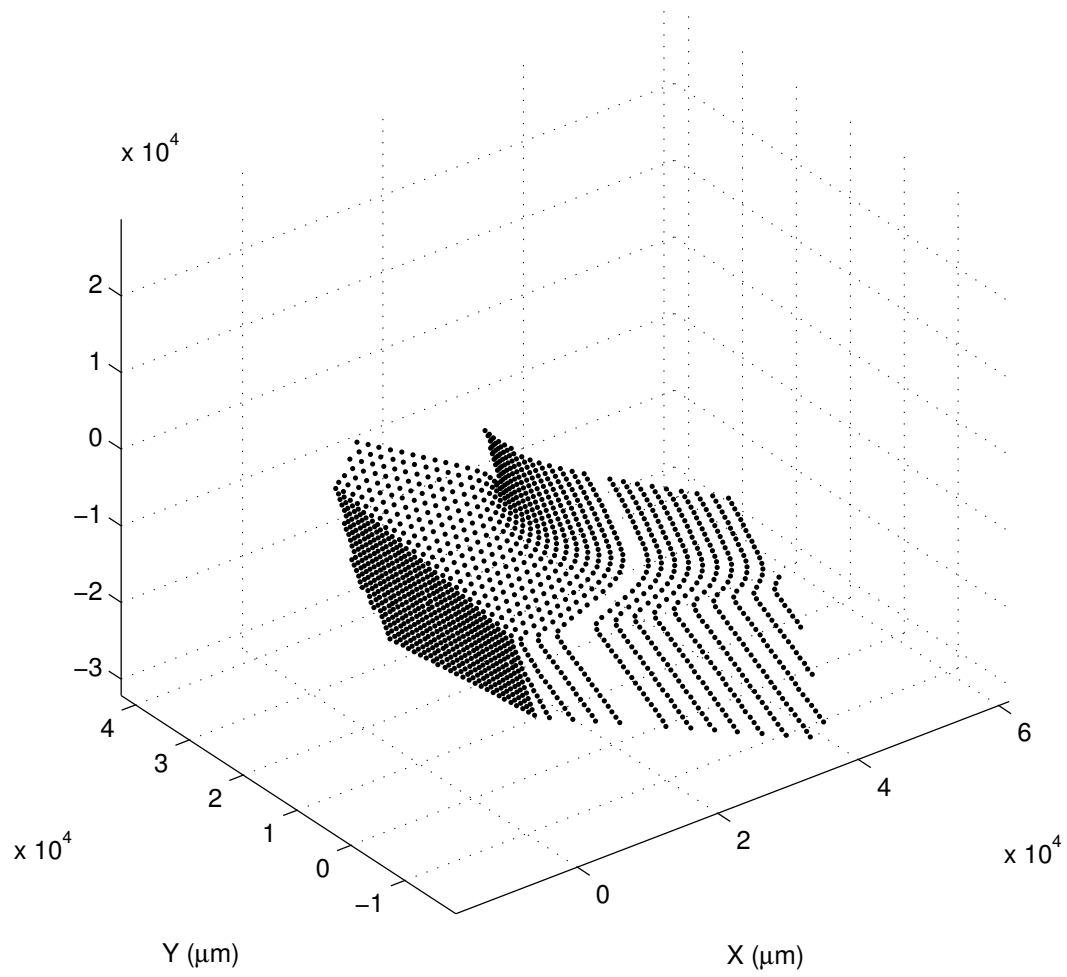


FIG. 3.6 – Graphe de situations décrivant le comportement de la tête de mesure « lumière structurée ». Ce graphe est une partie du SGT complet. Il est composé du schéma racine ainsi que des cinq schémas de situation de base nécessaires à la reconstruction 3D partielle de l'objet. Les différentes spécialisations associées à ces schémas seront détaillées plus loin dans ce chapitre.





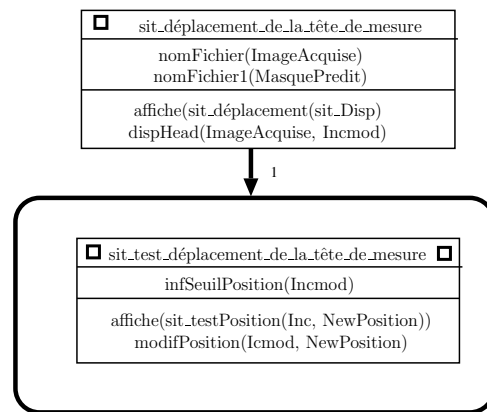


FIG. 3.8 – Spécialisation de la situation « Déplacement ».

#### 3.4.3 Adaptation dynamique aux conditions effectives d'acquisition

Le module de planification détermine, pour l'ensemble des procédures d'acquisition et de traitements utiles à la reconstruction 3D, la valeur des différents paramètres nécessaires ainsi que des figures de mérite à atteindre. Il est pour cela nécessaire de réaliser une simulation des conditions d'acquisition et donc de disposer d'un modèle de l'objet, de la tête de mesure, des sources d'illumination.

Compte tenu des modalités effectives de prise de vue ainsi que des erreurs de modélisation, il est probable que les paramètres déterminés *a priori* ne permettent pas d'atteindre toutes les figures de mérite prévues. Selon la qualité des résultats effectivement obtenus par les procédures (figures de mérites atteintes, presque atteintes, faibles, trop faibles, etc.), les situations peuvent être amenées à réaliser des ajustements sur les valeurs des paramètres. Les paramètres sont spécifiques à chaque procédure et correspondent notamment au contraste de l'image, à la stabilisation des contours actifs, à la cohérence de la numérotation des franges, etc. Au cours d'une replanification dynamique, les paramètres des traitements sont adaptés automatiquement aux conditions réelles d'acquisition au fur et à mesure du parcours du graphe.

Ces ajustements locaux sont implémentés en spécialisant les situations de base.

#### Niveau 2 : Spécialisations des situations de base

**Grphe associé au Déplacement.** À chaque déplacement (translation, rotation, ou une combinaison des deux), le graphe se charge de vérifier si le déplacement conduit à la position atteinte; pour cela, il compare le déplacement effectué avec celui prédéfini. Dans le cas d'une erreur importante (par rapport à un seuil fixé *a priori*), une correction est réalisée afin d'ajuster le déplacement effectué. La figure 3.8 illustre la spécialisation de la situation « déplacement » en charge de cette correction.

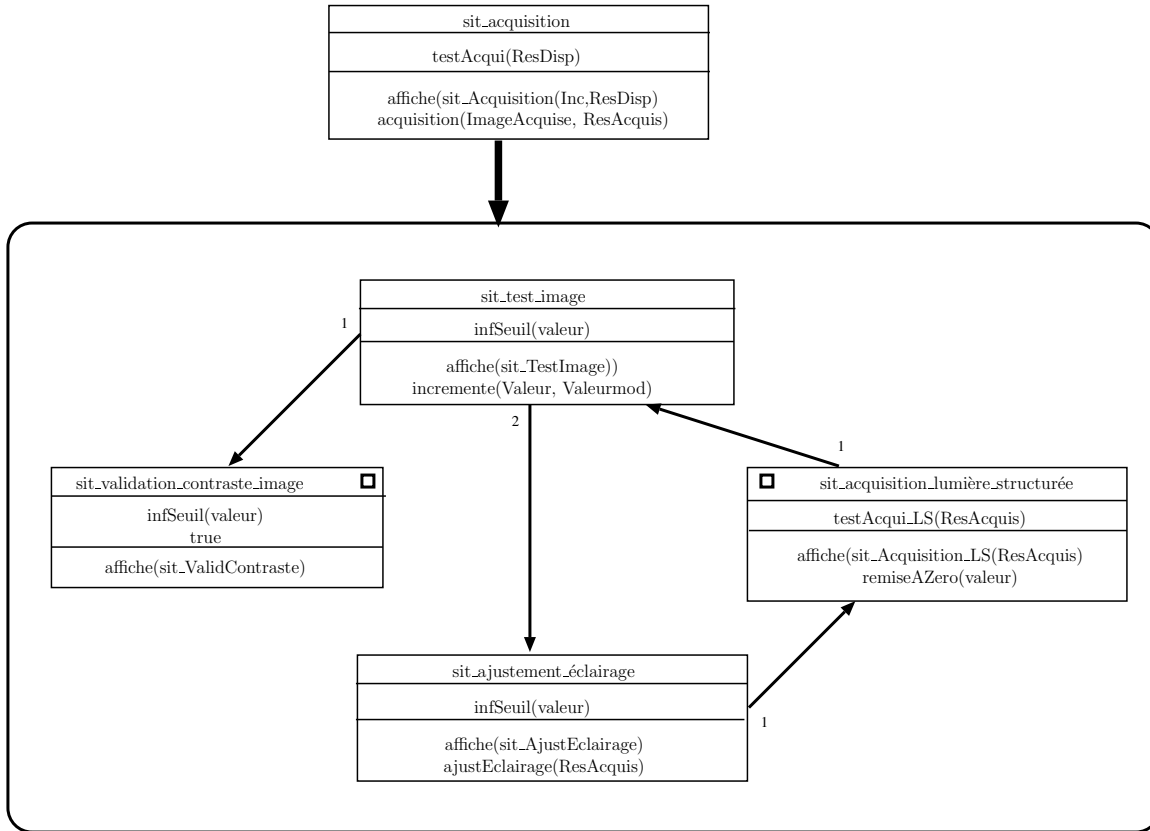


FIG. 3.9 – Spécialisation de la situation « Acquisition ».

**Graphe associé à l'Acquisition.** L'analyse de l'histogramme des niveaux de gris de l'image permet de mettre en place un test simple portant sur le contraste de l'image.

Si l'image acquise est équilibrée, le graphe valide l'acquisition en cours. En revanche, dans le cas où l'image acquise est sombre ou saturée, une correction va chercher à augmenter ou réduire l'intensité des sources lumineuses (rappelons que le système dispose d'un modèle pour chaque source lumineuse, qu'il peut contrôler séparément).

La figure 3.9 illustre cette correction par le biais de la spécialisation de la situation « acquisition ».

### Graphe associé au Traitements

**Génération du masque correspondant à l'objet.** À partir de l'image acquise sans franges, une segmentation par contours actifs génère un masque binaire assurant la séparation de l'objet du fond de l'image. Deux corrections distinctes sont susceptibles d'être déclenchées.

Premièrement, un test sur l'évolution de la segmentation est réalisé : si la stabilisation du contour n'est pas atteinte en un nombre maximum fixé d'itérations (paramètre fixé *a priori* à partir des plans d'expériences), cela signifie que les coefficients gérant l'évolution du contour ne sont pas adaptés. Il est alors nécessaire de les modifier. Toutefois, seul le

### 3.4 Contrôle des têtes de mesure pour une reconstruction 3D partielle

---

paramètre le plus significatif (cf. chapitre 2) fera l'objet d'un ajustement local. Le graphe réitère alors la segmentation jusqu'à convergence.

Deuxièmement, une fois le masque généré, il est comparé avec le masque prévu dans la phase de planification. On utilise pour cela des critères géométriques portant sur la longueur du contour, la surface, et le taux de recouvrement.

**Segmentation et numérotation des franges.** Cette procédure permet de récupérer une image de la déformation de la projection d'un motif lumineux régulier sur l'objet à analyser sous la forme de lignes étiquetées. Pour ce faire, à partir de l'image franges de l'objet, une détection est réalisée afin de localiser les franges situées à droite et à gauche d'une frange centrale identifiée au préalable. Elle génère en sortie l'image « franges numérotées » nécessaire à la détermination des coordonnées 3D de points liés à l'objet. Une dernière étape des procédures de traitement détermine les coordonnées 3D de points sous la forme d'un nuage de points 3D.

La figure 3.10 illustre la spécialisation liée à la situation « traitement ».

**Graphe associé à la Reconstruction partielle.** Une fois le nuage de points 3D obtenu, une phase de comparaison entre les données réelles mesurées et celles du modèle de référence doit être réalisée afin de valider les données 3D obtenues. Si les deux jeux de données ne sont pas cohérents, le graphe doit instancier la situation « planification\_dynamique » en charge de réaliser les ajustements globaux nécessaires (modification des conditions d'éclairage et/ou déplacement de l'objet). Ce schéma de situation, ainsi que l'ensemble des situations le spécialisant, est donné figure 3.11.

#### Planification dynamique

Afin d'éviter un bouclage infini, chaque procédure d'ajustement local ne peut être répétée qu'un nombre limité de fois, fixé par un seuil. Dans le cas où ce seuil est atteint, cela signifie que la procédure en cause ne parvient pas à satisfaire les figures de mérite attendues malgré les ajustements effectués. Il est alors nécessaire de modifier profondément les conditions d'acquisition.

Dans ce cas, la procédure d'ajustement global est mise en œuvre par le biais de la situation « planification\_dynamique ». Cette dernière conduit à des modifications importantes des conditions d'acquisition (dans notre cas, les conditions d'éclairage et/ou le déplacement de l'objet).

Pour spécifier la correction à apporter à l'éclairage, ou au déplacement, plusieurs règles du type « Si-Alors » ont été définies. Ces règles sont appliquées en respectant un ordre hiérarchique ; plus spécifiquement, le graphe privilégie, pour la correction, l'ajustement de l'éclairage par rapport au déplacement de la tête de mesure. Ce choix est motivé par la facilité d'intervention sur les conditions d'éclairage, ainsi que par le fait que, souvent, face à une erreur de reconstruction, une modification des conditions d'éclairage apporte fréquemment les améliorations souhaitées, en particulier pour la qualité de la reconstruction 3D. L'ensemble de ces règles est présenté selon leur ordre d'application ci-après :

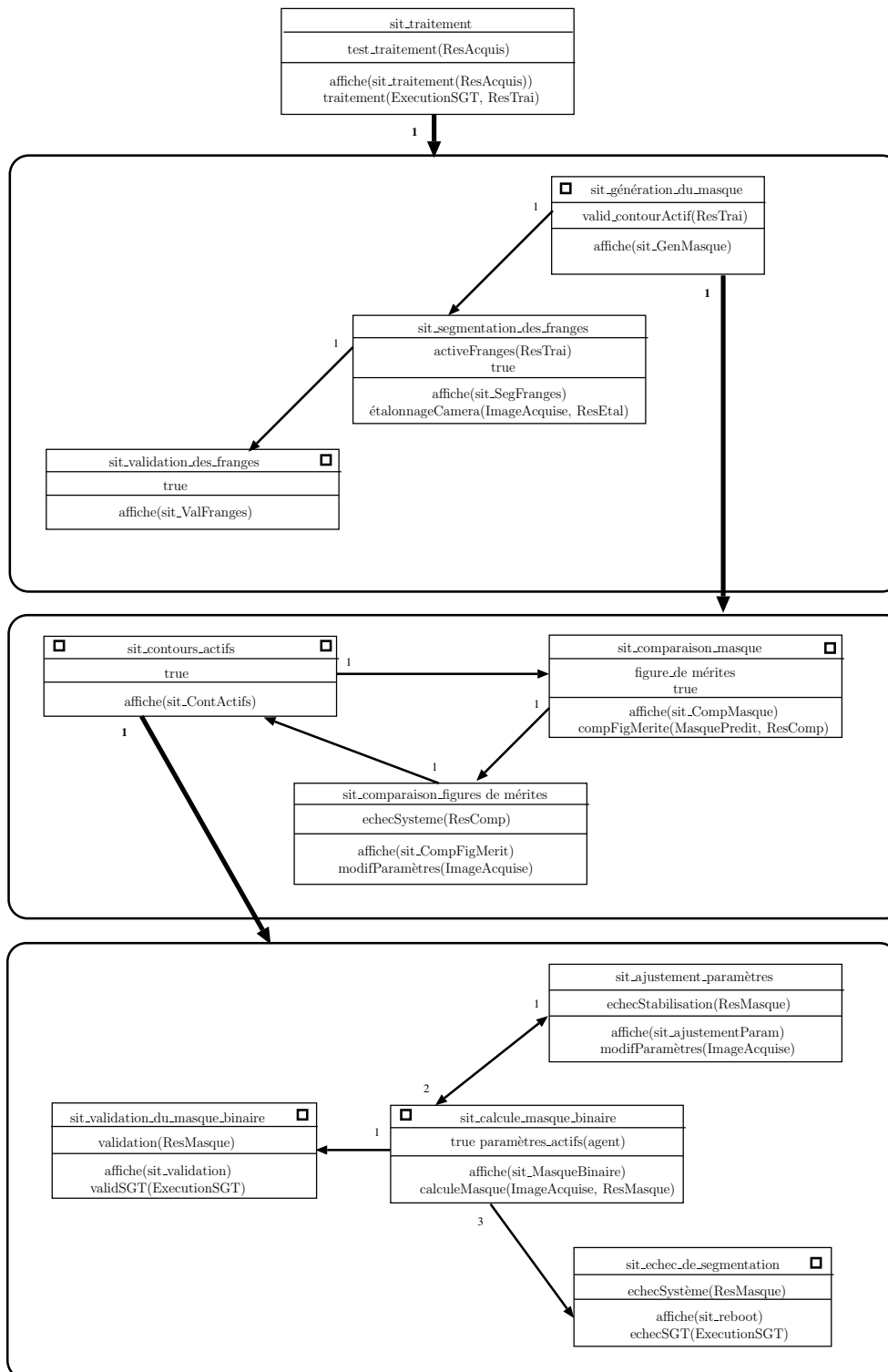


FIG. 3.10 – Spécialisation de la situation « Traitement ».

### 3.4 Contrôle des têtes de mesure pour une reconstruction 3D partielle

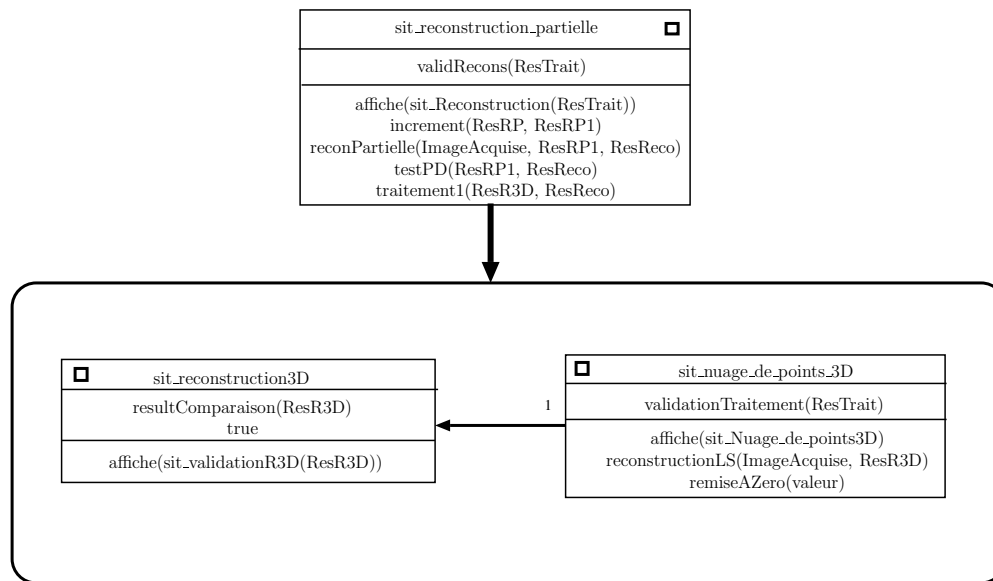


FIG. 3.11 – Spécialisation de la situation « reconstruction\_partielle ».

- **Règle 1** : Si la figure de mérite n’est pas atteinte, et si l’image acquise est sombre, alors le système augmente l’intensité d’illumination  $I_e$  d’un incrément  $\Delta I_e$  tel que  $I_e = I_e + \Delta I_e$  ( $\Delta I_e$  est fixé *a priori* par le système de planification).
- **Règle 2** : Si la figure de mérite n’est pas atteinte, et si l’image acquise est saturée, alors le système réduit l’intensité d’illumination  $I_e$  d’un incrément  $\Delta I_e$  tel que  $I_e = I_e - \Delta I_e$ .
- **Règle 3** : Si la figure de mérite n’est pas atteinte, et si l’image acquise n’est ni sombre ni saturée, alors le système modifie la position de la tête de mesure (en appliquant un déplacement fixé *a priori*). Ce déplacement s’effectue dans une direction donnée en fonction de paramètres de déplacement fixés *a priori* et des résultats effectifs des traitements (déplacement vers la droite, vers la gauche, vers le haut ou vers le bas).

**Analyse et discussion.** Afin d’améliorer les conditions d’illumination, et si l’on dispose d’une description plus détaillée des résultats issus de la comparaison des données réelles avec celles de référence, on peut envisager une amélioration de l’éclairage uniquement sur une zone donnée de l’objet (région incluant une ou plusieurs primitives non perçues) et non pas sur toute la fenêtre d’intérêt fixée *a priori*. Cette correction pourrait se faire par le biais d’une réorientation, par exemple, de la source lumineuse afin de rendre « visible » la zone mal traitée de l’objet. Ce mode de correction présente l’avantage d’apporter une correction uniquement sur la région mal perçue, et donc de maintenir, plus au moins, le contraste des régions déjà bien perçues par la tête de mesure.

Une fois le fichier de reconstruction 3D correspondant à l’objet (fichier nuage de

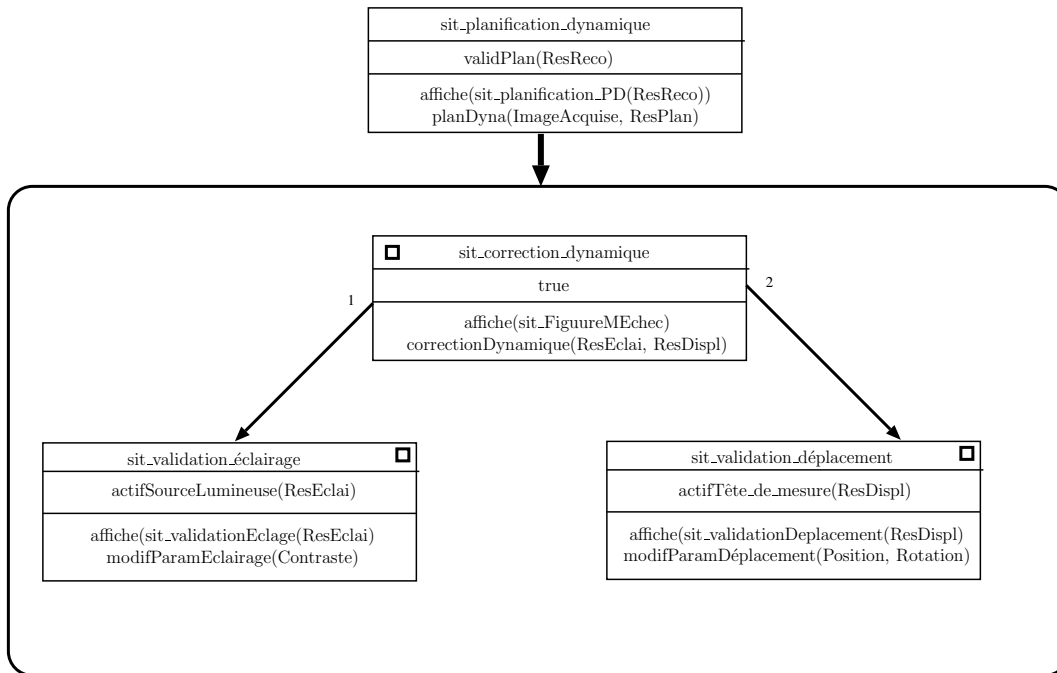


FIG. 3.12 – Spécialisation de la situation « replanification\_dynamique ».

points 3D) obtenu à la suite d'une planification dynamique, le graphe considère ce fichier comme la description 3D partielle à utiliser par la suite. Autrement dit, le graphe ne garde pas de trace (historique) des reconstructions 3D contenant des erreurs de mesure et ayant conduit à des défauts de reconstruction.

La figure 3.12 présente la situation de replanification dynamique ainsi que sa spécialisation.

### 3.4.4 Implémentation logicielle

Comme nous l'avons déjà souligné, l'exploitation que nous faisons des SGTs diffère profondément de leur utilisation initiale. Pour les besoins de notre application, nous avons donc été également amenés à modifier et à adapter certains modules permettant de parcourir le SGT.

#### Modules de base originaux

Trois logiciels [167] exécutables par un système d'exploitation du type linux sont nécessaires afin de mettre en œuvre les SGTs. Ces modules sont décrits ci-après.

**Éditeur de graphe « SGTEditor ».** C'est un éditeur permettant de graphiquement concevoir des graphes de situations et dont l'architecture repose sur le générateur de diagramme « DiaGen » [167]. La disposition des schémas de situation, la mise en place des liens de prédiction et de spécialisation, la création de graphes de situations se font

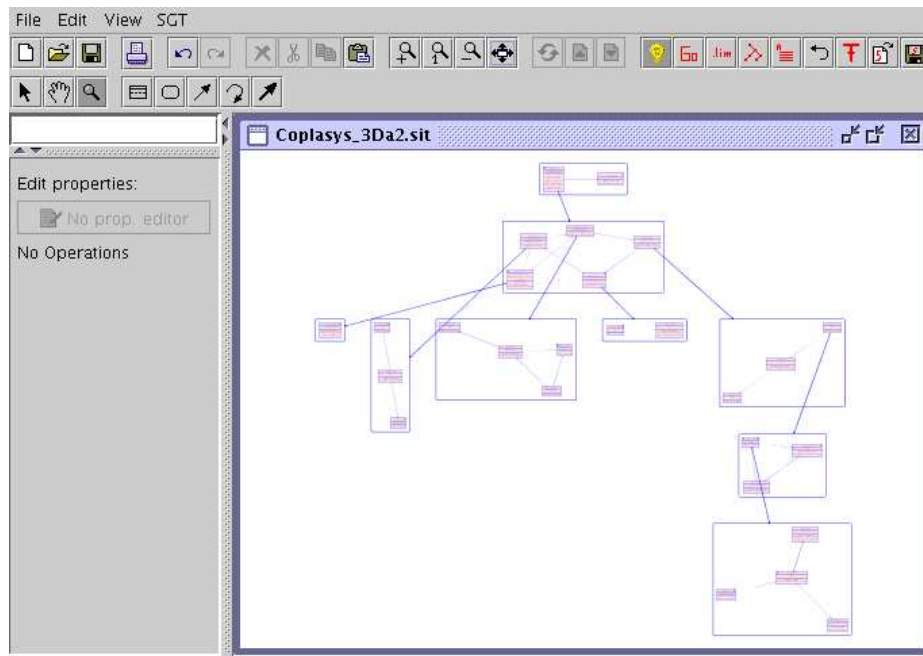


FIG. 3.13 – Interface graphique de l'éditeur de graphes « SGTEditor ».

par le biais de menus interactifs. Il est également possible à ce stade de déclarer les prédicats d'état et d'action des différents schémas de situation. Une description textuelle du graphe est ensuite générée en langage SIT++, développé par Schäfer [140].

La figure 3.13 donne une image de l'interface graphique de « SGTEditor ».

**Moteur d'inférence « F-limette ».** Son implémentation est faite en utilisant le formalisme FMTHL (Fuzzy Metric Temporal Horn Logic) [140]. Il interprète les règles décrivant l'application et effectue notamment l'évaluation des prédicats logiques (état et action). Les fichiers sources en langage C sont disponibles en accès libre [167].

**Module d'exécution et de communication « SGTTraverse ».** Ce module contrôle les opérations du moteur d'inférences « F-limette ». Il lui communique à chaque pas temporel l'ensemble des règles et des prédicats d'état vérifiés et traite également les messages que lui retourne le moteur d'inférences. Cinq types d'information, distribués, dans cinq fichiers distincts, sont nécessaires. Ces informations décrivent :

- les règles standards communes à tout SGT,
- les règles de parcours d'un graphe et communes à tout SGT,
- la structure du graphe de situation de l'application à exécuter,
- les règles propres à l'application,
- l'ensemble des prédicats d'état liés aux paramètres des actions à réaliser.

Les fichiers sources en langage Java sont disponibles en accès libre [167].



### Adaptations apportées aux modules de base

Les modifications que nous avons apportées aux modules de base et aux règles de parcours d'un graphe constituent l'un des aspects originaux de notre utilisation des SGTs.

**Moteur d'inférences « F-limette ».** Il a été nécessaire d'ajouter de nouveaux types de prédicat d'action au moteur d'inférences « F-Limette ». Ceux-ci correspondent à l'appel des différentes procédures (disponibles sous la forme d'exécutables), mises en œuvre pour l'acquisition et la reconstruction 3D. Ces prédicats portent notamment sur :

- le test de la qualité de l'image acquise,
- la génération du masque,
- la comparaison du masque construit au masque prévue,
- la reconstruction 3D par lumière structurée,
- la comparaison des données réelles aux données de référence,
- etc.

Nous avons pour cela mis en place un échange bidirectionnel d'information entre le moteur d'inférences et les routines de traitement en exploitant les tubes de communication Linux (pipes). La figure 3.14 décrit l'architecture du logiciel et les échanges bidirectionnels implémentés. Les valeurs des prédicats d'état sont directement utilisés comme arguments d'entrée (par exemple, la valeur d'un paramètre, le chemin vers un fichier de données), lors de l'appel d'une routine de traitement. Enfin, la sortie standard du programme appelé est utilisée en mode lecture comme canal de communication.

Ce mécanisme de communication permet au moteur d'inférences de lire tous les arguments retournés par la routine de traitement et de les interpréter comme des valeurs de nouveaux prédicats d'état. Ces valeurs de prédicats peuvent être des valeurs numériques (résultats d'une opération) ou des messages d'erreur prédéfinis (raison de l'échec de la procédure, par exemple) que le SGT générique pourra interpréter afin de contrôler l'évolution des traitements, et donc la progression de l'application (processus de reconstruction 3D).

Afin d'optimiser la gestion des données, les routines de traitement n'échangent pas directement les images qu'elles traitent (en entrée comme en sortie). Celles-ci sont sauvegardées sous la forme de fichiers. Leurs chemins d'accès sont communiqués au moteur d'inférences sous la forme de prédicats. Ce système offre une grande souplesse d'utilisation (les chemins pouvant être aisément modifiés), permet de conserver une trace des traitements réalisés et simplifie l'échange d'information avec le module de planification.

**Le module d'exécution et de communication « SGTTraverse ».** Il a été modifié et adapté afin de pouvoir communiquer avec le module de planification (en exploitant à nouveau les tubes de communication Linux (pipes)), dans le but de lui transmettre, en particulier, les messages d'erreur retournés par les procédures de traitement.

### 3.4 Contrôle des têtes de mesure pour une reconstruction 3D partielle

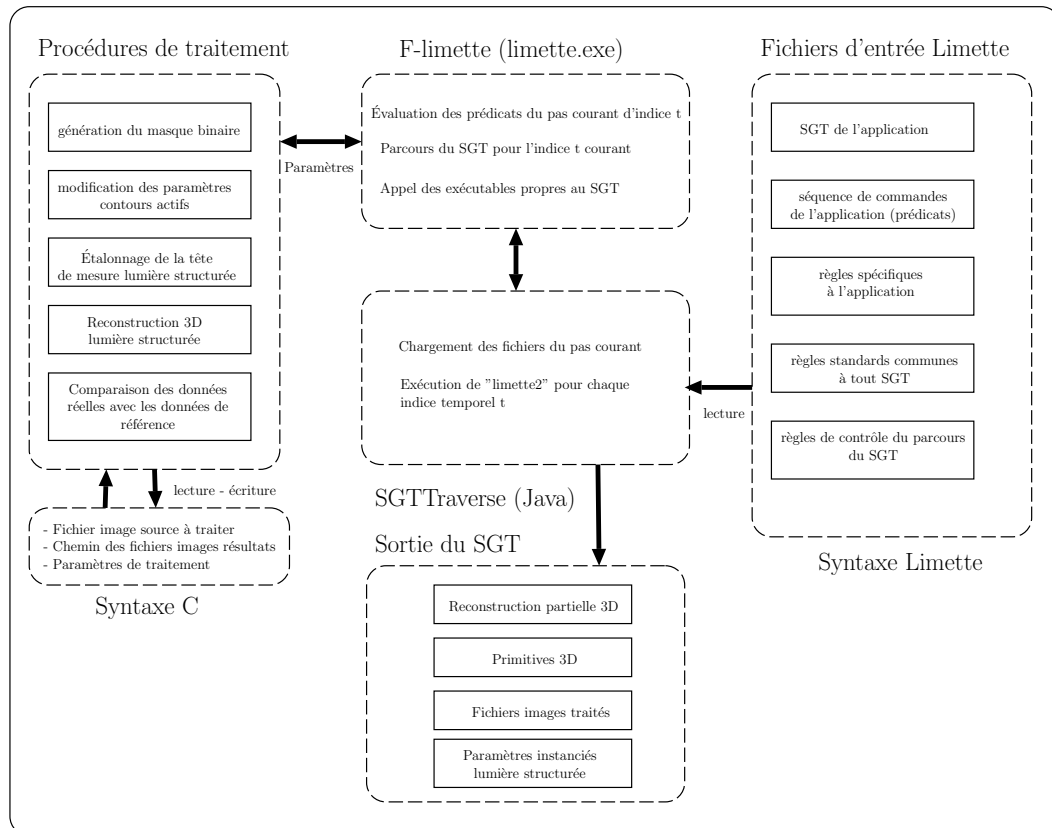


FIG. 3.14 – Architecture de l'implémentation logicielle (entrées-sorties du SGT générique).

L'instanciation complète du SGT est réalisée à partir d'un seul pas temporel. Il a donc été également nécessaire de redéfinir entièrement les règles de parcours d'un graphe. Ce fichier est propre au fonctionnement interne du SGT (orienté action) et donc indépendant de l'application (voir le Tableau 3.2 pour des exemples de règles constituant le fichier « SGTTraverse »). Il pourra donc être directement réutilisé, pour instancier de nouveaux graphes, par exemple ceux associés aux têtes de mesure « stéréoscopique » et « lumière polarisée ».

### Fichiers propres à la tête de mesure

Il est nécessaire de définir, pour chaque type de tête de mesure, les fichiers utilisés par le module de communication SGTTraverse. Ces fichiers portent sur :

- la description du graphe de situation (générée à l'aide de l'éditeur SGTEditor),
- les règles propres à l'application. Ces règles sont construites après avoir défini l'ensemble des prédicats d'état (paramètres nécessaires aux procédures de traitements, figures de mérite, etc.) et des prédicats d'action (traitements à effectuer),
- les prédicats d'état utilisés pour initier le parcours du graphe (ceux-ci sont fournis par le module de planification ; voir le chapitre suivant).

Le Tableau 3.3 donne un exemple de graphe générique dans sa forme textuelle.

Deux exemples de fichiers propres à l'application reconstruction 3D sont donnés dans le Tableau 3.4 (« règles propres à l'application » et « prédicats d'état »).

### 3.4.5 Exemple de reconstruction 3D partielle mettant en œuvre un contrôle de l'illumination

Nous avons présenté dans la section 3.4.2 un exemple d'application du graphe générique destiné au contrôle de la tête de mesure « lumière structurée ». L'application de ce graphe conduit à des ajustements locaux, mais une description 3D partielle de l'objet peut être générée sans avoir recours à un ajustement global. Autrement dit, sans avoir besoin d'instancier la situation « planification\_dynamique ». Afin de valider l'approche permettant de mettre en œuvre une adaptation dynamique du graphe aux conditions effectives d'acquisition, nous allons présenter un exemple d'application du même graphe générique, mais conduisant automatiquement à un comportement dynamique, non prévu lors de la phase de planification. Dans cet exemple, des situations spécifiques seront instanciés afin de modifier les paramètres physiques de l'application.

La figure 3.15 illustre l'instanciation du graphe générique en cas de replanification dynamique (les chiffres en gras indiquent l'ordre d'instanciation des situations nécessaires à une reconstruction partielle incluant une modification des paramètres d'éclairage).

La séquence d'opérations sans ajustement est la suivante :

- déplacement > acquisition > traitement > reconstruction\_partielle

TAB. 3.2 – Exemples de règles constituant le fichier « SGTTraversal » (règles de contrôle du parcours du SGT).

```
always (traversal_end(S,Vars) :-
  (
    (
      sgt_end_sit(S),
      sgt_sit_of_graph(S,G),
      sgt_root_graph(G),
      writeln('FINISHED')
    );
    (
      ci(Low,High),
      writeln('STORED'),
      writeln({Low}),
      writeln(S),
      writeln(Vars)
    )
  )
).
always (traversal_run(Vars) :-
  (
    sgt_vars(Vars),
    sgt_root_graph(G),
    sgt_sit_of_graph(S,G),
    sgt_start_sit(S),
    traversal_instantiate_situation(S,Vars)
  )
).
always (traversal_instantiate_situation(S,Vars) :-
  (
    (
      sgt_incr_state(S,Vars),
      traversal_do_actions(S,Vars),
      !,
      (
        traversal_specialize_situation(S,Vars);
        traversal_predict_from_situation(S,Vars,SitTo);
        traversal_end(S,Vars)
      )
    )
  )
).
```

TAB. 3.3 – Description textuelle du graphe de situations généré (partie du graphe représenté figure 3.7).

```
// automatically generated by SGTeditor.
//
DEFAULT NONINCREMENTAL GREEDY PLURAL DEPTH TRAVERSAL;
GRAPH gr_ED_SITGRAPH6
{
  START SIT sit_ED_SIT19 :
    sit_ED_SIT20
  {
    reconstruct_3d(aktif);
  }
  {
    NONINCREMENTAL remiseAZero(ResPlan);
    NONINCREMENTAL remiseAZero(ResRP);
    NONINCREMENTAL remiseAZero(ResComp);
    NONINCREMENTAL affiche(sit_root_3D);
    NONINCREMENTAL initSortieSGT(ExecutionSGT);
  }
  FINAL NONINCREMENTAL SIT sit_ED_SIT20
  {
    true;
  }
  {
    NONINCREMENTAL affiche(sit_sortie_root);
    NONINCREMENTAL affiche(resultatSGT(ExecutionSGT));
  }
}
GRAPH gr_ED_SITGRAPH7 : sit_ED_SIT19
{
  SIT sit_ED_SIT26 :
    sit_ED_SIT22 (ResReco),
    sit_ED_SIT21
  {
    validPlan(ResReco);
  }
  {
    NONINCREMENTAL affiche(sit_PD(ResReco));
    NONINCREMENTAL planDyna(ImageAcquise, ResPlan);
    NONINCREMENTAL affiche(sit_PD(ResPlan));
  }
}
```

### 3.4 Contrôle des têtes de mesure pour une reconstruction 3D partielle

---

TAB. 3.4 – Exemple de fichiers : (a) Fichier « règles propres à l'application ». (b) Fichier « prédicats d'état » liés à la tête de mesure.

```
(a)
always ( processfini(Argument) :-
  reconstruction(Valeur),
  Valeur == Argument
).
always ( capteur(Argument) :-
  vecteur(Compteur, Inc),
  Compteur == Argument
).
always ( déplacement(Source, Cible) :-
  déplacementExe(Source, 10.0, Cible)
).
always ( modifPos(Source, Cible) :-
  Seuil is 25.0,
  modifPosExe(Source, Seuil, Cible)
).
always ( tete_de_mesure(Argument) :-
  camera(Valeur),
  Valeur == Argument
).
always ( acquisition(Fichier, Resultat) :-
  acquisImageExe(Fichier, Resultat)
).
always ( traitement(Fichier, Resultat) :-
  traitementExe(Fichier, Resultat)
).
always ( reconPar(Fichier, Resultat) :-
  reconParExe(Fichier, Resultat)
).
always ( etalonCamera(Fichier, Resultat) :-
  etalonCameraExe(Fichier, Resultat)
).
always ( reconsLS3D(Fichier, Resultat) :-
  reconsLS3DExe(Fichier, Resultat)
).
always ( compFigMerit(Fichier, Resultat) :-
  compFigMeritExe(Fichier, Resultat)
).

(b)
1 ! reconstruction(aktif).
1 ! nomFichier("/home/Manip_These/initialisationA.txt").
1 ! nomFichierMasq("/home/Manip_These/initialisationC.txt").
```

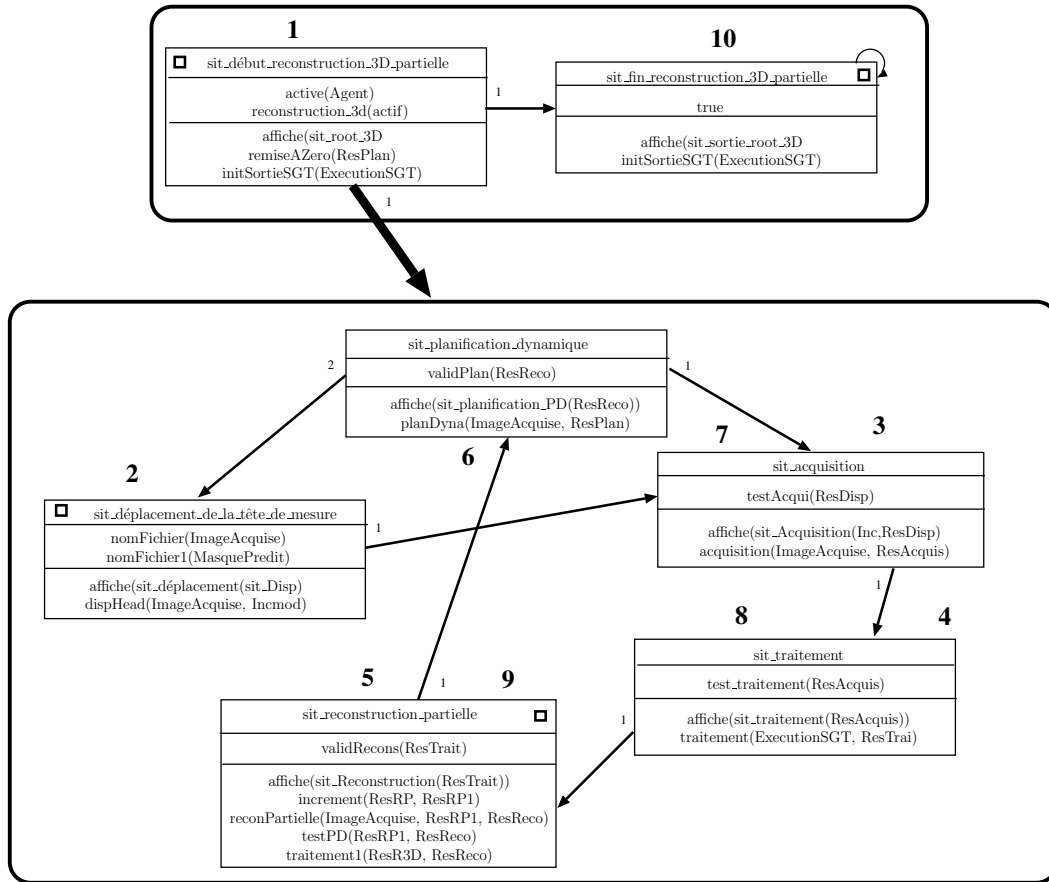


FIG. 3.15 – Comportement du graphe générique en cas de replanification dynamique.

### 3.4 Contrôle des têtes de mesure pour une reconstruction 3D partielle

---

Dans ce cas de figure, les primitives géométriques mesurées satisfont aux critères de correspondance avec les primitives prévues. En cas d'ajustement, pour tenir compte des erreurs de planification et/ou des conditions réelles de prise de vue, la séquence d'opérations devient :

- déplacement > acquisition > traitement > reconstruction\_partielle > planification\_dynamique > acquisition > traitement > reconstruction\_partielle.

On peut observer que la deuxième séquence d'opérations comporte un appel à une re-planification dynamique dans son cycle de reconstruction 3D. La situation « planification\_dynamique », dans cet exemple, donne la préférence à une correction des conditions d'éclairage ; ce qui se traduit dans le graphe par une ré-instanciation de la situation « acquisition » après redéfinition des paramètres correspondant. Lorsque le graphe instancie cette dernière, la tête de mesure refait une acquisition, avec les nouvelles conditions d'illumination (*i.e.*, avec un contraste image modifié). Le graphe enchaîne ensuite avec les traitements en instanciant la situation « traitement », qui à son tour reprend les mêmes traitements que pendant le premier cycle, mais sur des images dont le contraste a été modifié. La situation de fin du graphe « reconstruction\_partielle » achève les traitements en fournissant de nouveaux points 3D. Une nouvelle comparaison des données 3D mesurées avec celles du modèle de référence montre que la qualité de la reconstruction, à la suite de la modification des paramètres, est améliorée. Le graphe valide donc le nouveau nuage de points 3D obtenu. La figure 3.16 illustre l'enchaînement de ces opérations.

On peut, cependant, envisager plusieurs appels au cycle de « planification\_dynamique », par exemple dans les cas où la première correction n'a pas conduit à des résultats acceptables. Le graphe dans cette situation exécute autant de cycles (boucles) que nécessaires, jusqu'à l'obtention du niveau de qualité souhaitée. Si cette qualité ne peut être atteinte, et après plusieurs tentatives (dont le nombre est fixé *a priori* par le système de planification), le graphe génère un prédicat indiquant l'impossibilité d'obtenir la reconstruction 3D souhaitée. Les essais montrent que l'approche proposée permet effectivement au système de planification de modifier son comportement en fonction du résultat des traitements. Un exemple de fichier résultat décrivant le parcours du graphe lors d'une replanification dynamique est donné dans le Tableau 3.5.

La figure 3.17 montre un résultat de reconstruction 3D partielle (issue d'une séquence d'acquisitions différente de celle correspondante à la figure 3.7) obtenu à la suite d'un parcours du graphe incluant un changement de comportement (instanciation de la situation « planification\_dynamique » et correction des conditions d'acquisition, ici de l'éclairage).



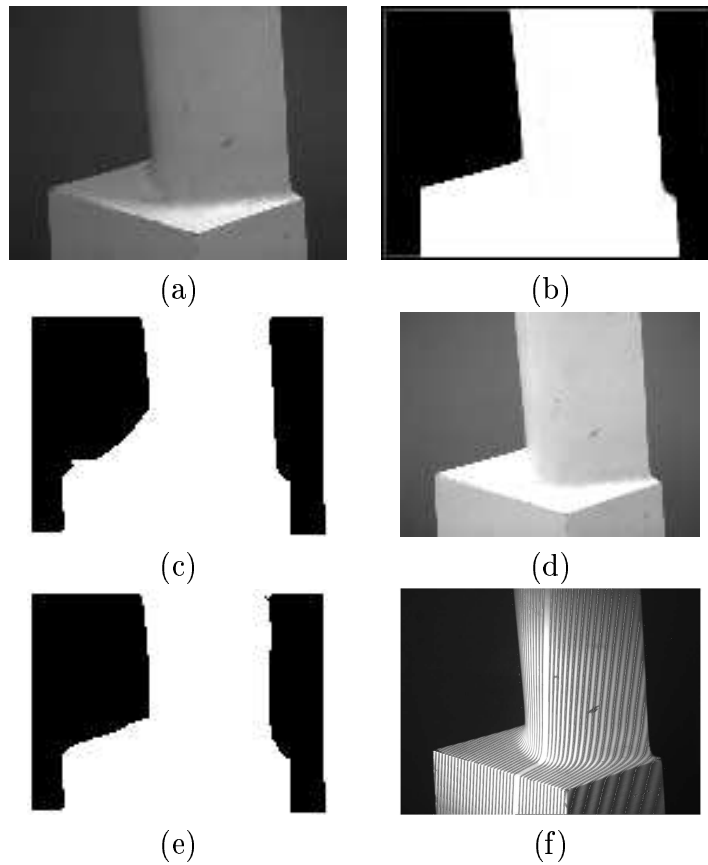


FIG. 3.16 – Reconstruction partielle avec appel à la planification dynamique. Modification des conditions d'éclairage. (a) Image pale de turbine. (b) Masque binaire prévu. (c) Masque binaire construit. (d) Image acquise après modification de l'intensité lumineuse. (e) Masque binaire correspondant. (f) Image franges avec masque.

### 3.4 Contrôle des têtes de mesure pour une reconstruction 3D partielle

---

TAB. 3.5 – Séquence des schémas de situation instanciés durant le parcours du graphe générique. (a) Instanciations correspondant aux primitives prévues *a priori*. (b) Instanciation à la suite d'un appel à une replanification dynamique.

(a)

```
LimetteShell running.
new_answer.elementAt(0)-->1 : 1 ! sit_root_3D.
new_answer.elementAt(1)-->1 : 1 ! sit_Disp.
new_answer.elementAt(3)-->1 : 1 ! sit_Aquis(10,0).
new_answer.elementAt(4)-->1 : 1 ! sit_AcquisLS.
new_answer.elementAt(5)-->1 : 1 ! sit_TestImage.
new_answer.elementAt(6)-->1 : 1 ! sit_ValidContraste.
new_answer.elementAt(7)-->1 : 1 ! sit_Trait(0).
new_answer.elementAt(8)-->1 : 1 ! sit_GenMasque.
new_answer.elementAt(9)-->1 : 1 ! sit_ContActifs.
new_answer.elementAt(10)-->1 : 1 ! sit_contours.
new_answer.elementAt(11)-->1 : 1 ! sit_validation.
new_answer.elementAt(12)-->1 : 1 ! sit_CompMasque.
new_answer.elementAt(13)-->1 : 1 ! sit_SegFranges.
new_answer.elementAt(14)-->1 : 1 ! sit_ValFranges.
new_answer.elementAt(15)-->1 : 1 ! sit_ReconP(0).
new_answer.elementAt(16)-->1 : 1 ! sit_NuaPoin3D.
new_answer.elementAt(17)-->1 : 1 ! sit_ValMaillage.
new_answer.elementAt(18)-->1 : 1 ! sit_sortie_root.
new_answer.elementAt(19)-->1 : 1 ! resultatSGT(0).
new_answer.elementAt(20)-->FINISHED
new_answer.elementAt(21)-->yes
1 : 1 ! resultatSGT(0).
```

(b)

```
LimetteShell running.
new_answer.elementAt(0)-->1 : 1 ! sit_root_3D.
new_answer.elementAt(1)-->1 : 1 ! sit_Disp.
new_answer.elementAt(7)-->1 : 1 ! sit_Aquis(10,0).
new_answer.elementAt(12)-->1 : 1 ! sit_AcquisLS.
new_answer.elementAt(13)-->1 : 1 ! sit_TestImage.
new_answer.elementAt(14)-->1 : 1 ! sit_ValidContraste.
new_answer.elementAt(15)-->1 : 1 ! sit_Trait(0).
new_answer.elementAt(20)-->1 : 1 ! sit_GenMasque.
new_answer.elementAt(21)-->1 : 1 ! sit_ContActifs.
new_answer.elementAt(22)-->1 : 1 ! sit_contours.
new_answer.elementAt(27)-->1 : 1 ! sit_validation.
new_answer.elementAt(28)-->1 : 1 ! sit_CompMasque.
new_answer.elementAt(29)-->1 : 1 ! sit_SegFranges.
new_answer.elementAt(30)-->1 : 1 ! sit_ValFranges.
new_answer.elementAt(31)-->1 : 1 ! sit_ReconP(0).
new_answer.elementAt(36)-->1 : 1 ! sit_NuaPoin3D.
new_answer.elementAt(37)-->1 : 1 ! sit_ValMaillage.
new_answer.elementAt(38)-->1 : 1 ! sit_PD(0).
new_answer.elementAt(44)-->1 : 1 ! sit_FigMEchec.
new_answer.elementAt(45)-->1 : 1 ! sit_ValEclge.
new_answer.elementAt(46)-->1 : 1 ! sit_Aquis(10,0).
new_answer.elementAt(51)-->1 : 1 ! sit_AcquisLS.
new_answer.elementAt(52)-->1 : 1 ! sit_Trait(0).
new_answer.elementAt(57)-->1 : 1 ! sit_GenMasque.
new_answer.elementAt(58)-->1 : 1 ! sit_ContActifs.
new_answer.elementAt(59)-->1 : 1 ! sit_contours.
new_answer.elementAt(64)-->1 : 1 ! sit_validation.
new_answer.elementAt(65)-->1 : 1 ! sit_CompMasque.
new_answer.elementAt(66)-->1 : 1 ! sit_SegFranges.
new_answer.elementAt(67)-->1 : 1 ! sit_ValFranges.
new_answer.elementAt(68)-->1 : 1 ! sit_ReconP(0).
new_answer.elementAt(73)-->1 : 1 ! sit_NuaPoin3D.
new_answer.elementAt(74)-->1 : 1 ! sit_ValMaillage.
new_answer.elementAt(75)-->1 : 1 ! sit_sortie_root.
new_answer.elementAt(76)-->1 : 1 ! resultatSGT(0).
new_answer.elementAt(77)-->FINISHED
new_answer.elementAt(78)-->yes
1 : 1 ! resultatSGT(0).
```

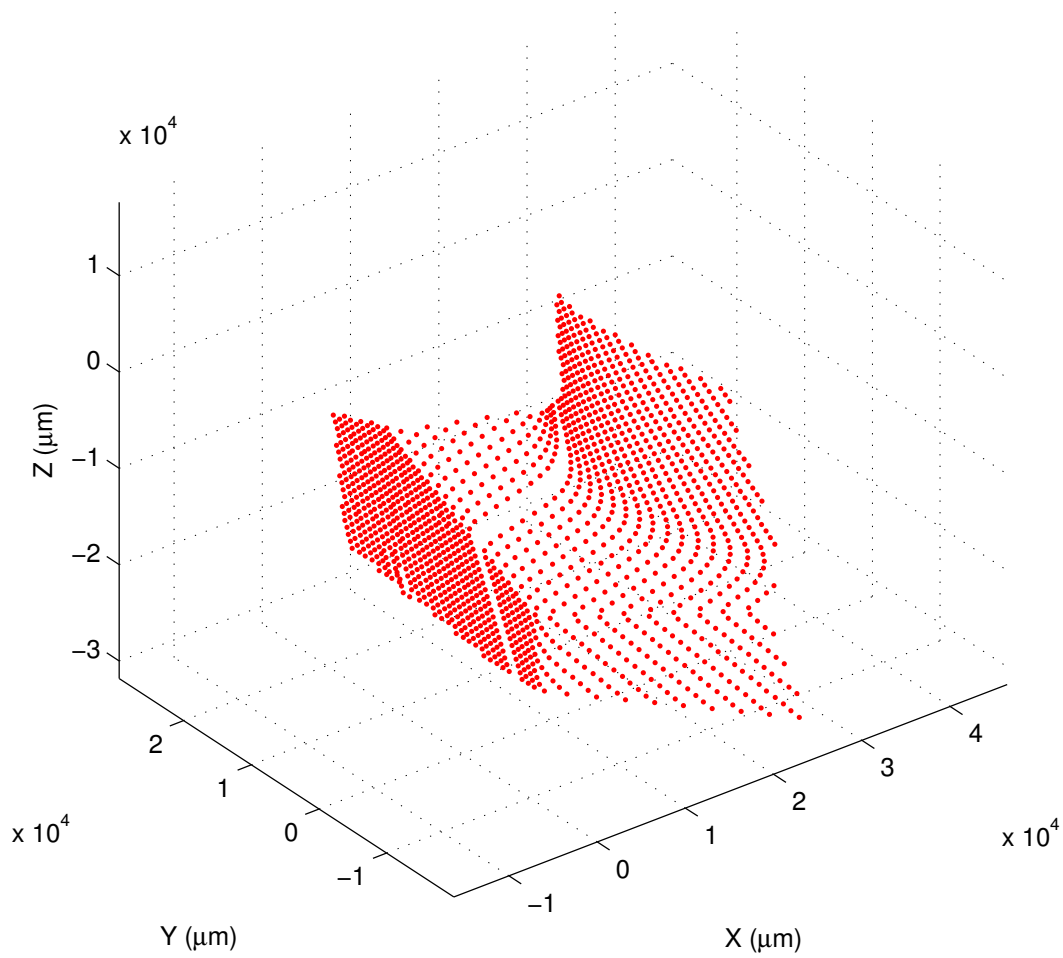


FIG. 3.17 – Nuage de points 3D obtenue à la suite d'une modification des conditions d'acquisition (après appel à une replanification dynamique).

## 3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, un système de contrôle de la tête de mesure « lumière structurée » a été décrit en exploitant les capacités de modélisation comportementale du formalisme des graphes de situations. Ce module réalise l'ensemble des opérations d'acquisition et de reconstruction 3D partielle, en fonction de critères définis par le module de planification.

La modélisation du comportement de la tête de mesure consiste à prévoir, hors ligne, tous les enchaînements possibles de traitement nécessaires pour obtenir une description partielle 3D de l'objet à évaluer (déplacement de la tête de mesure, acquisition, traitement d'image, reconstruction 3D partielle, et comparaison des données 3D mesurées avec celles de référence). La représentation sous la forme de situations et de graphes spécialisés s'avère être particulièrement adaptée puisqu'elle permet la mise en place de cycles au sein d'un graphe.

Pendant le parcours du graphe, seules certaines situations sont effectivement instanciées, en fonction de paramètres définis *a priori*, des conditions réelles d'acquisition et du résultat des traitements effectués en ligne. Si nécessaire, une adaptation automatique se fait à deux niveaux : dans un premier temps, par le biais de boucles de correction locales, spécifiques à chaque situation, puis, le cas échéant et dans un second temps, globalement en modifiant les conditions de prise de vue affectant négativement certaines procédures de traitement. Ce comportement, orienté action, se distingue de l'utilisation classique des SGTs et a nécessité une modification en profondeur du mode de fonctionnement des SGTs.

La conception du graphe a été menée pour une tête de mesure « lumière structurée ». Mais, seules des modifications mineures sont nécessaires si l'on souhaite adapter le graphe à d'autres systèmes de mesure (stéréovision ou lumière polarisée, par exemple).

Un second module, à partir d'une synthèse des connaissances *a priori* liées à l'application, alimente le module de contrôle de la tête de mesure présenté dans ce chapitre et exploite, en retour, les reconstructions partielles, afin d'évaluer dimensionnellement l'objet à analyser. Ce deuxième module fait l'objet d'une étude détaillée dans le chapitre suivant.



# Chapitre 4

## Planification de la reconstruction 3D complète et de l'évaluation dimensionnelle

### 4.1 Introduction

Notre application de contrôle qualité de pièces manufacturées nécessite la coordination d'un ensemble de processus permettant l'acquisition des données, leur comparaison avec un modèle de référence ainsi que leur évaluation dimensionnelle. L'enchaînement de ces traitements est déterminé *a priori* et hors ligne par un opérateur (disposant d'une expertise assez pointue du domaine). Cet opérateur élabore la séquence d'acquisitions et formalise l'ensemble des traitements à réaliser sous la forme d'un graphe pour un module de contrôle. Ce graphe de contrôle dirige les opérations du module en charge du contrôle de la tête de mesure en lui fournissant, pour chaque étape de la séquence, l'ensemble des paramètres fixés *a priori*, et nécessaires, en particulier, pour localiser la tête de mesure, pour fixer le type des procédures à exécuter (stéréovision et/ou lumière structurée) et les valeurs des paramètres de ces procédures. Une description 3D partielle est ensuite retournée au graphe de contrôle qui va l'exploiter, afin de compléter la reconstruction de l'objet, et enfin procéder à l'inspection dimensionnelle. La coopération des deux modules « graphe de contrôle » et « SGT » forme ce que nous avons appelé « système de planification cognitif ». Le dispositif est illustré figure 4.1.

Nous présentons dans la section 4.1 les systèmes de placement des caméras. Le système d'acquisition ainsi que les différentes procédures de reconstruction et d'évaluation dimensionnelle sont décrits dans la section 4.2. Le système de planification développé, ainsi que quelques résultats liés à une reconstruction 3D complète d'un objet, permettant de valider notre approche, sont détaillés dans la section 4.3. La section 4.4 présente quelques perspectives pour des travaux futurs. Une conclusion est tirée section 4.5.

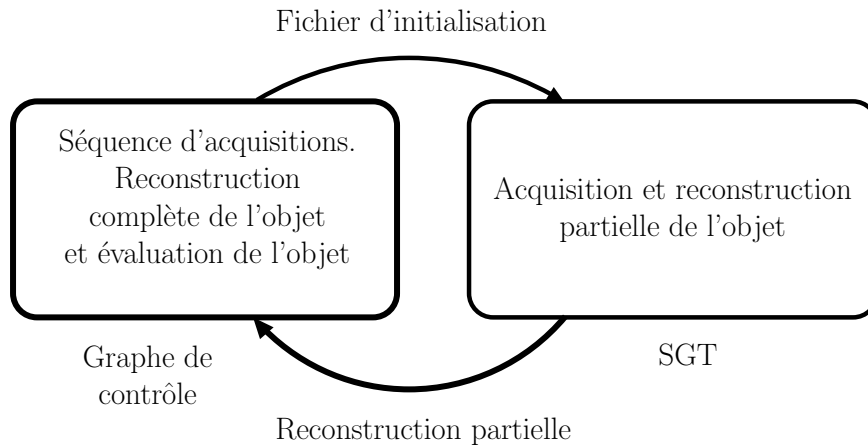


FIG. 4.1 – Vue d'ensemble du système de planification.

### 4.1.1 Planification du placement de caméras en vue de mesures 3D

La photogrammétrie a pour but, entre autres, la mesure des dimensions d'un objet à partir d'images. La photogrammétrie à courte distance ou photogrammétrie rapprochée<sup>1</sup> (dont notre application fait partie) porte sur des objets se situant à une distance comprise entre  $1m$  et  $100m$ . Il est important de noter que nous cherchons à obtenir des mesures tridimensionnelles de précision, ce que de telles approches permettent. Cette précision est en partie liée à la configuration des caméras (têtes de mesure) lors des prises de vue. Plusieurs travaux dans la littérature ont en effet montrés que la disposition spatiale des caméras détermine en partie la précision du système [7]. Une telle configuration dans l'espace est appelée réseau de caméras, et quelques travaux portent sur l'optimisation d'un tel réseau. Dans le cas d'une application portant sur l'inspection dimensionnelle de pièces manufacturées, le réseau de caméras est modélisé par les déplacements d'une tête de mesure autour de l'objet. Le problème d'optimisation peut être vu ici comme un problème de placement par le système de planification du capteur, en prenant en compte les conditions réelles de prise de vue.

La direction de la tête de mesure par rapport à l'objet conditionne la précision de détection des points-objets. En vue d'optimiser le processus de mesure, une attention particulière doit être apportée à la phase de conception du réseau. La conception d'un réseau de caméras est toujours une tâche complexe, car plusieurs éléments conditionnent le placement du capteur. On peut citer le type et le nombre de caméras utilisées, la mesure à partir des images (procédures de traitement), le point de vue (position et orientation) de chaque caméra. L'automatisation du processus de placement des caméras, de façon à obtenir une configuration donnant un résultat optimal (mesure 3D précise), est donc délicate à réaliser.

Un tour d'horizon des principaux travaux liés à l'automatisation de l'utilisation d'un

---

<sup>1</sup>en anglais "close range photogrammetry"

## 4.2 Système d'acquisition et d'évaluation

---

système multi-capteur, dans le but de réaliser des mesures 3D de grande précision, permet de dégager plusieurs points communs dans ces travaux ([114, 107, 51, 164, 31]) :

- la complexité d'une automatisation de cette tâche, en raison du grand nombre de contraintes géométriques et optiques à prendre en compte (géométrie, champ de vision, résolution, mise au point, espace de travail et visibilité),
- L'utilisation d'un volume de mesure sous la forme d'une sphère simplifie le choix de la zone de placement des caméras,
- une discrétisation de l'espace est nécessaire afin d'éviter une recherche exhaustive irréaliste (en particulier, si le nombre de caméras est élevé).

Concevoir un système capable de contrôler un capteur dans le but d'avoir des mesures 3D de bonne qualité demeure donc une tâche très complexe. Les connaissances *a priori*, ainsi que l'importance de l'expertise de l'opérateur, sont des aspects cruciaux pour la conception d'un système de planification. Nous nous sommes basé, dans le développement de notre système de planification, sur une analyse détaillée de la chaîne d'inspection dimensionnelle à mettre en place. On se limite ainsi explicitement à l'analyse de l'expertise et du savoir-faire d'un opérateur expérimenté en matière de planification des opérations nécessaires à une reconstruction 3D de pièces manufacturées.

## 4.2 Système d'acquisition et d'évaluation

Nous allons présenter dans cette section les éléments constituant le système de mesure, les modèles de référence des objets, ainsi que les différentes procédures de reconstruction et d'évaluation 3D mises en œuvre (voir figure 4.5).

### 4.2.1 Robot de mesure

**Structure du robot.** Le robot de mesure est composé d'une structure circulaire sur laquelle peuvent se déplacer des bras articulés portant les têtes de mesure (le volume de mesure correspond à une demi-sphère d'un rayon de 2 mètres (voir figure 4.2(a))). Les têtes de mesures (stéréovision et lumière structurée) sont positionnées à l'extrémité des bras et de multiples sources lumineuses, contrôlées indépendamment les unes des autres, sont disposées autour de l'objet à inspecter. Dans une telle configuration, les têtes de mesure se déplacent autour de l'objet immobile. La position et l'orientation des têtes de mesure sont exprimées dans le repère de référence global du système d'acquisition. La position et l'orientation approximatives de l'objet dans le repère global, ainsi que celles des sources lumineuses, sont supposées être connues. Les expériences ont été menées sur une version prototype du robot de mesure, afin de mieux contrôler les conditions expérimentales. Il est constitué d'une table de contrôle micrométrique, supportant l'objet à évaluer, de la tête de mesure « lumière structurée » ainsi que de plusieurs sources lumineuses réparties autour de l'objet. La table d'essais modélise toutes les conditions d'utilisation du robot d'inspection, à la seule différence près que, dans cette configuration, l'objet est déplacé devant le système d'acquisition (ce déplacement est effectué en translation et en rotation





FIG. 4.2 – (a) Vue générale du robot de mesure (plate-forme d'acquisition). (b) Version prototype du robot de mesure.

dans le repère global du système d'acquisition). La figure 4.2(b) donne une illustration de cette version prototype du robot de mesure.

**Les têtes de mesure.** Nous présentons dans ce paragraphe les deux têtes de mesure disponibles (tête stéréoscopique et tête « lumière structurée »). Afin de valider notre système de planification, nous avons choisi d'utiliser uniquement la tête de mesure « lumière structurée », la plupart des procédures de traitement étant disponibles et validées. Néanmoins, le système de planification développé peut aussi prendre en charge le contrôle de la tête stéréoscopique, comme cela sera montré dans la section 4.4.1.

**1. Tête stéréoscopique.** Elle est composée de deux caméras CCD standards et permet d'effectuer des acquisitions stéréoscopique [74]. La détermination des coordonnées 3D des points de contour est réalisée en utilisant le couple d'images gauche et droite. Il est aussi nécessaire de s'assurer de la qualité des traitements ; nous utilisons pour cela un système à base de connaissances permettant l'extraction contrôlée de contours en fonction de leur contexte local (*i. e.*, leur distribution locale de niveaux de gris) (Knowledge-Based Edge Detection (KBED<sup>2</sup>) [11]). L'étape d'appariement [41] entre les points de contour des images droite et gauche met quant à elle à profit des images de synthèse générées à l'aide du logiciel CATIA<sup>3</sup>. Ces images sont construites à partir d'un modèle CAO de l'objet en tenant compte du point de vue associé à chaque caméra, ainsi que de leurs paramètres d'étalonnage. Le modèle CAO [41] joue aussi un rôle essentiel pendant l'analyse dimensionnelle fine de l'objet, puisqu'il permet une comparaison des images acquises avec leurs modèles synthétiques (le modèle géométrique de l'objet est utilisée pour déterminer la correspondance entre les primitives de référence et celles mesurées). L'intérêt majeur de la méthode est sa capacité à évaluer la géométrie de l'objet. Les

<sup>2</sup>KBED. Système expert implémenté dans le système de vision artificielle développé par notre équipe. Ce système repose sur une architecture logicielle du type tableau noir exploitant une organisation hiérarchique de la connaissance.

<sup>3</sup>CATIA. Logiciel de CAO de Dassault Systems.

## 4.2 Système d'acquisition et d'évaluation

---

primitives géométriques 3D générées sont du type points, segments et ellipses, pour lesquelles la précision de la reconstruction est de l'ordre de 10 à 100 micromètres.

**2. Tête « lumière structurée ».** Elle est constituée d'une caméra CCD standard couplée à un projecteur de lumière structurée. L'information 3D est obtenue par l'étude de la déformation de la projection d'un motif lumineux régulier (en l'occurrence des franges verticales alternativement noires et blanches) sur l'objet à analyser. La méthode de reconstruction par lumière structurée permet de mesurer des surfaces. Les primitives géométriques 3D générées sont du type points, bsplines, etc. La précision des coordonnées 3D des points observés est de l'ordre de 20 micromètres pour un champ de vision de 5cm x 5cm [64].

Compte tenu du champ de vision limité des têtes de mesure (limite permettant d'assurer l'obtention de la précision souhaitée pour une application), il est nécessaire de faire varier le point d'observation afin de couvrir la totalité de l'objet. Il est donc nécessaire d'acquérir une séquence spatiale d'images de la scène à évaluer ; on détermine ensuite pour chaque acquisition (pour chaque point de vue de la tête de mesure) une description 3D partielle de l'objet. La séquence de descriptions qui en résulte consiste en un ensemble de nuages de points dont les coordonnées 3D sont exprimées dans le repère du capteur. Une procédure de recalage est enfin appliquée deux à deux aux descriptions, afin d'exprimer l'ensemble des coordonnées dans un même repère de référence [64]. Nous présenterons en détail cette technique de recalage dans la section 4.2.3.

**Sources lumineuses** Dans une application d'inspection dimensionnelle, la qualité de l'éclairage est primordiale. Une procédure contrôlant l'intensité lumineuse des différentes sources, fixes, est donc prévue dans notre système de mesure. Chaque source est caractérisée par son modèle d'illumination [89] et peut être contrôlée de manière indépendante. Il est ainsi possible d'augmenter le contraste de l'image en cas de faible luminosité (ou de le réduire en cas de forte luminosité). Il est également possible d'éliminer certains artefacts visuels tels que des ombres induites par la position relative des bras de mesure et du capteur ou liées à la structure même de la pièce analysée.

**Importance des sources lumineuses.** Afin d'obtenir des images avec un contraste adapté, il est nécessaire d'utiliser un éclairage adéquat. Le choix de l'éclairage optimal n'est pas facile à établir. Plusieurs expériences sont nécessaires pour converger vers une « bonne » solution. Ce choix reste par ailleurs lié au type d'objets à étudier (caractéristiques des surfaces, matière, forme, etc.) ainsi qu'à la méthode d'acquisition utilisée (dans notre cas, une approche « lumière structurée »). Un ensemble de paramètres est ainsi à considérer :

- distribution spatiale de l'éclairage, s'il y a lieu,
- spectre de longueurs d'onde, s'il y a lieu,
- influence de la lumière ambiante,
- etc.

## 4.2.2 Modèle de référence de l'objet

Rappelons que le but de notre application est l'inspection dimensionnelle. Il est pour cela indispensable de mettre à profit certaines connaissances portant sur l'objet à analyser ainsi que sur son environnement. Les connaissances *a priori* correspondant à l'objet peuvent, par exemple, prendre la forme d'un modèle de référence « vérité terrain » ou d'un modèle CAO représentant des caractéristiques particulières de l'objet.

Le système de contrôle de la tête de mesure (basé sur les SGTs) exécute un ensemble de traitements conduisant à une reconstruction 3D partielle. Ces traitements exploitent la connaissance *a priori* sur les primitives déterminée pendant la phase de modélisation (masque binaire, franges, primitives à détecter, etc.), afin de contrôler l'obtention des résultats. La mesure dimensionnelle, reposant sur une comparaison des données 3D mesurées de l'objet avec son modèle de référence, est directement liée à la qualité de la modélisation de l'objet. C'est pour cette raison que la phase de modélisation de l'objet est primordiale. En effet, une mauvaise modélisation aura un impact sur les résultats, exprimé dans notre cas par de mauvaises valeurs pour les figures de mérite.

**1. Modèle CAO (Génération d'images conceptuelles).** En contrôle qualité, et en particulier pour notre application d'inspection dimensionnelle, les caractéristiques géométriques et les formes sont en général connues *a priori* pour une pièce donnée. Il est donc possible de modéliser une pièce dont les dimensions sont idéales. Pour cela, il est indispensable de définir une procédure de modélisation adéquate. Parmi les outils CAO existants, l'outil logiciel CATIA permet de concevoir des modèles 3D très précis, et de simuler l'acquisition des images, tout en contrôlant les paramètres d'illumination, les paramètres du capteur ainsi que la position de l'objet. L'avantage d'un tel modèle CAO est le fait qu'il ne contient pas de défauts et peut donc être utilisé comme modèle de référence dans l'application proprement dite.

La figure 4.3 présente la pièce « L » pour laquelle un modèle CAO a été développé [41] en utilisant l'atelier « Part Design » de CATIA et en choisissant une approche de type CSG (Constructive Solid Geometry). Le modèle 3D (ensemble de primitives géométriques de type contours et/ou surfaces) ainsi obtenu pour la pièce est présenté en figure 4.3(b). Une autre représentation, du type fil de fer (figure 4.3.c), met en avant les arêtes de la pièce, des éléments qui peuvent être utilisés pendant l'inspection de cette pièce à l'aide de la tête stéréoscopique. Les primitives géométriques utilisées, à savoir des segments de droites et des éléments elliptiques (cercles), présentent l'avantage de pouvoir être décrites précisément. Si l'on prend le cas de la pièce « pale de turbine », les primitives sont plus délicates à définir, puisque la pièce comporte des surfaces gauches pour lesquelles on ne dispose pas d'expression analytique.

Le système de planification doit non seulement disposer du modèle CAO de l'objet, mais aussi de l'ensemble des modèles partiels correspondant aux différentes prises de vue de la séquence d'acquisitions. Une simulation complète de la scène réelle a ainsi été réalisée à partir de la description des caractéristiques de l'objet ainsi que des conditions d'acquisition. Cette simulation prend en compte le modèle de l'objet, le modèle des

## 4.2 Système d'acquisition et d'évaluation

---

têtes de mesure (création de caméras virtuelles) et le modèle d'illumination (création de sources lumineuses virtuelles).

Une fois les modèles conceptuels partiels obtenus, on peut déduire de ces derniers les figures de mérite nécessaires à la phase de comparaison de la chaîne d'évaluation dimensionnelle. Cependant, le fichier descriptif des primitives généré automatiquement par CATIA n'est pas directement exploitable dans notre application. Ceci nous empêche, pour le moment, d'exploiter le modèle CAO pour l'inspection proprement dite. C'est pour cette raison que nous avons adopté pour les essais de validation un modèle de référence « vérité terrain ».

**2. Modèle « vérité terrain » (modèle MMT).** Nous disposons pour la pièce « pale de turbine » d'un modèle « vérité terrain » obtenu à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle (ensemble de points de mesure 3D bruts exprimés dans le repère de la machine à mesurer). Ce modèle servira de référence dans l'étape de comparaison effectuée par le graphe de contrôle.

Nous venons de voir que le système de planification a besoin d'un modèle partiel pour chaque évaluation partielle (procédure de validation des données 3D partielles). Le nombre de modèles partiels est égal au nombre de pas d'acquisition dans la séquence complète d'acquisitions. Pour nos essais de reconstruction 3D, nous avons définis une séquence de 4 acquisitions. Nous avons donc construit 4 modèles de référence « vérité terrain », en procédant de la manière suivante.

On applique la séquence d'acquisitions à une pièce étalon dans l'espace de mesure étalonné. On récupère, après chaque acquisition et après exécution de toute la chaîne de traitements et de reconstruction 3D, un nuage de points 3D correspondant à une position et une orientation données de la pièce (les coordonnées sont exprimées dans le repère de la tête de mesure). Ces nuages de points 3D sont ensuite utilisés comme modèles de référence lors de l'exécution de la même séquence sur un objet à inspecter. Contrairement au modèle CAO, le modèle « vérité terrain » n'offre pas une précision idéale. Cependant, les conditions particulières (éclairage contrôlé, déplacement précis de l'objet, etc.) avec lesquelles les modèles ont été obtenus permettent de valider notre système de planification, les modèles étant suffisamment fiables.

Les figures 4.3(f) à 4.3(i) donnent une illustration des quatre modèles obtenus par cette approche.

### 4.2.3 Procédures de reconstruction et d'évaluation

Le module en charge de la reconstruction 3D complète de l'objet et de son évaluation dimensionnelle fait appel à plusieurs procédures déjà développées, implémentées et validées dans notre équipe. Nous disposons ainsi de :

- une méthode de recalage d'une séquence de nuages de points 3D mesurés,
- une méthode de détermination d'un repère commun de référence,
- une méthode de comparaison des données mesurées avec des données de référence.

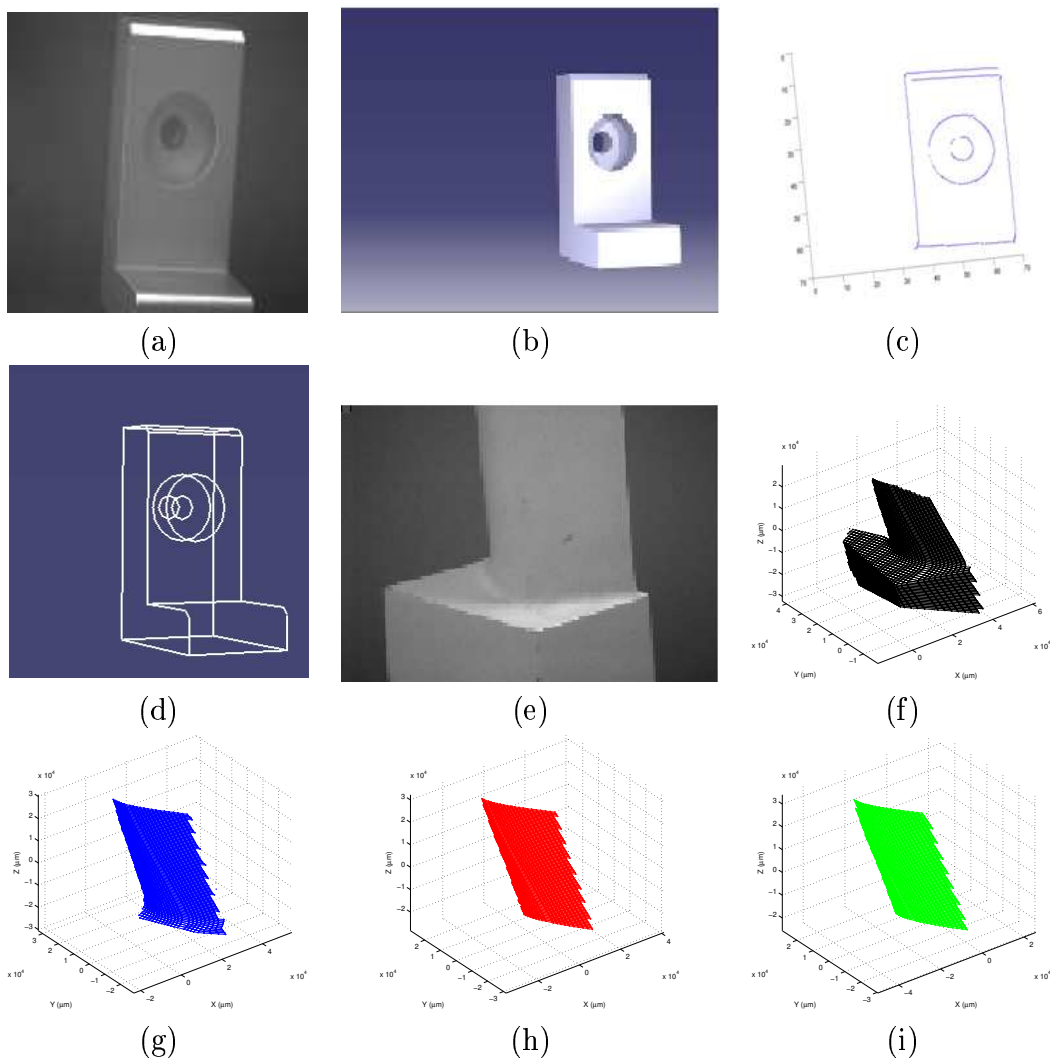


FIG. 4.3 – Modèles de référence utilisés dans le système d'inspection. (a) Image réelle de la pièce « L ». (b) Modèle CAO correspondant. (c) Contours 3D (pour un point de vue donné). (d) Modèle fil de fer. (e) Pièce « pale de turbine ». (f)-(i) Modèles de référence « vérité terrain » correspondant à 4 acquisitions planifiées.

## 4.2 Système d'acquisition et d'évaluation

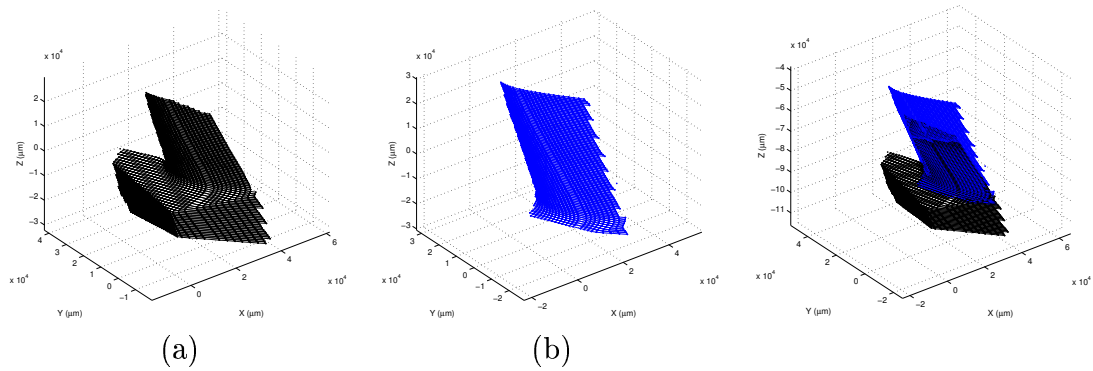


FIG. 4.4 – Recalage de deux nuages de points 3D. (a) Reconstruction partielle  $R3D_i$  (correspondant au pas d'acquisition d'indice  $i$ ). (b) Reconstruction partielle  $R3D_{i+1}$ . (c) Reconstruction  $R3D_i + R3D_{i+1}$  après recalage.

### Recalage

Afin d'obtenir une description 3D complète de l'objet, il est nécessaire de faire varier le point d'observation afin de couvrir la totalité de l'objet, et donc d'acquérir une séquence spatiale d'images de la scène à évaluer. La séquence d'images qui en résulte doit être recalée, afin d'exprimer l'ensemble des coordonnées dans un repère unique lié à la tête de mesure [64]. La procédure consiste à recalcr les nuages de points de proche en proche en utilisant un algorithme itératif minimisant la distance moyenne entre deux images consécutives [64].

Le recalage des nuages de points (dans nos essais, 4 nuages de points) exploite le recouvrement partielle des jeux de données. La procédure utilisée recalc, à chaque acquisition et après chaque reconstruction 3D partielle, deux nuages de points 3D en utilisant les paramètres décrivant le déplacement effectué entre deux acquisitions (translation et rotation). Elle fournit, en sortie, un fichier décrivant les deux nuages de points 3D dans un repère commun lié à la tête de mesure. La figure 4.4 montre un exemple de deux nuages de points 3D recalés.

Nous présentons ci-dessous l'algorithme itératif utilisé pour le recalage. Nous exploitons aussi largement cet algorithme dans notre procédure de comparaison des données réelles aux données de référence.

**Algorithme ICP** La procédure de recalage utilisée [64] repose sur l'algorithme ICP (Iterative Closest Point) [10]. Elle consiste à calculer, d'une manière itérative, une matrice de transformation recalant au mieux deux (ou plusieurs) ensembles de données 3D (points 3D, courbes ou surfaces). Une connaissance approximative de cette matrice est souhaitable, afin d'initialiser convenablement l'algorithme. Ce dernier comporte deux étapes : la mise en correspondance des données et l'estimation du changement de repères entre les images à recalcr (transformation de coordonnées). Le principe de la méthode est d'itérer ces deux étapes. Après chaque itération, l'algorithme fournit une liste de

points appariés et une estimation de la transformation. Cette transformation est utilisée pour mettre à jour la liste des points appariés de l'itération suivante. Cette liste ajustée servira à calculer une nouvelle estimation de la transformation. Ces étapes sont répétées jusqu'à convergence de l'algorithme, c'est-à-dire lorsque l'erreur résiduelle (somme des distances entre points appariés) est inférieure à un seuil fixé.

### **Détermination d'un repère commun de référence**

Afin de comparer les données acquises aux données de référence, il est nécessaire d'exprimer toutes les données dans un repère commun ; il s'agit donc de déterminer un repère de référence lié à la géométrie de l'objet (repère objet dans lequel le modèle de référence est exprimé), puis de calculer la transformation qui sera appliquée aux coordonnées exprimées dans le repère des têtes de mesure dans lequel les données 3D réelles sont exprimées (la méthode est détaillée dans [63]).

### **Comparaison des données mesurées aux données de référence**

Le processus d'évaluation de l'objet consiste à comparer les données 3D observées (nuages de points 3D) avec les données du modèle de référence correspondant (cf. 4.2.2). Les méthodes de comparaison de nuages de points 3D existantes dans la littérature traitent le problème de différentes manières. On peut citer celles qui nous paraissent le mieux convenir :

- méthodes de comparaison point à point (cas de nuages de points denses),
- méthodes surfaciques : après approximation des points par une surface (Bsplines, Nurbs, etc.), une comparaison des surfaces est effectuée.

**Comparaison partielle.** La comparaison partielle est utilisée dans le module de contrôle de la tête de mesure. En effet, une comparaison des données 3D partielles avec celles de référence est nécessaire afin d'activer ou désactiver la planification dynamique (voir chapitre 3). Nous avons jugé commode d'adopter, pour cette comparaison, la première méthode ci-dessus qui exploite les nuages de points 3D tels que obtenus à la suite de la reconstruction, sans faire l'approximation des points par une surface. Pour ce faire, nous nous sommes largement inspiré de l'algorithme ICP (cf. plus haut) utilisé dans la procédure de recalage, en arrêtant la procédure lorsque l'erreur résiduelle estimée par les moindres carrés atteint un seuil fixé *a priori* dans le système de planification, et habituellement du même ordre de grandeur que la résolution géométrique du capteur utilisé. Cependant, les points appartenant aux deux nuages ne sont pas identifiés. Un appariement est donc nécessaire si l'on veut éventuellement « gérer » les défauts détectés dans les données mesurées. Cette procédure reste à finaliser dans le système de planification développé. Par ailleurs, dans le cadre de nos essais de validation utilisant le modèle de référence « vérité terrain », nous n'avons pas besoin d'estimer les changements de repère. En effet, dans ce cas, les données de référence et mesurées sont exprimées dans le repère tête de mesure « lumière structurée ».

### 4.3 Planification d'une séquence d'évaluation

---

**Comparaison globale.** À la fin des traitements, une fois la séquence d'acquisitions terminée, une description 3D complète de l'objet est générée après recalage des descriptions partielles. Cette description 3D est évaluée en la comparant avec le modèle complet de l'objet (dans nos essais, le modèle « vérité terrain » MMT). Pour ce faire, nous approximations les données de référence par une surface [64]. Plus précise et plus complète que la comparaison partielle, la comparaison globale compare les données 3D réelles aux données de référence exprimées dans un même repère objet.

## 4.3 Planification d'une séquence d'évaluation

L'enchaînement des différentes procédures de traitement, en vue d'une reconstruction 3D complète de l'objet et de son évaluation dimensionnelle, est présenté dans la figure 4.5. Un opérateur élabore hors ligne la séquence d'acquisitions en fonction des connaissances *a priori* disponibles et formalise l'ensemble des traitements à réaliser sous la forme d'un graphe de contrôle. Ce dernier contrôle le SGT en lui fournissant, pour chaque étape de la séquence, l'ensemble des paramètres nécessaires, récupère en retour une reconstruction partielle de l'objet correspondant au point de vue courant de la tête de mesure. Le graphe de contrôle exploite cette description partielle afin de compléter la reconstruction de l'objet (recalage de données 3D) et de procéder à l'inspection dimensionnelle.

Nous allons présenter dans les sections suivantes l'ensemble des connaissances *a priori* exploitées par le graphe de contrôle, l'élaboration de la séquence d'évaluation dimensionnelle ainsi que le mécanisme de coopération entre les deux modules du système de planification.

### 4.3.1 Connaissances *a priori*

À partir du modèle de l'objet et des modèles de référence correspondant aux différentes prise de vue, nous pouvons extraire plusieurs informations qui sont ensuite utilisées dans les différentes étapes de la procédure de reconstruction 3D.

**1. Primitives géométriques.** Ce sont les nuages de points 3D fournis par la tête de mesure.

**2. Fenêtres d'intérêt.** Ces primitives délimitent les zones à traiter effectivement dans les images acquises.

**3. Figures de mérite.** Elles permettent d'évaluer la qualité des résultats des différents traitements effectués en ligne pendant la reconstruction 3D, à savoir :

- la stabilisation des contours actifs en un nombre maximum d'itérations (on limite le nombre d'itérations à  $N_{iter}$  afin de limiter la durée de construction du masque binaire),



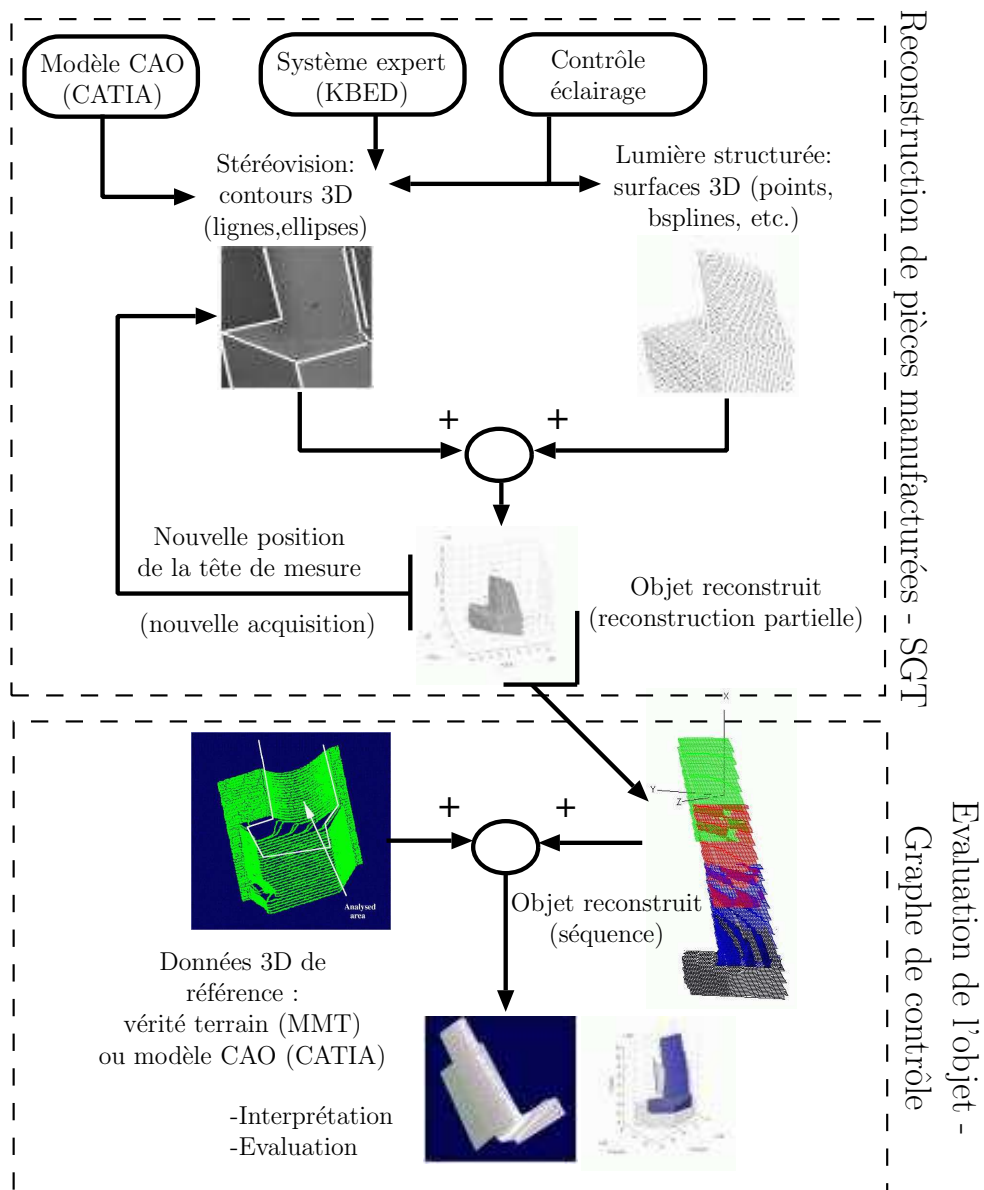


FIG. 4.5 – Étapes du processus de reconstruction 3D.

### 4.3 Planification d'une séquence d'évaluation

---

TAB. 4.1 – Primitives *a priori* et traitements associés dans la chaîne de reconstruction 3D.

| Primitives <i>a priori</i> | SGT  | Graphe de contrôle      |
|----------------------------|--|-------------------------|
| modèle CAO complet         | -  | évaluation 3D complète  |
| modèles 3D partiels        | comparaison de données réelles/conceptuelles       | évaluation 3D partielle |
| figures de mérite          | construction masque binaire                        | -                       |
| figures de mérite          | segmentation et numérotation de franges            | -                       |
| figures de mérite          | détermination des coordonnées 3D des points images | -                       |
| paramètres de traitement   | traitements 3D partiels                            | recalage                |
| paramètres d'éclairage     | traitements 3D partiels, planification dynamique   | -                       |
| fenêtres d'intérêt         | traitements 3D partiels                            | -                       |

- la cohérence du masque réel avec le masque de référence,
- le nombre de points 3D obtenus,
- la régularité du maillage des points 3D,
- etc.

**4. Paramètres d'acquisition.** Ils spécifient la position et l'orientation de la tête de mesure par rapport à l'objet, les paramètres d'illumination liés aux prises de vues.

**5. Informations image** Ces informations sont liées aux données images à traiter :

- masque 2D de référence et correspondant à l'objet dans l'image (exploité pour générer à l'aide des contours actifs le masque de l'objet dans l'image acquise),
- paramètres d'évolution des contours actifs,
- seuil du filtre réalisant la détection des franges,
- ligne de référence utilisée pour localiser la frange centrale nécessaire à la numérotation des franges,
- etc.

Le Tableau 4.1 récapitule les primitives définies *a priori* (connaissances), ainsi que l'ensemble des traitements susceptibles de les exploiter dans la chaîne de reconstruction 3D.

#### 4.3.2 Mise au point d'une séquence d'évaluation dimensionnelle

La conception d'une séquence d'acquisitions pour la reconstruction complète d'un objet et son évaluation dimensionnelle nécessite une étude détaillée et approfondie réalisée hors ligne par un opérateur. Les résultats de cette étude se traduisent par un graphe synthétisant l'ensemble des connaissances *a priori* liées au modèle de l'objet et au système. Rappelons que la mise au point d'une méthodologie permettant de modéliser cette expertise représente à elle seule un enjeu considérable [7], partiellement étudiée dans

notre laboratoire [12]. Le savoir-faire de l'opérateur est ici primordial, aussi bien en ce qui concerne les objets à évaluer que les systèmes d'acquisition utilisés. En effet, il s'agit notamment de :

- déterminer le nombre et l'ordre des acquisitions à réaliser,

Et pour chaque acquisition de :

- sélectionner la tête de mesure la plus adaptée au type de primitives recherchées (stéréovision pour la mesure d'arêtes, lumière structurée pour la mesure de surfaces),
- fixer les paramètres d'éclairage de la scène,
- déterminer la localisation de la tête de mesure par rapport à l'objet,
- régler les paramètres des différentes procédures de traitement d'images,
- sélectionner les figures de mérite à atteindre,
- générer les données de référence correspondant à l'acquisition,
- etc.

Pour cela, plusieurs contraintes doivent être prises en compte lors de l'élaboration de la séquence d'évaluation. Elles nécessitent de :

- définir la séquence d'acquisition de manière à assurer un recouvrement partiel (de l'ordre de 20%) entre deux acquisitions successives. Ceci permet d'appliquer la méthode de recalage aux différentes reconstructions 3D partielles de manière efficace,
- prendre en compte les occlusions et les effets d'illumination, comme les ombres,
- de connaître la position de la frange centrale, nécessaire à la détermination des points 3D de l'objet par lumière structurée,
- de connaître approximativement la position de l'objet dans l'espace de mesure étalonné,
- etc.

### 4.3.3 Gestion de l'exécution par un graphe de contrôle

Le graphe de contrôle gouverne le module chargé du contrôle de l'acquisition et de la reconstruction partielle (module SGT), en lui fournissant, pour chaque étape de la séquence, l'ensemble des paramètres déterminés *a priori* (cf. 4.3.1). Il s'agit notamment de la localisation de la tête de mesure, du type de procédures nécessaires à la reconstruction 3D locale, ainsi que des valeurs des paramètres des procédures correspondantes. Chaque étape de la séquence d'acquisitions est ainsi caractérisée par un nombre bien défini de traitements à effectuer, et par l'ensemble des primitives géométriques du modèle de l'objet correspondant au point de vue de cette étape (primitives prévues, modèles CAO et/ou « vérité terrain » de référence). Le SGT modélise le comportement générique d'une étape de la séquence et est adapté dynamiquement en fonction des paramètres fournis par le graphe de contrôle, mais également en fonction des résultats des traitements réalisés par le SGT [85] (voir chapitre 3). Il exécute en particulier l'ensemble des opérations permettant d'obtenir une reconstruction 3D partielle de l'objet correspondant au point de vue courant de la tête de mesure lumière structurée (voir chapitre 3). En retour, le graphe de contrôle récupère cette description 3D partielle de l'objet et va l'exploiter afin de compléter la reconstruction 3D de l'objet avant de procéder à son inspection dimensionnelle

### 4.3 Planification d'une séquence d'évaluation

---

(voir figure 4.7).

#### Gestion de la reconstruction 3D incrémentale

Une question se pose à ce niveau d'analyse. Quelle est la raison d'adopter une évaluation incrémentale, plutôt que globale, pour le graphe de contrôle ? Après chaque acquisition, le graphe de contrôle récupère une reconstruction partielle 3D qu'il doit évaluer avant de lancer la prochaine acquisition. C'est aussi le recalage successif de ces informations partielles qui permet d'obtenir à la fin de la séquence une reconstruction 3D complète de l'objet. Deux possibilités sont donc envisageables, réaliser un recalage incrémental après chaque reconstruction partielle, ou réaliser un recalage global une fois la séquence d'acquisitions terminée. Nous avons adopté la première solution qui offre l'avantage de déterminer l'erreur de recalage commise à la fin de chaque reconstruction partielle (cf. 4.2.3). Il est ainsi possible d'interrompre le processus en cours d'exécution, si la pièce présente un défaut trop important, plutôt que de mener à terme la séquence d'acquisitions (ce qui conduit à une perte de temps, puisque l'objet évalué est trop éloigné du modèle).

Si le résultat de la comparaison des données réelles aux données de référence conduit à une figure de mérite inacceptable (valeur fixée *a priori* dans le système de planification), la qualité de la reconstruction partielle est jugée mauvaise, et le graphe de contrôle répète la même étape, après avoir ajusté les paramètres dans le but d'améliorer la reconstruction en cours. Dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque la qualité de la reconstruction est estimée suffisante, le processus est poursuivi par une nouvelle acquisition, suivie d'une nouvelle reconstruction 3D partielle de l'objet (avec de nouveaux paramètres *a priori*). Le processus est répété jusqu'à l'achèvement complet de la séquence d'acquisition. À la fin, en complément des évaluations partielles effectuées au fur et à mesure de l'évolution de la procédure de reconstruction, une procédure d'évaluation globale de l'objet est initiée par le graphe de contrôle. Cette opération (en fonction des objectifs fixés à l'application) repose sur deux techniques différentes, à savoir une évaluation globale ou une analyse de l'ensemble des évaluations partielles.

**1. Évaluation globale.** Cette évaluation se base sur une procédure de comparaison globale de l'objet reconstruit avec son modèle de référence. Ce dernier peut être un modèle CAO (par exemple fourni par CATIA) représentant l'objet en entier, ou une vérité terrain (nuage de points obtenus à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle). Cette comparaison est effectuée, à l'initiative du graphe de contrôle, dans un repère commun (dans notre cas, le repère objet) et résulte en une évaluation dimensionnelle complète de l'objet inspecté. Cette évaluation permet au graphe de contrôle de prendre une décision quant à la qualité de la reconstruction 3D complète de la pièce, et à son état (pièce correcte, pièce défectueuse). Il peut aussi conclure qu'un problème d'acquisition s'est produit, un problème que le système ne sait pas évaluer et/ou résoudre. La figure 4.6 montre l'objet reconstruit et son modèle de référence, exprimés dans le repère objet.

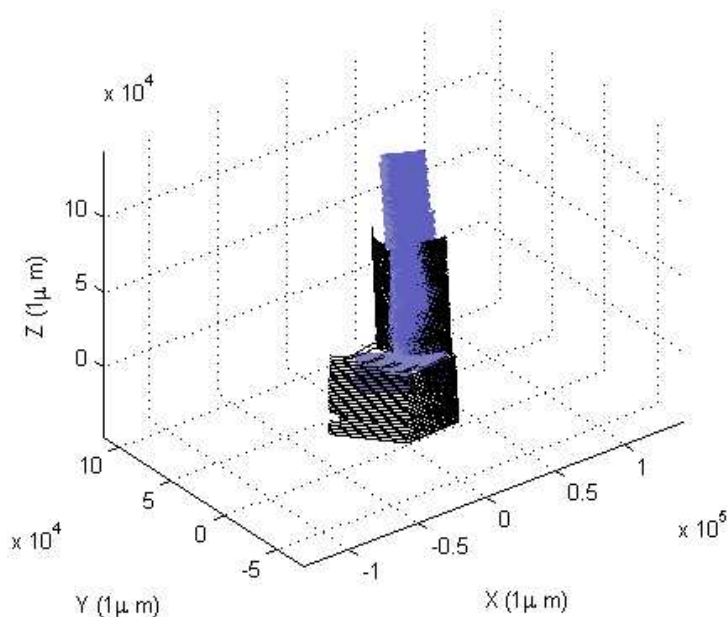


FIG. 4.6 – Évaluation globale de l'objet reconstruit par comparaison avec son modèle vérité terrain (MMT) exprimé dans le repère objet.

**2. Analyse de l'ensemble des évaluations dimensionnelles.** Une autre démarche, moins contraignante que la première et beaucoup plus rapide, consiste à analyser l'ensemble des évaluations dimensionnelles partielles et à synthétiser les résultats. En effet, le graphe de contrôle a déjà effectué, lors de l'exécution de la séquence d'acquisitions et après chaque recalage 3D, cette comparaison. La synthèse obtenue est évaluée en valant un indice de confiance pour la qualité de la « reconstruction » globale. Cet indice est la moyenne des indices (ou figures de mérite) des différentes reconstructions partielles. Il est comparé à un seuil fixé dans le système de planification. De cette manière, on tient compte, des résultats déjà disponibles.

La figure 4.7 illustre l'architecture interne du graphe de contrôle, la manière d'effectuer l'évaluation 3D incrémentale et les communications (bidirectionnelles) avec le module SGT. Il convient de noter que ce module de contrôle est utilisable quelque soit la nature de l'objet à évaluer, à condition de prendre en compte, bien évidemment, un modèle spécifique de l'objet lors de la paramétrisation du graphe. Dans une chaîne de production, si la tâche d'inspection est répétitive, le même graphe peut être réutilisé, d'où l'efficacité de l'approche développée. Par ailleurs, le module SGT reste indépendant du type d'objets et ne nécessite pas de modification lorsqu'on change le type d'objet à analyser (par exemple, dans une chaîne de production).

La figure 4.8 présente le mode d'échange des données entre le graphe de contrôle et le

### 4.3 Planification d'une séquence d'évaluation

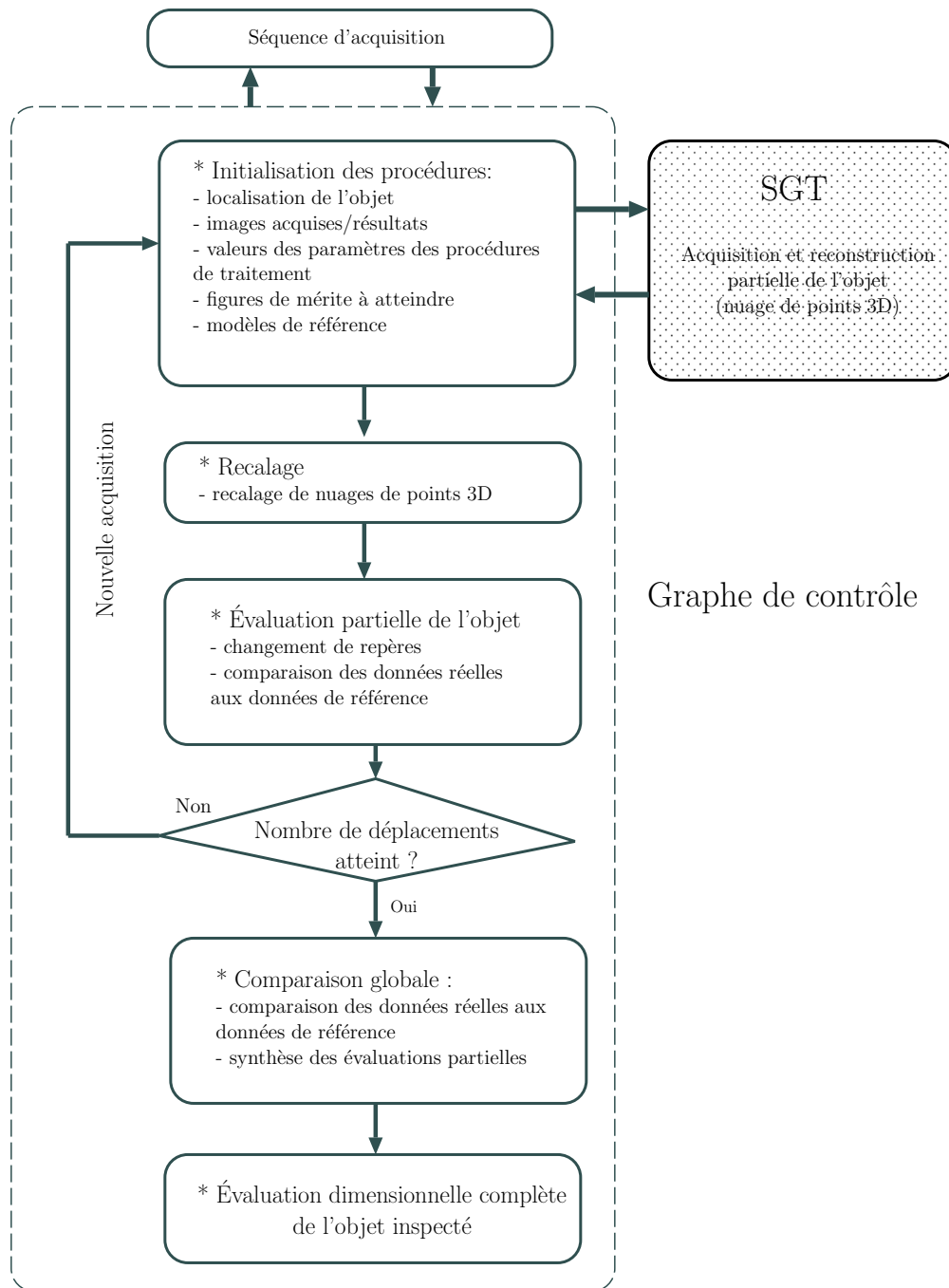


FIG. 4.7 – Architecture interne du graphe de contrôle et communication avec le module SGT.

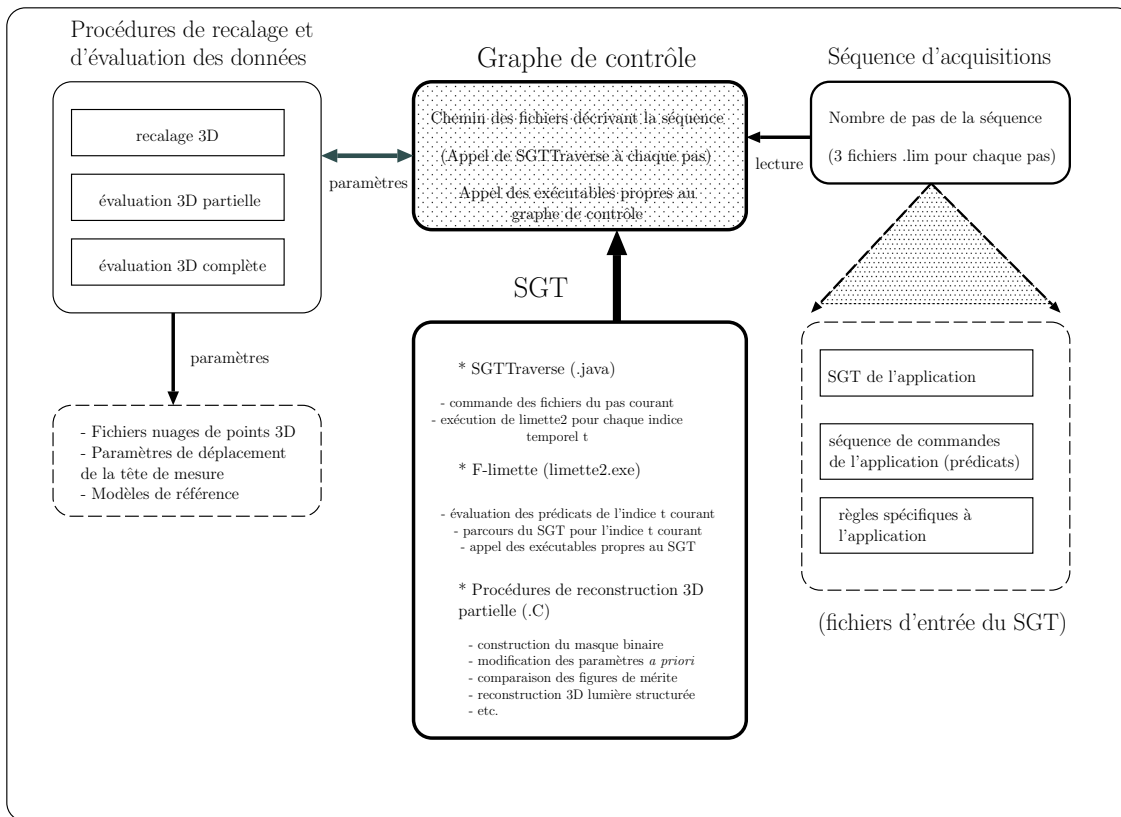


FIG. 4.8 – Mode d'échanges de données entre le graphe de contrôle et le module SGT.

module SGT. Nous allons présenter dans la section suivante l'implémentation logicielle du graphe de contrôle, ainsi que, en guise de validation de l'approche, une séquence de reconstruction/évaluation 3D correspondant à quatre acquisitions pour la pièce « pale de turbine ».

L'ensemble des traitements est illustré dans la figure 4.9. Le graphe de contrôle appelle le module SGT pour une première exécution en lui fournissant un fichier de données indiquant le nombre de pas de la séquence d'acquisitions à effectuer, ainsi que, pour chaque acquisition, les trois fichiers "Limette" nécessaires au fonctionnement du graphe SGT (structures, règles et prédicats propres au fonctionnement interne du SGT). Ces fichiers sont :

- le module SGT de l'application (graphe générique décrivant le processus de reconstruction 3D partielle),
- la séquence de commandes de l'application (prédicats logiques de commande),
- les règles spécifiques à l'application (fonctions "Limette" utilisées par les prédicats d'état et d'action des schémas de situation).

Ces trois fichiers ont déjà fait l'objet d'une étude détaillée dans la section 3.4.4 du chapitre 3. Ils sont indispensables à l'instanciation du SGT, et alimentent l'ensemble des

### 4.3 Planification d'une séquence d'évaluation

---

opérations liées à l'acquisition et à la reconstruction 3D en données et/ou paramètres nécessaires à leur fonctionnement. Ces données et paramètres permettent de prendre en compte les conditions d'acquisition, de définir les primitives appropriées et la position de la tête de mesure. Le graphe de contrôle fournit l'ensemble de ces informations *a priori* au module SGT sous la forme de prédicats logiques d'état (placés dans le fichier séquence de commandes de l'application). La création et la mise en forme des prédicats est faite en respectant les règles propres au langage « limette ». Par exemple, les paramètres nécessaires à la procédure de segmentation par contours actifs, ainsi que la primitive décrivant le masque à construire, sont mis à disposition sous la forme d'un fichier texte. Ce dernier est ensuite traduit en une collection de prédicats logiques d'état qui vont activer les situations, et donc conduire à l'exécution des actions (programmes) liées au traitement de l'image par contours actifs. Le Tableau 4.2 donne un exemple de ces fichiers de prédicats logiques d'état nécessaire à la reconstruction 3D. Afin que le système de planification puisse réaliser sa reconstruction, par exemple en réalisant 4 acquisitions/traitements, comme dans notre essai, le graphe de contrôle génère  $3 * u$  fichiers (où  $u$  est le nombre de pas de la séquence ; 4 dans nos essais). L'élaboration de ces fichiers est faite hors ligne, dans le système de planification, en tenant compte des connaissances *a priori* (modèles de l'objet, de son environnement).

**Entrées-Sorties du graphe de contrôle et gestion des erreurs.** Le graphe développé contrôle de manière bidirectionnelle le SGT. L'échange de données se fait par le biais de fichiers. Ces échanges sont spécifiés dans la séquence d'acquisitions, décrite dans un fichier que nous avons appelé « séquence » et comprenant aussi les connaissances *a priori* nécessaires au fonctionnement interne du SGT et aux différentes procédures de traitement et de reconstruction 3D. À la fin d'une étape, en complément du nuage de points 3D, le graphe de contrôle récupère un flux de données, que nous avons appelées « indices de déroulement », décrivant l'état du SGT, la manière dont ce dernier a été instancié, les erreurs qui ont été rencontrées, etc.

Trois cas peuvent se présenter pour l'état de sortie du SGT. Cet état est décrit par l'indice de déroulement ( $I_d$ ). Dans le premier cas, si la reconstruction partielle s'est déroulée comme planifié,  $I_d = 0$  et le graphe de contrôle valide la reconstruction, procède au recalage et à l'évaluation dimensionnelle. Dans le deuxième cas, si la reconstruction s'est déroulée avec ajustement (voir section 3.4.3 du chapitre 3),  $I_d = 1$  et le graphe de contrôle valide la description partielle tout en notant les modifications apportées aux « paramètres *a priori* » (voir la section 4.4.3 qui décrit les paramètres *a priori* du graphe de contrôle susceptibles d'être modifiés par le SGT). Le graphe de contrôle exploite les paramètres « instanciés » par le SGT en les réutilisant dans les étapes qui suivent afin d'améliorer la qualité des reconstructions. Ce mécanisme peut être appliqué en ligne pour de nouvelles acquisitions de la séquence en cours, ou pour l'évaluation dimensionnelle d'un autre type de pièce dans une autre séquence, si les conditions expérimentales ne sont pas modifiées. Dans le troisième et dernier cas, si la reconstruction partielle a échoué, suite par exemple à une mauvaise acquisition ou à une erreur de traitement,  $I_d = 2$  et le graphe de contrôle met fin au processus de reconstruction et d'inspection.



TAB. 4.2 – Fichier « prédicats logiques d'état » traduisant les connaissances *a priori* nécessaires à la reconstruction 3D.

```
always ( capteur(Argument) :-
    vecteur(Compteur, Inc),
    Compteur == Argument
    ).
always ( testPosition1(ArgumentScr) :-
    vecteur(Compteur, Inc),
    ArgumentScr is Inc,
    Max is 12.0,
    Min is 8.0,
    ArgumentScr < Max,
    ArgumentScr > Min
    ).
always ( infSeuilPos(ArgumentScr) :-
    Seuil is 25.0,
    ArgumentScr < Seuil
    ).
always ( ajustSGT(Flag) :-
    Flag is 1
    ).
always ( echecSGT(Flag) :-
    Flag is 2
    ).
always ( validTrai(Resultat) :-
    Resultat == 0
    ).
always ( validRecons(Resultat) :-
    Resultat == 0
    ).
always ( testAcqui(Resultat) :-
    Resultat == 0
    ).
always ( testTrai(Resultat) :-
    Resultat == 0
    ).
```

### 4.3 Planification d'une séquence d'évaluation

---

La figure 4.9 illustre les entrées-sorties nécessaires (échange des paramètres *a priori* et des paramètres « instanciés ») à la coopération du graphe de contrôle avec le module SGT. Ces éléments sont nécessaires à la reconstruction 3D. L'exemple présenté porte sur une « pale de turbine » reconstruite à partir d'une séquence de 4 images (4 positions de la tête de mesure « lumière structurée »).

#### 4.3.4 Validation expérimentale

Afin de valider l'approche développée, un graphe de contrôle a été développé pour une séquence d'acquisitions comportant 4 positions de la tête de mesure, et conduisant à la reconstruction 3D de la pièce « pale de turbine ». Les expériences ont été menées en faisant appel au prototype du robot de mesure.

Les essais montrent que l'approche proposée permet effectivement au système de planification de générer correctement une séquence de reconstruction 3D complète de la pièce manufacturée ainsi que de son évaluation. Un exemple de fichiers résultats obtenus est donné dans le Tableau 4.3. La figure 4.10 montre le nuage de points 3D correspondant à la reconstruction 3D de l'objet obtenue à l'issue d'une séquence de 4 acquisitions. Cette reconstruction 3D est dite complète (ou pseudo-complète), dans la mesure où la séquence d'acquisitions a permis de couvrir toutes la région de l'objet correspondant aux zones de l'objet accessibles par le robot.

#### Protocole de communication « graphe de contrôle » et « SGT »

À chaque acquisition, le SGT exploite trois fichiers (voir figure 4.9) et exécute ensuite l'ensemble des opérations permettant d'obtenir une reconstruction 3D partielle de l'objet. Le graphe de contrôle récupère cette reconstruction élaborée par le SGT et procède au recalage des données 3D mesurées, à la recherche de la transformation permettant de changer de repère pour les données mesurées (du repère « tête de mesure » vers le repère objet), ainsi qu'à l'évaluation partielle 3D. Il active ensuite une nouvelle acquisition (pour une nouvelle position de la tête de mesure, c'est-à-dire, dans notre cas, pour une nouvelle position du banc micrométrique portant l'objet à inspecter), en appelant à nouveau le SGT, avec les trois fichiers « limette » correspondant à la nouvelle position de la tête de mesure « lumière structurée ». La procédure est répétée ainsi, jusqu'à l'achèvement de la séquence planifiée *a priori*. À ce stade du traitement, le graphe de contrôle dispose de plusieurs reconstructions 3D (nuages de points 3D) recalées et exprimées dans un repère commun (repère lié à objet). Il réalise enfin une évaluation globale. À l'issue de cette dernière, le graphe de contrôle fournit une décision quant à la qualité de la reconstruction 3D obtenue. Une évaluation dimensionnelle complètement autonome, basée sur une coopération entre le graphe de contrôle et le SGT, est ainsi réalisée à l'aide du système de planification.

Afin de renforcer la description 3D de l'objet, nous allons présenter dans la section suivante, dans un premier temps, la manière avec laquelle notre système de planification peut contrôler une deuxième tête de mesure, stéréoscopique, afin de générer des primitives 3D contours, et, dans un deuxième temps, l'intérêt de fusionner des primitives contours et surfaces pour une meilleure description de l'objet. Nous évoquerons aussi un point

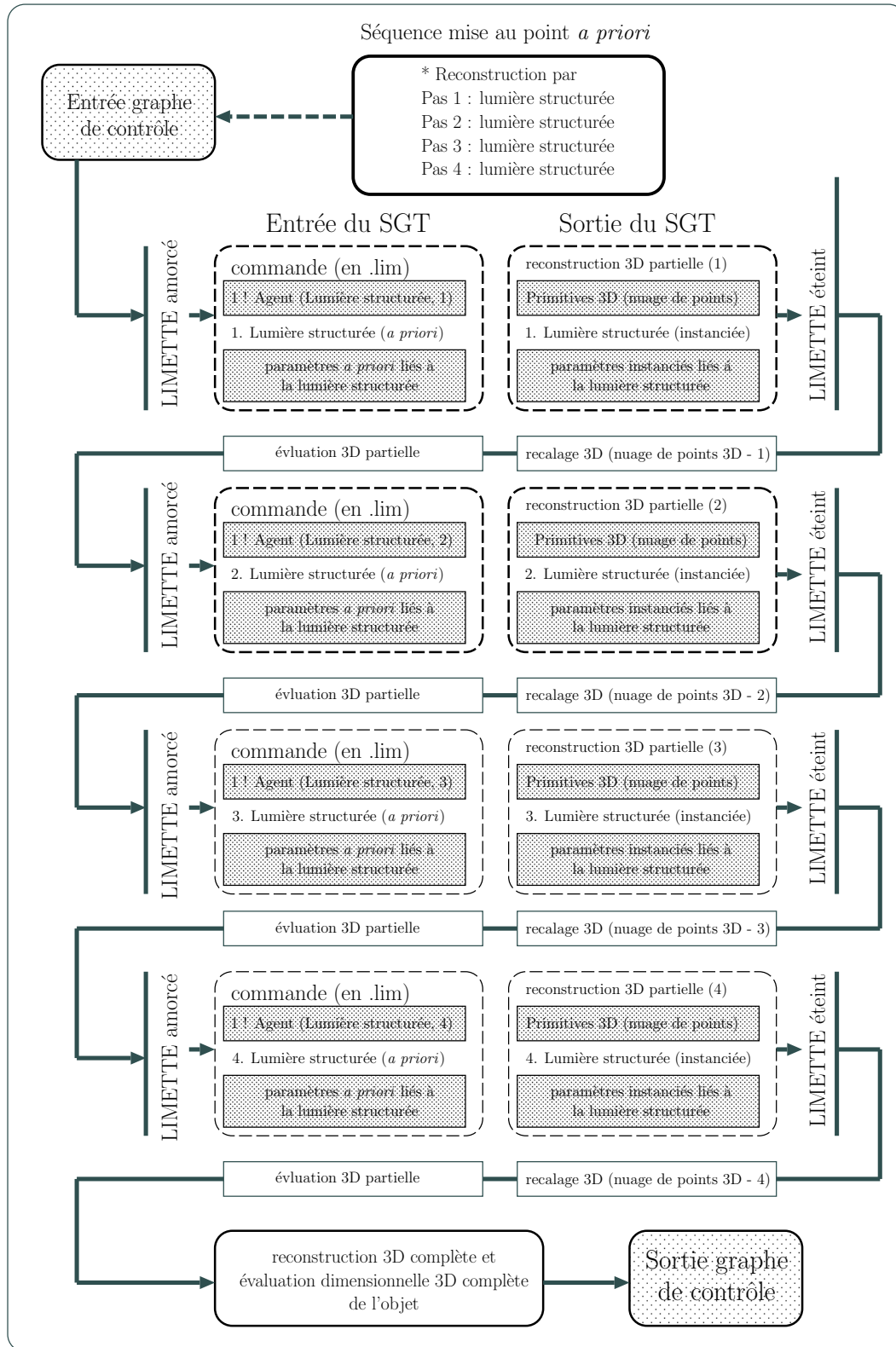


FIG. 4.9 – Protocole de communication entre le graphe de contrôle et le module « SGT » correspondant à une séquence de 4 acquisitions.

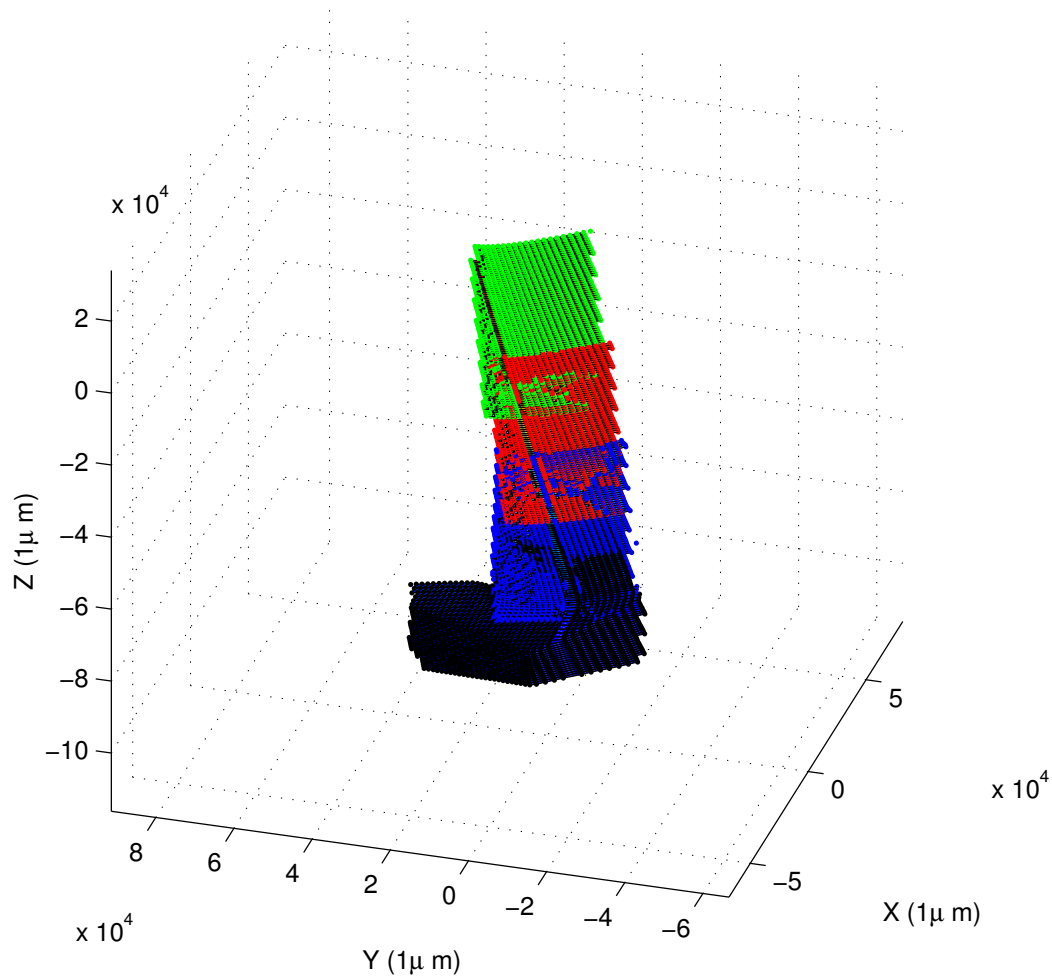


FIG. 4.10 – Reconstruction 3D complète de l'objet (et correspondant à une séquence de 4 acquisitions).

clef de notre système de planification, qui concerne la capacité d'auto-apprentissage du graphe de contrôle par le biais du SGT.

## 4.4 Perspectives

Pendant le développement de l'approche suggérée, plusieurs possibilités ont été analysées quant aux éventuelles extensions possibles pour le système de planification. Le module reposant sur les SGTs modélise le comportement de la tête de mesure dans la scène, de manière complètement indépendante de la géométrie de l'objet à inspecter et du type de capteur utilisé. Cela implique que notre modélisation permet de prendre en compte d'autres types de capteurs et peut aussi gérer le contrôle de plusieurs têtes de mesures simultanément. Cette caractéristique intéressante ouvre des perspectives, en particulier pour mesurer d'autres types de primitives. En utilisant la tête « lumière struc-

TAB. 4.3 – Fichiers résultats décrivant le déroulement de la séquence d'acquisition / reconstruction / évaluation 3D de l'objet (séquence de 4 acquisitions).

```
HTP: Execution de la sequence
HTP: Execution par le SGT de la commande indice 1 de la sequence
LimetteShell created (not running yet).
new_answer.elementAt(0)-->1 : 1 ! sit_root_3D.
new_answer.elementAt(18)-->1 : 1 ! sit_sortie_root.
new_answer.elementAt(19)-->1 : 1 ! resultatSGT(0).
new_answer.elementAt(20)-->FINISHED
new_answer.elementAt(21)-->yes
>>> SGT: execute correctement [indice 1/4]
>>> SGT: reconstruction partielle realisee comme planifiee [indice 1/4]
HTP: Recalage de la Reconstruction 3D partielle indice 1
HTP: pas de recalage pour l'indice 1
HTP: Evaluation partielle de l'objet
HTP: Execution par le SGT de la commande indice 2 de la sequence
(Re-)initializing LimetteShell
new_answer.elementAt(0)-->1 : 1 ! sit_root_3D.
new_answer.elementAt(18)-->1 : 1 ! sit_sortie_root.
new_answer.elementAt(19)-->1 : 1 ! resultatSGT(0).
new_answer.elementAt(20)-->FINISHED
new_answer.elementAt(21)-->yes
>>> SGT: execute correctement [indice 2/4]
>>> SGT: reconstruction partielle realisee comme planifiee [indice 2/4]
HTP: Recalage de la Reconstruction 3D partielle indice 2
>>> HTP: Veuillez relancer le processus
HTP: recalage 3D indice 2 effectué
HTP: Evaluation partielle de l'objet
HTP: Execution par le SGT de la commande indice 3 de la sequence
LimetteShell created (not running yet).
new_answer.elementAt(0)-->1 : 1 ! sit_root_3D.
new_answer.elementAt(18)-->1 : 1 ! sit_sortie_root.
new_answer.elementAt(19)-->1 : 1 ! resultatSGT(0).
new_answer.elementAt(20)-->FINISHED
new_answer.elementAt(21)-->yes
>>> SGT: execute correctement [indice 3/4]
>>> SGT: reconstruction partielle realisee comme planifiee [indice 3/4]
HTP: Recalage de la Reconstruction 3D partielle indice 3
>>> HTP: Veuillez relancer le processus
HTP: recalage 3D indice 3 effectué
HTP: Evaluation partielle de l'objet
HTP: Execution par le SGT de la commande indice 4 de la sequence
LimetteShell created (not running yet).
new_answer.elementAt(0)-->1 : 1 ! sit_root_3D.
new_answer.elementAt(18)-->1 : 1 ! sit_sortie_root.
new_answer.elementAt(19)-->1 : 1 ! resultatSGT(0).
new_answer.elementAt(20)-->FINISHED
new_answer.elementAt(21)-->yes
>> SGT: execute correctement [indice 4/4]
>>> SGT: reconstruction partielle realisee comme planifiee [indice 4/4]
HTP: Recalage de la Reconstruction 3D partielle indice 4
>>> HTP: Veuillez relancer le processus
HTP: recalage 3D indice 4 effectué
HTP: Evaluation partielle de l'objet
HTP: Sequence complete traitee
Evaluation dimensionnelle de l'objet reconstruit
```

## 4.4 Perspectives

---

turée », le SGT développé génère des primitives 3D de types « surfaces ». Si ce graphe contrôlait une tête de mesure stéréoscopique, il pourrait générer des primitives 3D de types « contours ». Pour une application d'inspection dimensionnelle, la fusion des deux types de données contours et surfaces enrichirait la description de l'objet inspecté. Cette description pourrait aussi, sans doute, conduire à une meilleure précision de mesure de l'objet.

Par ailleurs, le graphe de contrôle développé ne constituerait pas non plus un handicap pour une telle adaptation. Si l'on souhaite que le SGT contrôle plusieurs têtes de mesure différentes, le graphe de contrôle prend en compte ce fait par le biais de paramètres *a priori*, de nouvelles « primitives prévues » pour le modèle de l'objet, et des points de vue des nouvelles têtes de mesure. Compte tenu de cette flexibilité et, surtout, de la modularité du système de planification développé, nous avons jugé intéressant de réaliser une analyse approfondie de la faisabilité de ces extensions. L'ensemble de ces extensions est en cours d'implémentation (réalisation d'un SGT pour le contrôle de la tête de mesure stéréoscopique) et va être, à terme, intégré dans notre système de planification. Un autre avantage, en particulier en cours de contrôle de la tête de mesure par le SGT, porte sur la capacité de ce dernier d'effectuer en fonction des conditions réelles d'acquisition et des résultats effectifs des traitements, des ajustements afin de corriger les défauts rencontrés lors des traitements. Ces défauts ne peuvent être prévus et encodés dans les paramètres *a priori* générés par le système de planification. Les paramètres effectivement instanciés par le SGT peuvent ainsi être utilisés pour mettre à jour les paramètres *a priori* prévus lors de la planification. Cette mise à jour permet d'améliorer significativement la qualité des prochaines reconstructions/évaluations de l'objet, par exemple lors de l'évaluation d'un lot de pièces dans une chaîne de production.

### 4.4.1 Contrôle de la tête stéréoscopique

Comme la reconstruction 3D par lumière structurée, la stéréovision est une technique puissante pour obtenir une information 3D à partir de deux images 2D. Il s'agit en fait de doter notre système de mesure de cette capacité sensorielle afin qu'il puisse générer d'autres types de données et enrichir ainsi la description 3D. Le SGT reste autonome et indépendant de la nature géométrique de l'objet à inspecter, mais le graphe de contrôle doit être adapté. Si le système est doté d'un nouveau capteur, c'est uniquement pendant la phase de planification hors ligne que le graphe de contrôle est ajusté, afin de prendre en compte les nouvelles données à acquérir et à traiter par le nouveau capteur.

Le SGT générique, développé pour modéliser le comportement de la tête de mesure « lumière structurée », s'adapte aisément à tout autre type de capteurs. Ce qui confirme l'intérêt des SGTs pour ce type de modélisation. Dans l'équipe, un SGT pour la tête stéréoscopique (voir section 4.4.2) a été développé. Il est identique à celui pour la lumière structurée en ce qui concerne les situations de base. En revanche, il a fallu prévoir, et mettre à disposition, l'ensemble des traitements pour la reconstruction 3D par stéréovision. Ces traitements seront activés par les actions associées aux schémas de situation correspondants du SGT. La figure 4.11 donne un exemple de primitives 3D de type contour obtenues à la suite d'une reconstruction 3D locale par stéréovision [41].

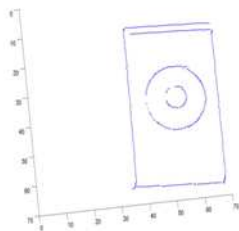


FIG. 4.11 – Primitives 3D de type contour fournies par la tête stéréoscopique (pièce « L »).

#### 4.4.2 Fusion de données contours et surfaces

Dans notre cas particulier de mesures dimensionnelles, l'information photométrique (par exemple, la couleur) ne présente, du moins pour le moment, que peu d'intérêt. C'est la raison pour laquelle nous nous sommes limités à l'étude de primitives géométriques 3D. Le nuage de points 3D obtenu par la tête « lumière structurée » décrit de manière précise les surfaces de l'objet, et seulement les surfaces constituant ce dernier. Enrichir cette représentation par d'autres primitives géométriques (primitives de type contour fournies par un capteur stéréoscopique dans notre cas) apportera, sans aucun doute, une meilleure description 3D de l'objet, et conduira ainsi à une évaluation dimensionnelle de meilleure qualité. Pour cela, une coopération entre ces deux capteurs s'avère indispensable pendant la tâche d'inspection dimensionnelle.

#### Mise en œuvre pratique

Les primitives surfaciques sont acquises par la tête de mesure lumière structurée, tandis que les primitives contours résultent de l'utilisation d'une tête stéréoscopique. Nous avons vu plus haut que le système de planification repose sur une modélisation par SGT du comportement d'un capteur. Cette modélisation met en avant les différentes situations que l'on peut rencontrer en ligne dans la scène lors de la reconstruction 3D d'un objet. Implémenter un module contrôlant une deuxième tête de mesure, ici stéréoscopique, ne pose donc aucun problème, et la structure et le comportement du système de planification n'est pas modifiés. Faire coopérer les deux têtes pour mesurer des contours et des surfaces, en contrôlant leur comportement, est réalisable sans difficulté à l'aide du système développé.

Le seul inconvénient de cette approche coopérative réside dans le fait que les données 3D contours ne sont pas mises directement en correspondance avec les données 3D surfaces. En effet, elles sont acquises à l'aide de deux capteurs différents et, par conséquent, à partir de points de vue différents. Il reste à résoudre un problème de recalage entre les données contours et les données surfaces, pour former une image 3D fusionnée de l'objet. La procédure de recalage déjà utilisée peut être appliquée pour recalibrer puis fusionner les deux jeux de données contours et surfaces.

### Insertion dans le système de planification

Nous avons jugé intéressant d'intégrer dans le système de planification ce mécanisme de coopération de deux manières différentes. Selon le mode d'intégration, l'impact sur le comportement général du système est différent. Cette intégration est faite, soit au niveau du module SGT, soit au niveau du deuxième module « graphe de contrôle ». Ces deux solutions sont décrites ci-après.

**1. SGT multi-agent.** Une première solution consiste à utiliser le SGT modélisant le comportement de la tête de mesure lumière structurée, pour modéliser aussi la tête de mesure stéréoscopique et contrôler, en ligne, successivement les deux têtes. Autrement dit, cet SGT légèrement modifié modélise le comportement des deux têtes en faisant appel à deux agents, d'où son appellation « SGT multi-agent ». Le SGT résultant est identique à celui déjà présenté, et n'inclut que les quelques modifications nécessaires à la prise en compte de la deuxième tête de mesure (fusion de données, reconstruction 3D partielle hybride, reconstruction 3D locale par stéréoscopie). Au niveau de l'architecture du SGT, en complément des schémas de situation de base constituant le SGT générique (voir section 3.4.2), vient s'ajouter une situation entièrement dédiée à la fusion des données contours et surface. Cet SGT « multi-agent », dans le cas idéal, instancie la séquence de traitement suivante :

- déplacement -> acquisition -> traitement -> fusion\_de\_données -> reconstruction\_partielle,

Le schéma de situation « traitement » est bien évidemment complété par les traitements permettant une reconstruction 3D locale par stéréovision. Les différentes spécialisations sont conservées telles quelles. Seule une adaptation des prédicats d'état et d'action propres aux traitements à effectuer sur les données fournies par la deuxième tête de mesure est à prévoir. À la sortie du SGT multi-agent, la situation « reconstruction\_partielle » génère, dans ce cas, une description 3D « hybride » de l'objet mesuré (en fusionnant les deux reconstructions partielles « contours » et « surfaces »).

Avec cette configuration, le graphe de contrôle est pratiquement inchangé. Par contre, un complément de connaissances *a priori* portant sur le modèle de l'objet ainsi que sur celui de la tête de mesure stéréoscopique est à ajouter. Le modèle de référence lié à la tête stéréoscopique doit mettre en avant des primitives de type « contours » qui permettent d'évaluer les données contours 3D mesurées. La figure 4.12 montre la structure du graphe de situation SGT « multi-agent » développé pour contrôler les deux têtes de mesure. Cette figure ne montre qu'une partie du SGT complet développé et ne représente que les cinq situations de base définies pour le SGT générique « mono-agent », avec la situation spécifiquement conçue pour la fusion des données 3D. Toutes les spécialisations ne sont pas mentionnées (elles sont inchangées par rapport à celles du SGT générique de base).

**2. Graphe de contrôle adapté.** La deuxième solution, contrairement à la première, ne repose pas sur le concept de fusion de données et génère deux reconstructions 3D



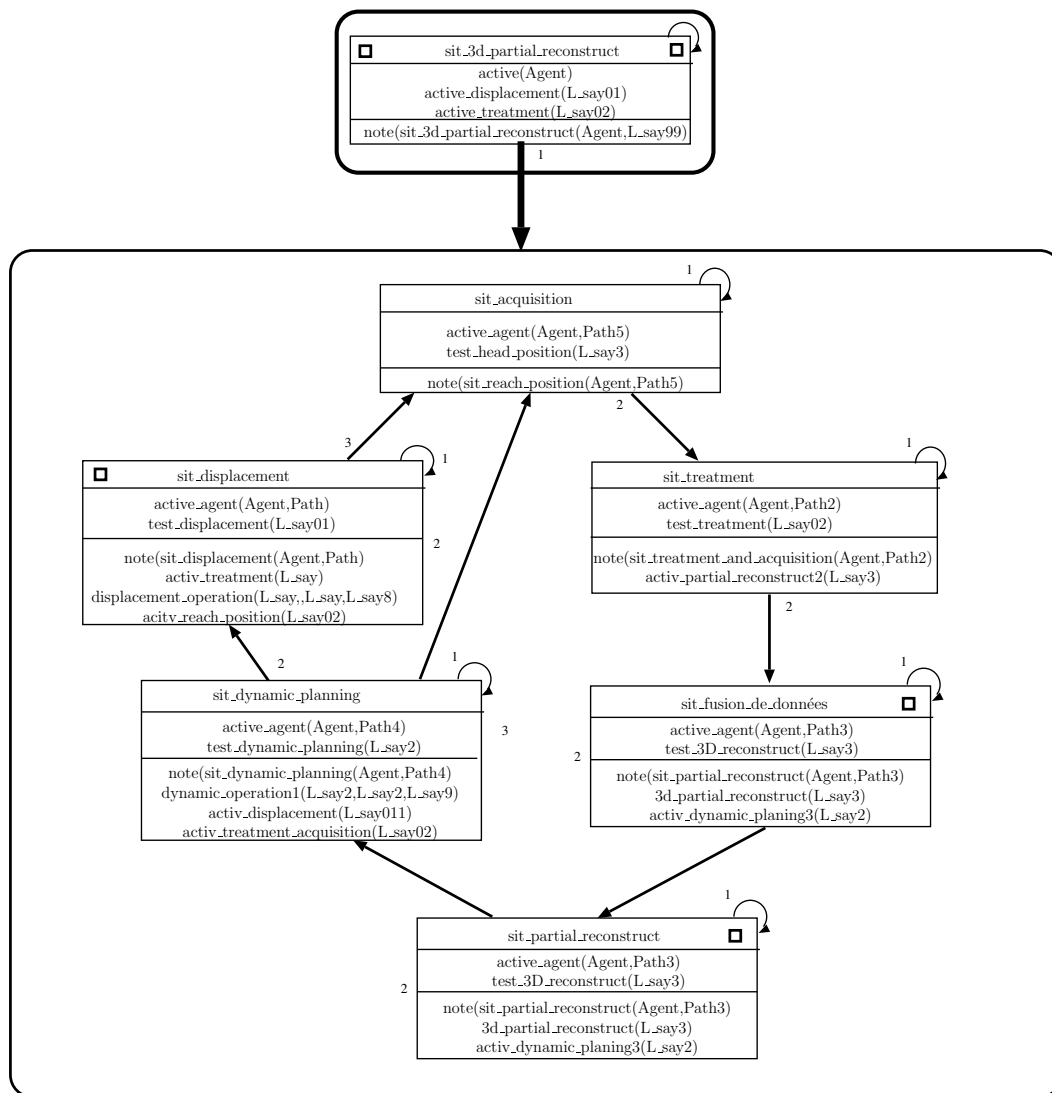


FIG. 4.12 – SGT « multi-agent » développé pour prendre en charge la coopération contours/surfaces.

partielles distinctes. Pour ce faire, un deuxième SGT générique a été développé dans l'équipe pour contrôler la tête de mesure stéréoscopique. Ce deuxième SGT dispose des mêmes caractéristiques que celui conçu pour la lumière structurée, à la différence près, bien sûr, des traitements qui ont été adaptés pour une reconstruction 3D stéréoscopique. Nous aboutissons ainsi à un système de planification à trois modules, dont deux modules SGT contrôlant chacun une tête de mesure séparément. Le module graphe de contrôle récupère donc deux reconstructions partielles 3D distinctes (données 3D surface et/ou contours), auxquelles une procédure de fusion de données est appliquée. Ensuite, le graphe de contrôle reprend son parcours habituel. Comme pour la première solution, il faut mettre à jour, dans le graphe de contrôle, les connaissances *a priori*, correspondant aux modèles de l'objet et de la tête de mesure stéréoscopique. Cette étape est nécessaire pour que les paramètres *a priori* soient pris en compte correctement par le module SGT contrôlant le capteur stéréoscopique. Nous présentons dans la figure 4.13 cette version amendée du système de planification, développée autour de deux modules SGT.

### 4.4.3 Auto-apprentissage du graphe de contrôle

Une autre extension de l'approche développée réside dans le fait que le système de planification dispose de capacités d'apprentissage lui permettant de s'adapter au mieux aux conditions réelles et effectives d'acquisitions. Le graphe de contrôle ne se limite pas seulement à fournir les connaissances *a priori* nécessaires au SGT, mais il utilise aussi les paramètres instanciés par le SGT, une fois que ce dernier a exécuté toutes les opérations de reconstruction partielle 3D. Ceci permet d'adapter le comportement du système et de mettre à jour les paramètres gérés par le graphe de contrôle. Pour une séquence d'acquisition donnée, le SGT modélise un comportement générique qui est adapté de manière dynamique en fonction des paramètres *a priori* fournis par le graphe de contrôle. De même, les résultats effectifs des traitements réalisés permettent d'aboutir à un comportement dynamique du graphe de contrôle. Plus précisément, après chaque ajustement local pour un traitement (voir l'exemple portant sur la génération du masque binaire) ou ajustement global (cas de la replanification dynamique), le SGT modifie les paramètres *a priori* fournis par le graphe de contrôle de telle sorte que ce dernier puisse corriger les défauts rencontrés en ligne, lorsqu'il instancierà par la suite à nouveau le SGT.

Cette modification des paramètres apporte une nouvelle connaissance, qui n'était pas disponible lors de la planification hors ligne de la séquence d'acquisitions. Le SGT, une fois activé, instancie un ensemble de paramètres correspondants aux différents traitements exécutés par la chaîne de reconstruction. En retour, le graphe de contrôle récupère ces paramètres instanciés afin de les utiliser pour les prochaines tâches de reconstruction d'objets, par exemple dans une chaîne de production. De même, cette approche lui permet de mettre à jour les paramètres *a priori* pour la prochaine acquisition, au sein même de la séquence en cours d'exécution. Cette mise à jour des valeurs *a priori* des paramètres améliore la qualité de la reconstruction 3D complète de l'objet et donc son évaluation dimensionnelle.

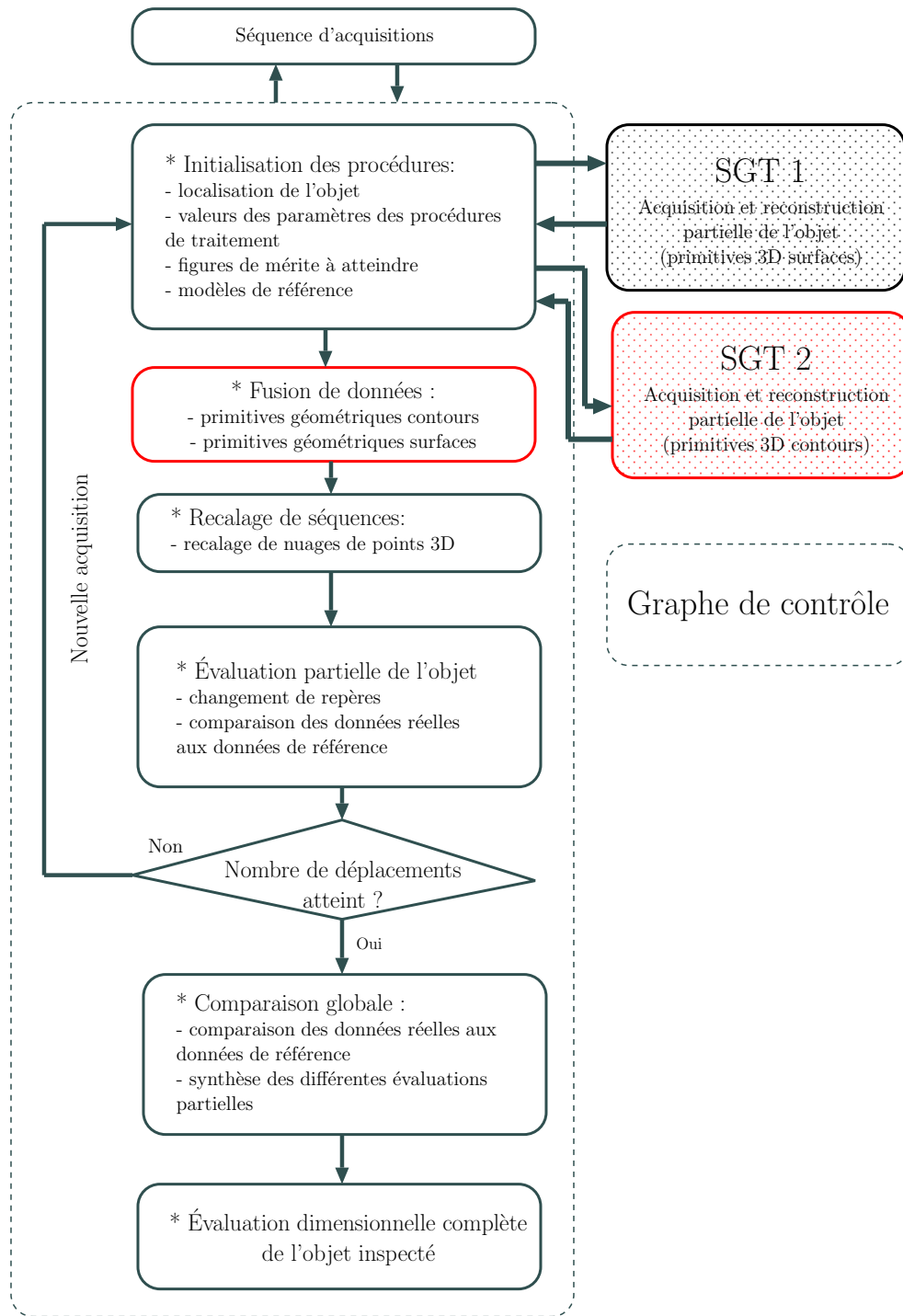


FIG. 4.13 – Système de planification adapté à la fusion de données et graphe de contrôle « associé ».

## 4.4 Perspectives

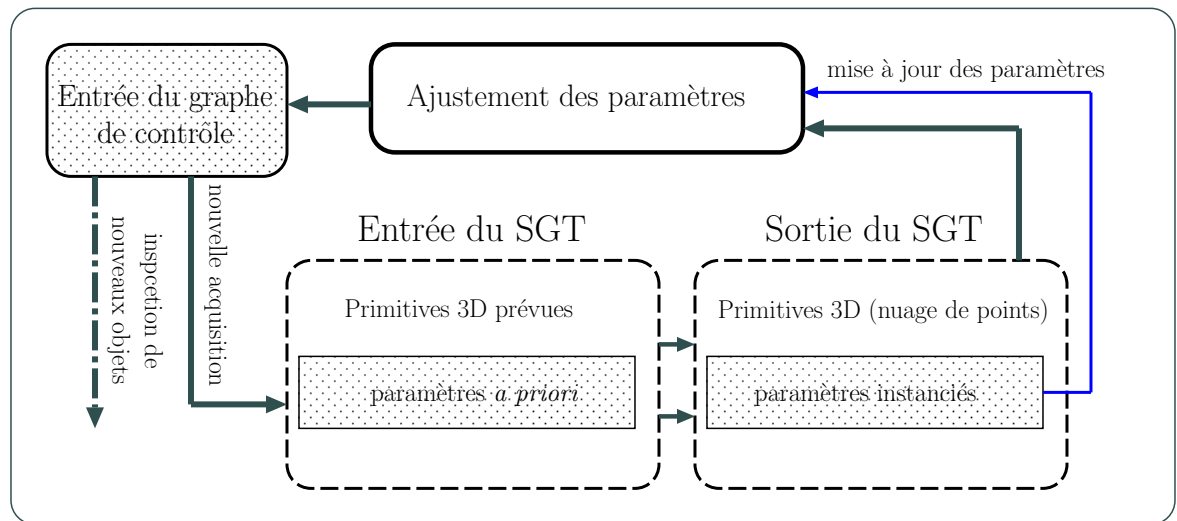


FIG. 4.14 – Auto-apprentissage du graphe de contrôle via une boucle de retour incluant le SGT.

### Paramètres susceptibles d'être ajustés en ligne

Nous parlons d'une reconstruction 3D avec apprentissage lorsque des paramètres sont ajustés. Ce comportement permet de « converger » vers les conditions effectives d'acquisition, mais également de s'adapter aux variations monotones des conditions d'acquisition, par exemple dans un environnement industriel. Le système de planification s'adapte ainsi en ligne aux conditions variables d'acquisition : les paramètres effectivement instanciés par le SGT sont utilisés pour mettre à jour les paramètres prévus *a priori* dans le graphe de contrôle. Parmi les paramètres pouvant être ajustés en ligne par le SGT et dont les valeurs vont être retourner vers le graphe de contrôle, on peut citer :

- la position et l'orientation de la tête de mesure,
- les paramètres d'illumination,
- les paramètres contrôlant l'évolution des contours actifs,
- le seuil du filtre réalisant la segmentation des franges,
- la ligne de référence utilisée pour détecter la frange centrale nécessaire à la numérotation des franges,
- etc.

La figure 4.14 présente le mécanisme d'ajustement des valeurs des paramètres prévus *a priori* dans le graphe de contrôle, ainsi que la manière dont le graphe de contrôle adapte son comportement à la suite de la prise en compte des paramètres modifiés par le module SGT.

## 4.5 Conclusion

Nous avons vu dans le chapitre 3 que le graphe de situations (SGT) est géré par le biais d'un module de contrôle lui fournissant les paramètres *a priori* nécessaires à son fonctionnement et aux différents traitements. Ce deuxième module exploite la reconstruction 3D partielle que le SGT génère en sortie. Dans ce chapitre, nous avons décrit ce module, implémenté sous la forme d'un graphe de contrôle, et résultant de la planification de la reconstruction 3D complète de l'objet et de son évaluation dimensionnelle. La coopération de ce dernier avec le module SGT constitue le système de planification que nous avons développé. Ce système organise l'inspection et l'évaluation dimensionnelle d'une pièce manufacturée. Le graphe de contrôle développé repose largement sur une synthèse des connaissances *a priori* liées au modèle de l'objet et aux systèmes d'acquisition. La connaissance *a priori* mise en œuvre porte sur l'ensemble des composants de l'application, et prend la forme de modèles paramétrés pour les têtes de mesure, les sources lumineuses et l'objet à analyser.

Le graphe de contrôle réalisé utilise les reconstructions 3D partielles retournées par le SGT, les recalcule les unes par rapport aux autres afin de les exprimer dans un même référentiel. Une étape d'évaluation dimensionnelle partielle est systématiquement exécutée afin de valider la qualité des nuages de points 3D générés, cette étape étant répétée jusqu'à l'achèvement complet de la séquence d'acquisitions. Une fois la reconstruction 3D complète de l'objet obtenue, une évaluation dimensionnelle complète de ce dernier est effectuée, en comparant les données 3D mesurées aux données « vérité terrain » de l'objet ou à son modèle CAO.

Ces éléments de notre système de planification ont été validés sur la version prototype du robot de mesure. Afin d'enrichir la description 3D générée et d'améliorer la précision de la mesure effectuée, plusieurs extensions possibles du travail réalisé ont été étudiées et présentées. Ces extensions visent, d'un côté, à permettre le contrôle et l'exploitation de deux têtes de mesure (stéréoscopique et « lumière structurée ») et, d'un autre côté, à permettre la fusion de données contours et surfaces. Une mise à jour des valeurs des paramètres prévus initialement pour le graphe de contrôle est effectuée en tenant compte de la valeur des paramètres effectivement utilisés par le SGT. Cette mise à jour permet au système de planification de s'adapter aux conditions effectives d'acquisition et d'améliorer ainsi l'évaluation dimensionnelle des prochaines reconstructions 3D de pièces manufacturées.

# Conclusion Générale

## Apport

Cette thèse a été consacrée à développer un système de planification dédié à la reconstruction 3D et à l'inspection 3D de pièces manufacturées. Ce système a en charge la gestion des traitements permettant une reconstruction 3D de la pièce, ainsi que son analyse dimensionnelle. Il coordonne un ensemble de procédures complexes permettant l'acquisition des données, leur analyse, leur évaluation dimensionnelle ainsi que leur comparaison avec un modèle de référence. Pour cela, il est indispensable de mettre à profit une connaissance portant non seulement sur l'objet à analyser, mais également sur son environnement. Notre travail a consisté à apporter une contribution à ce sujet. Pour cela, nous avons développé un système qui s'articule autour de la coopération de deux modules distincts :

- un module de contrôle de l'acquisition et de la reconstruction 3D partielle,
- un module de planification de la reconstruction 3D complète de l'objet, ainsi que de son évaluation dimensionnelle.

Le premier module, à partir d'une modélisation, contrôle la tête de mesure « lumière structurée ». Afin de mieux exploiter les données images fournies par cette dernière, il est intéressant d'isoler la région de l'objet du reste de l'image, pour n'appliquer les procédures de reconstruction 3D qu'aux seules données relatives à l'objet. Pour ce faire, nous avons mis en œuvre une approche du type contours actifs par ensemble de niveaux, faisant appel à une information *a priori* concernant la localisation et la forme de l'objet dans l'image. La méthode implémentée conduit à l'étiquetage des régions de l'image et génère un masque binaire séparant l'objet du fond de l'image, et cela sans nécessiter de post-traitement spécifique. Cette construction efficace et précise du masque binaire nécessite une implémentation qui met en jeu un nombre important de paramètres.

Dans l'optique de fournir un outil de réglage automatique de ces paramètres, nous avons adopté une approche qualité par plans d'expériences. L'objectif principal était d'améliorer la qualité de la segmentation en réalisant un minimum d'expériences prenant en compte un maximum de paramètres, et ce afin d'obtenir un jeu de paramètre optimal (plus précisément sous-optimal). L'objectif secondaire était d'obtenir une connaissance plus fine de l'influence des paramètres sur la qualité de segmentation. Cette connaissance

est ensuite fortement exploitée dans la phase de reconstruction 3D partielle de l'objet. En effet, lors de cette étape, la procédure de segmentation est appliquée préalablement avec des paramètres fixés en tenant compte des conditions supposées d'acquisition. Ces conditions sont cependant susceptibles de varier lors de l'analyse en ligne de l'objet et risquent donc de faire échouer la procédure de segmentation. La connaissance des paramètres influents, découlant de l'analyse de variance effectuée dans le cadre des plans d'expériences, permet ainsi de délimiter une plage de variations autorisées et, donc, dans une certaine mesure, de mettre en place une boucle d'ajustement automatique des paramètres pour la procédure de segmentation. Nous pensons que cette méthodologie de réglage des paramètres présente l'intérêt majeur de pouvoir être mise en œuvre hors ligne de façon systématique sur des séquences d'images types utilisées dans le cadre de la planification des traitements. En effet, quelques soient les images à traiter, l'ordre des expériences à mener est toujours le même, le nombre de facteurs à prendre en compte étant fixé (par exemple, à 6 paramètres pour les contours actifs). La réalisation de l'ensemble des expériences et la notation de leur résultat sont automatiques. Enfin, l'interprétation des résultats par une analyse de variance peut être également automatisée. L'opérateur chargé du travail expérimental n'intervient donc que lors de la définition du contour de référence propre à chaque type d'images, ainsi que lors de la validation du jeu optimal pour les images constituant la séquence. Ces deux tâches ne demandent guère d'expertise, ni dans le domaine des plans d'expériences, ni en traitement d'images.

Le module contrôlant les têtes de mesure exploite les graphes de situations et réalise les opérations d'acquisition et de reconstruction partielle planifiées. Toute la chaîne d'acquisition et de traitements est contrôlé par un SGT générique. La modélisation du comportement de la tête de mesure consiste à prévoir, hors ligne, tous les enchaînements possibles nécessaires à l'obtention d'une description 3D partielle de l'objet à évaluer. C'est pendant l'instanciation, en ligne, du graphe générique que seules certaines situations sont instanciées, après avoir été sélectionnées dans l'ensemble des situations définies *a priori* dans le graphe de situations. Ce comportement permet au graphe générique de s'adapter dynamiquement aux conditions réelles de prise de vue, en modifiant, d'une manière automatique et autonome, les conditions effectives d'acquisition et de traitement des données. Cette adaptation dynamique permet au système de changer son comportement, afin de corriger les effets induits par les conditions réelles d'acquisition et d'ajuster les différents paramètres des traitements. Notre approche présente un avantage qui peut être résumé comme suit : le SGT générique n'est pas limité à un type d'objets, ni même à l'utilisation d'un type de tête de mesure. Le SGT est donc complètement indépendant de la nature de l'objet à inspecter, et il permet de modéliser le comportement de plusieurs têtes de mesure. Pour cela, de légères modifications du graphe sont nécessaires, afin que le nouveau graphe puisse prendre en compte les nouveaux paramètres. Ces modifications se font simplement par ajout de nouvelles situations dans le graphe.

Ce système de contrôle de la tête de mesure nécessite pour son fonctionnement, en entrée, plusieurs informations indispensables. Ces informations portent sur les valeurs des paramètres des différentes procédures de traitement, ainsi que sur les figures de mérite à atteindre par ces dernières. Pour cela, un contrôle en amont s'avère indispensable afin de mieux gérer le flux de données en entrée. De même, il faut récupérer la description

---

3D partielle à la sortie du module SGT. C'est pourquoi, nous avons jugé indispensable que ce module soit contrôlé par un deuxième module, appelé graphe de contrôle.

Ce deuxième module, sous la forme d'un graphe de contrôle, synthétise les connaissances *a priori* liées au modèle de l'objet ainsi qu'au système d'acquisition. La séquence de traitements permettant une reconstruction 3D complète de l'objet, ainsi que son évaluation, est élaborée hors ligne par un opérateur et résulte en une planification de la tâche. Ensuite, ce second module a en charge d'exécuter les opérations prévues par la planification de la reconstruction 3D complète de l'objet. Le graphe de contrôle que nous avons réalisé, récupère, après chaque acquisition de la séquence, la reconstruction 3D partielle élaborée par le SGT. Il procède alors à un recalage entre les nuages de points 3D disponibles afin de les exprimer dans un même référentiel. Une étape d'évaluation dimensionnelle partielle est ensuite exécutée afin de valider la qualité du nuage de points 3D ainsi généré. Le processus est enfin réitéré jusqu'à l'achèvement complet de la séquence d'acquisitions. Une fois la reconstruction 3D complète de l'objet obtenue, une phase d'évaluation dimensionnelle complète de l'objet est effectuée en comparant les données 3D mesurées aux données vérité terrain de l'objet (par exemple, obtenues avec une MMT) ou à un modèle CAO de référence.

Les éléments du système de planification et de contrôle ont été validés sur la version prototype du robot de mesure. Notre système de planification a permis de générer une description 3D pseudo-complète de la pièce « Pale de turbine » (avec la configuration actuelle de notre dispositif, on ne peut pas tourner autour de l'objet ; ceci n'empêche pas que le système développé soit utilisable dans le cadre d'une reconstruction complète de l'objet). Pour cela, un graphe de contrôle correspondant à une séquence de quatre acquisitions a été réalisé. La qualité de la gestion des procédures, permettant une reconstruction/évaluation 3D de la pièce, montre l'efficacité du système développé. Ce dernier présente plusieurs avantages, à savoir la prise en compte des erreurs de reconstruction afin de corriger les valeurs des paramètres définies *a priori* pour les différentes procédures, l'ajustement de ces paramètres pour une nouvelle acquisition prévue dans la séquence, la modification facile du graphe de situations contrôlant la tête de mesure, par simple ajout et/ou suppression de situations afin de remplir un cahier de charge donné, etc. L'ensemble des résultats obtenus par notre système est excellent en terme d'automatisation de la chaîne de traitements et de la prise en compte des conditions réelles d'acquisition lors de la phase de reconstruction 3D en ligne. Cela a permis de valider l'approche développée. En revanche, des travaux visant à l'amélioration des procédures d'évaluation des données mesurées par comparaison avec celles de référence seront nécessaires, afin de renforcer la qualité des mesures 3D réalisées. Le système de planification développé étant modulaire et flexible, l'intégration de ces procédures d'évaluation dans ce dernier reste une tâche facile et sans difficulté.

Notre implémentation d'un système intégré est capable de prendre en entrée plusieurs acquisitions et des modèles explicites (modèle CAO pour l'objet à reconstruire ou modèle vérité terrain) et délivre, en sortie, une reconstruction 3D complète de l'objet. Il se caractérise essentiellement par sa capacité :



- d’automatiser toutes les procédures d’acquisition et d’évaluation 3D nécessaires à la reconstruction 3D (représentation des connaissances par les SGTs),
- de contrôler en boucle fermée (feed-back) l’exécution, pour que « l’expérience » obtenue pendant les reconstructions 3D partielles permette d’améliorer constamment, et en ligne, la reconstruction 3D automatique de pièces manufacturées (planification dynamique, auto-apprentissage).

## Perspectives

Ce travail a permis le développement d’un système complet dédié à la reconstruction/évaluation 3D de pièces manufacturées. L’avantage majeur de notre approche reste sa modularité et sa flexibilité. Cependant, plusieurs améliorations quant à la précision de la reconstruction 3D obtenue, et à la qualité de l’évaluation finale, sont nécessaires. Une réflexion a ainsi été menée sur les extensions possibles du travail.

Nous avons ainsi étudié la possibilité de contrôler une deuxième tête de mesure, stéréoscopique par exemple, afin d’enrichir le système avec de nouvelles capacités sensorielles, et de compléter ainsi les primitives 3D surfaciques, en décrivant l’objet avec de nouvelles primitives 3D contours. Le SGT générique développé étant indépendant du type d’objet et de celui de la tête de mesure utilisée, il peut contrôler toute autre tête de mesure. Il est donc possible de multiplier le type de données 3D qui peuvent être générées. Autrement dit, le SGT développé est capable de contrôler plusieurs têtes de mesure à la fois, et cela en rajoutant seulement quelques situations supplémentaires dans le graphe développé. Chaque tête de mesure est actuellement utilisée indépendamment afin de générer des données 3D spécifiques, relatives soit aux contours (vision stéréoscopique), soit aux surfaces (lumière structurée). Toutefois, la coopération active de ces deux approches permettrait une reconstruction 3D plus complète de pièces manufacturées, caractérisées par de grandes surfaces plutôt uniformes et non texturées. Cette fusion de données contours/surfaces devra être étudiée afin d’exploiter au mieux les données issues des deux têtes.

Enfin, une autre possibilité, déjà implémentée et opérationnelle, du système développée concerne la mise à jour des paramètres fixés *a priori* dans le graphe de contrôle. Cet ajustement est effectué par le biais des valeurs de paramètre effectivement déterminées par le SGT. Cela permet au système de planification de s’adapter, au mieux, aux conditions effectives d’acquisition et donc d’améliorer l’évaluation dimensionnelle des reconstructions 3D de pièces qui suivent, par exemple dans une chaîne de production.

# Annexe

## Construction d'un ensemble de niveau

Nous présentons dans ce paragraphe la démarche à suivre pour construire un ensemble de niveaux dont la position du contour de niveau zéro est connue. On affecte la valeur zéro au contour fermé,  $-1$  à la zone à l'intérieur du contour et  $+1$  à la zone à l'extérieur. On peut aussi attribuer (comme dans notre implémentation) la valeur  $-0.5$  à l'intérieur et  $+0.5$  à l'extérieur avec un contour inter-éléments. Cette affectation constitue l'image  $\Psi(., t = 0)$ . On peut ensuite appliquer le schéma dynamique discrétisé de réinitialisation (1.28) :

$$\Psi_{ij}^{n+1} = \Psi_{ij}^n + dt \times \text{sign}(\Psi_{ij}^n) (1 - |\nabla_{ij} \Psi_{ij}^n|)$$

L'estimation de  $\nabla \Psi$  est faite par l'algorithme présenté dans [33]. En se plaçant dans les régions homogènes, le gradient est nul. Dans une région strictement positive, à chaque itération et lorsque le gradient est nul, un élément strictement positif est augmenté de  $dt$  ( $\Psi_{ij}^{n+1} = \Psi_{ij}^n + dt$  selon l'équation 1.28). En revanche, dans une zone strictement négative, et à chaque itération, l'élément est diminué de  $dt$ . Ainsi, après  $n$  itérations de l'équation (1.28), nous obtenons un ensemble de niveaux correctement réparti sur une largeur  $n \cdot dt$  des deux côtés du contour de niveau zéro. On arrête l'évolution lorsque le maximum, en valeur absolue, des  $\Psi_{ij}^{n+1}(., t + dt) - \Psi_{ij}^n(., t)$  est strictement inférieur à un seuil prédéfini. Le choix du pas temporel  $dt$  est effectué selon l'application ; plus  $dt$  est grand, plus la durée de convergence est faible et plus le risque d'instabilité est grand. Nous avons choisi, par mesure de sécurité, un pas temporel  $dt$  de 0.2.

## Détection des passages par zéro de la fonction $\Psi$

La détection des passages par zéro de la fonction  $\Psi$  n'a pas été détaillée dans ce qui précède. Cela n'est pas nécessaire pour contrôler l'évolution du contour actif, car il suffit de connaître le signe de la fonction  $\Psi$  au début de chaque initialisation. Or, afin de visualiser l'évolution de la courbe et donc celle de la segmentation, il serait intéressant de matérialiser le contour. On cherche donc les passages par zéro en détectant les changements de signe entre deux points consécutifs pendant l'évolution, et cela dans les deux directions horizontale et verticale. Le Tableau A.1 illustre l'algorithme, très simple, que nous avons adapté de [47].

TAB. 4.4 – Algorithme de détection des passages par zéro de  $\Psi$ .

Balayage complet de tous les points de la bande principale,

Détection horizontale,

**Si**  $\text{sign}(\Psi(i, j)) \neq \text{sign}(\Psi(i - 1, j))$

**Alors**

$\min(\Psi(i, j), \Psi(i - 1, j))$  est considéré comme le point appartenant au contour

**Fin**

Détection verticale

**Si**  $\text{sign}(\Psi(i, j)) \neq \text{sign}(\Psi(i, j - 1))$

**Alors**

$\min(\Psi(i, j), \Psi(i, j - 1))$  est considéré comme le point appartenant au contour

**Fin**

# Bibliographie

- [1] D. Adalsteinsson et J. Sethian. A fast Level Set method for Propagating Interfaces. *Journal of Computational Physics*, Vol. 118, pp. 269-277, 1995.
- [2] R. Adams et L. Bischof. Seeded Region Growing. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 16(6), pp. 641-647, 1994.
- [3] O. Amadiou, E. Debreuve, M. Barlaud et G. Aubert. Inward and Outward Curve Evolution using Level Set Method. IEEE Signal Processing Society International Conference on Image Processing (ICIP), Kobé, Japan, pp. 188-192, 1999.
- [4] M. Arens et H.-H. Nagel. Representation of Behavioral Knowledge for Planning and Plan-Recognition in a Cognitive Vision System. In M. Jarke, J. Koehler, and G. Lakemeyer (Eds.) : Proceedings of the 25th German Conference on Artificial Intelligence (KI-2002), 16-20 septembre, Aachen, Germany, LNAI 2479, Springer-Verlag : Berlin, Heidelberg, New York, pp. 268-282, 2002.
- [5] M. Arens et H.-H. Nagel. Behavioral Knowledge Representation for the Understanding and Creation of Video Sequences. In Proceedings of the 26th German Conference on Artificial Intelligence (KI-2003), 15-18 septembre, Hamburg, Germany, LNAI 2821, Springer-Verlag : Berlin, Heidelberg, New York, pp. 149-163, 2003.
- [6] M. Arens, A. Ottlik et H.-H. Nagel. Natural Language Texts for a Cognitive Vision System. In : F. van Harmelen (Ed.) : Proceedings of the 15th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI-2002), 21-26 juillet, Lyon, France, IOS Press : Amsterdam, pp. 455-459, 2002.
- [7] K. B. Atkinson. *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*. Whittles publishing, Roseleigh house, Latheronwheel, Caithness, KW5 6DW, Scotland, UK, 1996.
- [8] D. Benoist, Y. Tourbier et S. Germain-Tourbier. *Plans d'expériences : constructions et analyses*. Technique et Documentation, Lavoisier, Paris, 1994.
- [9] M-O. Berger. Les contours actifs : modélisation, comportement et convergence. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France, 1991.
- [10] P. J. Besl et N. D. McKay. A method for Registration of 3D Shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14(2), pp. 239-256, 1992.

- 
- [11] C. Boucher, C. Daul, P. Graebing et E. Hirsch. KBED, A Knowledge-Based Edge Detection System. In Database and Expert System Applications, N. Revell and A.M. Tjoa (Eds.), Lecture Notes in Computer Sciences 978, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, pp. 344-354, 1995.
- [12] C. Boucher. Système à base de connaissances pour la détection contrôlée des contours dans des images à niveaux de gris. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, France, 1996.
- [13] G. Box, W. G. Hunter et J.S. *Statistics for Experimenters*. Wiley, New York, 1978.
- [14] J. Bredno, T. Lehman et K. Spitzer. Automatic Parameter Setting for Balloon Models. Proceedings of SPIE 3979(2) : Symposium on Electronic Imaging, Science and Technology, pp. 1185-1194, 2000.
- [15] D. J. Burr. Elastic Matching of Line Drawings. *IEEE Transactions, on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 3(6), pp. 708-713, 1981.
- [16] Y. Caron, H. Charpentier, P. Makris et N. Vientent. Une mesure de complexité pour la détection de la zone d'intérêt d'une image. *ORASIS, journées francophones des jeunes chercheurs en vision par ordinateur, Fournol, Clermont-Ferrand, France, 23-27 mai, 2005*.
- [17] V. Caselles, F. Catté, F. Coll et T. F. Dibos. A Geometric Model for Active Contours in Image Processing. *Numerische Mathematik*, Vol. 66, pp. 1-31, 1993.
- [18] V. Caselles, R. Kimmel et G. Sapiro. Geodesic Active Contours. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 22(1), pp. 61-79, 1997.
- [19] V. Caselles et B. Coll. Snakes in Movement. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, Vol. 33, pp. 2445-2456, 1996.
- [20] S. Chabrier, C. Rosenberger et B. Emile. Evaluation de la performance de la segmentation d'images par fusion de critères. *ORASIS, journées francophones des jeunes chercheurs en vision par ordinateur, Fournol, Clermont-Ferrand, France, 23-27 mai, 2005*.
- [21] P. Charbonnier et O. Cuisenaire. Une étude des contours actifs : modèles classique, géométrique et géodésique. Rapport de recherche N° 163 (68 pages), laboratoire de télécommunications et télédétection, Université Catholique de Louvain, Belgique, 1996.
- [22] T. F. Chan et L. Vese. An Active Contour Model without Edges. In LNCS, edited by M. Neilsen, P. Johansen, O.F. Olson and J. Weickert, Springer-Verlag, Berlin/New York, Vol. 1687, pp. 141-151, 1999.
- [23] T. F. Chan et L. Vese. Active Contours without Edges. *IEEE Transactions on image processing*, Vol. 10(2), pp. 266-277, 2001.
- [24] E. Choi et P. Hill. Data Sharpening as a Prelude to Density Estimation. *Biometrika*, Vol. 86, pp. 941-94. 1999.
- [25] C. Chesnaud, P. Réfrégier et V. Boulet. Statistical Region Snake-Based Segmentation Adapted to Different Physical Noise Models. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 21(11), pp. 1145-1157, 1999.

- [26] D. L. Chopp. Computing Minimal Surfaces via Level Set Curvature Flow. *Journal of Computational Physics*, Vol. 106, pp. 77-91, 1993.
- [27] D. Comaniciu et P. Meer. Mean Shift : a Robust Approach Toward Feature Space Analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 24(5), pp. 603-619, 2002.
- [28] L. Cohen. On Active Contour Models and Balloons. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing : Image Understanding*, Vol. 53(2), pp. 211-218, 1991.
- [29] I. Cohen. Modèles déformables 2-D et 3-D : Application à la segmentation d'images médicales. Thèse de doctorat, Université de Paris IX - Dauphine, France, 1992.
- [30] C. K. Cowan et A. Bergman. Determining the Camera and Source Light Location for a Visual Task. In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Scottsdale, Arizona, USA, 14-19 mai, pp. 509-514, 1989.
- [31] C. K. Cowan, B. Modayur et J. DeCurtins. Automatic Light Source Placement for Detecting Object Features. In Intelligent Robots and Computer Vision XI, SPIE - Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Vol. 1826, pp. 397-408, 1992.
- [32] E. Debreuve, M. Barlaud. G. Aubert et J. Darcourt. Attenuation Map Segmentation without Reconstruction using A Level Set method in Nuclear Medicine Imaging. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 4-7 octobre, Chicago, Illinois, USA, 1998.
- [33] E. Debreuve. Segmentation par contours actifs en imagerie médicale dynamique : application en cardiologie nucléaire. Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, France, 2000.
- [34] P. Delmas. Extraction des contours de lèvres d'un visage parlant par contours actifs. Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, France, 2000.
- [35] R. Deriche. Optimal Edge Detection using Recursive Filtering. In Proceedings of the International Conference on Computer Vision (ICCV), London, 8-12 juin, pp. 501-505, 1987.
- [36] R. Deriche. Using Canny's Criteria to derive a Recursively Implemented Optimal Edge Detector. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 1(2), pp. 167-187, 1987.
- [37] R. Deriche et O. Faugeras. Les EDP en traitement des images et vision par ordinateur. *Traitement du signal*, Vol. 13(6), 1996.
- [38] L. Douadi, A. Crosnier et M-J. Aldon. Variantes de l'algorithme ICP pour le recalage de données 3D/Couleur. Rapport de recherche (9 pages), Cote : RR-05, N°11983, Laboratoire d'Informatique, Robotique et Microélectronique de LIRMM, DOCTISS, Montpellier, 2005.
- [39] K. Erol. Hierarchical Task Network Planning : Formalization, Analysis and Implementation. Thèse de doctorat, Université de Maryland, College Park, USA, 1995.
- [40] T. Estlin, S. Chien et X. Wang. An Argument fo a Hybrid HTN/Operator-based Approach to Planning. In Procs. of the 4th European Conference on Planning (ECP), Toulouse, France, 24-26 septembre, pp. 184-194, 1997.

- 
- [41] A. Far, S. Kohler et E. Hirsch. 3D Reconstruction of Manufactured Parts using Bi-directional Stereovision-Based Contour Matching and Comparison of Real and Synthetic Images. Machine Vision Applications, MVA, Tsukuba (Japan), 16-18 mai, 2005.
- [42] A. Far, S. Kohler et E. Hirsch. Reconstruction 3D de pièces industrielles à l'aide d'un appariement d'images stéréoscopiques segmentées. *ORASIS, journées francophones des jeunes chercheurs en vision par ordinateur, Fournol, Clermont-Ferrand, France*, Proceedings sur CD-Rom, 2005.
- [43] O. Faugeras et R. Kerivan. Variational principles, Surface Evolution, PDE's, Level set Methods and the Stereo Problem. *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 7, pp. 336-344, 1998.
- [44] V. Feuillard, N. Devictor et R. P. Tan-Luu. Evaluation de la qualité d'une base de données. Dans les Actes du Colloque « 30 Ans de méthodologie de la recherche expérimentale », Aix-en-Provence, 2-3 juin, pp. 13-15, 2005.
- [45] R. E. Fikes et N. J. Nilsson. STRIPS : A new approach th the Application of Theorem Proving to Problem Solving. *Artificial Intelligence* 2, pp. 189-208, 1971.
- [46] Fisker, R. Cartensen et J. M. On Parameter Estimation in Deformable Models. In Proceedings of 14th International Conference on Pattern Recognition, Brisbane, Australie, 16-20 août, Vol. 1, pp. 762-766, 1998.
- [47] A. Foulonneau. Une contribution à l'introduction de contraintes géométriques dans les contours actifs orientés région. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg I, France, 2004.
- [48] T. Frank, M. Haag, H. Kollnig et H.-H. Nagel. Characterization of Occlusion Situations Occuring in Real-World Traffic Scenes. In Proceedings of 4th European Conference on Computer Vision (ECCV), Cambridge, England, 14-18 avril, Vol. 2, pp. 485-494, 1996.
- [49] C. S. Fraser et S. A. Veress. Self-calibration of a Fixed-frame Multiple-Camera System. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 46(11), pp. 1439-1445, 1980.
- [50] C. S. Fraser. Limiting error propagation in network design. *Photogrammetric Engineering and Remonte sensing*, Vol. 53(5), pp. 487-493, 1987.
- [51] C. S. Fraser. *Network Design*. In *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*, K.B. Atkinson, editor, Whittles Publishing, Roseleigh House, Latheronwheel, Caithness, KW5 6DW, Scotland, UK, pp. 256-280, 1996.
- [52] W. T. Freeman et E. H. Adelson. Steerable Filters for Early Vision, Image Analysis, and Wavelet Decomposition. Proceedings of International Conference in Computer Vision (ICCV), Osaka, Japan, 4-7 décembre, pp. 406-415, 1990.
- [53] J. Gambotto. A new Approach to Combining Region Growing and Edge Detection. *Pattern Recognition Letters*. Vol. 14, pp. 869-875, 1993.
- [54] A. Ganoun et R. Canals. Approche robuste de suivi d'objet. *ORASIS 2005, journées francophones des jeunes chercheurs en vision par ordinateur, Fournol, Clermont-Ferrand, France*, Proceedings sur CD-Rom, 23-27 mai, 2005.

- [55] J. Gao, A. Kosaka et A. C. Kak. A deformable Model for Human Organ Extraction. In Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing, Chigago, USA, 4-7 octobre, Vol. 3, pp. 323-327, 1998.
- [56] R. Gerber et H.-H. Nagel. Occurence Extraction from Image Sequence of Road Traffic Scenes. In Proc. Workshop on Cognitive Vision, 19-20 september 2002, L. Van Gool and B. Schiele, (Eds.) ETH Zurich, Switzerland, pp. 1-8, 2002.
- [57] J. Gomes et O. Faugeras. Reconciling Distance : Functions and Level Sets. In *LNCS, Eds. M. Nielsen, P. Johansen, O. F. Olsen, and J. Weickert, Scale-Space Theories in Computer Vision*, Berlin, Germany, Vol. 1682, pp. 70-81, 1999.
- [58] J. Gonzàlez, J. Varona, F. X. Roca et J. J. Villanueva. Situation Graph Trees for Human Behavior Modelling. In 7th Catalan Conference for Artificial Intelligence (CCIA), Barcelona, Spain, 21-22 octobre, 2004.
- [59] J. Gonzàlez, J. Varona, F. X. Roca et J. J. Villanueva. DebreuveA Comparison Framework for Walking Performances using aSpaces. *Electronic letters on Computer Vision and Image Analysis, Special Issue on Articulated Motion*, Vol. 5(3), pp. 105-116, 2005.
- [60] L. V. Gool, T. Koninckx et T. Jaeggli. Getting to Gripes With 3D Modeling. In Proceedings of XII European Signal Processing Conference, EUSIPCO, Vienne (Autriche), 6-10 septembre, pp. 1135-1138, 2004.
- [61] J. Goupy. *La méthode des plans d'expériences*. Optimisation des choix des essais & de l'interprétation des résultats. Édition Dunod, 1988.
- [62] P. Graebing, C. Boucher, Ch Daul et E. Hirsch. 3D Sculptured Surface Analysis using a Structured Light Approach. in Videometrics IV, S. El-Hakim Ed, Proc. SPIE, 9-14 juillet, Vol. 2598, pp. 15-139, 1995.
- [63] P. Graebing, A. Lallement et E. Hirsch. Three Dimensional Vision based Quality Control of Free Form Surfaces. Application to the Inspection of Turbine Blades. 5th International Conference on Quality Control by Artificial Vision (QCAV), Le Creusot (France), 21-23 mai, pp. 84-89, 2001.
- [64] P. Graebing, A. Lallement, D. -Y. Zhou et E. Hirsch. Optical High Precision 3D Dimensional Vision Based Quality Control of Manufactured Parts Using Synthetic and Knowledge for Image Data Evaluation and Interpretation. *Applied Optics : Information Processing*, Vol. 41(14), pp. 2627-2643, 2002.
- [65] F. A. Graybill. *An Introduction to Linear Statistical Models*. Ed. Mc Graw-Hill Book, Colorado (USA), Vol. 1, 1971.
- [66] M. A. Grayson. The Heat Equation Shrinks Embedded Plane Curves to Round Points. *Journal of Differential Geometry*, Vol. 26, pp. 285-314, 1987.
- [67] F. Guillon. Modélisation et optimisation par plans d'expériences d'un moteur à commutations électriques. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologie de Lille, France, 1997.
- [68] C. Le Guyader. Imagerie mathématique : Segmentation sous contraintes géométriques. Théorie et applications. Thèse de doctorat, INSA de Rouen, France, 2004.



- [69] M. Haag, T. Frank, H. Kollnig et H.-H. Nagel. Influence of an Explicitly Modelled 3D Scene on the Tracking of Partially Occluded Vehicles. *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 65(2), pp. 206-225, 1997.
- [70] M. Haag et H.-H. Nagel. Tracking of Complex Driving Manoeuvres in Traffic Image Sequences. *Image and Vision Computing*, Vol. 16(8), pp. 517-527, 1998.
- [71] M. Haag et H.-H. Nagel. Combination of Edge Element and Optical Flow Estimates for 3D-Model-Based Vehicle Tracking in Traffic Image Sequences. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 35(3), pp. 295-319, 1999.
- [72] M. Haag et H.-H. Nagel. Incremental Recognition of Traffic Situations from Video Image Sequences. *Image and Vision Computing*, Vol. 18(2), pp. 137-153, 2000.
- [73] J. Haddon et J. Boyce. Image Segmentation by Unifying Region and Boundary Information. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 12(10), pp. 929-948, 1990.
- [74] R. Hartley et A. Zissermann. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000.
- [75] A. Hedayat, et W. D. Wallis. *Hadamard Matrices and their applications*. *The Annals of Statistics*, Vol. 6(6), pp. 1184-1238, 1978.
- [76] M. Herbin, N. Bonnet et P. Vautrot. A Clustering Method Based on the Estimation of The Probability Density Function and on the Skeleton by Influence Zones : Application to Image Processing. *Pattern Recognition Letters*, Vol. 17(11), pp. 1141-1150, 1996.
- [77] B. Horn. Non-correlation Methods for Stereo Matching. *Photogrammetric Engineering and remote Sensing*, Vol 49, pp. 535-536, 1983.
- [78] A. K. Jain, R. P. W. Duin et J. Mai. Statistical Pattern Recognition : a Review. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22(1), pp. 4-37, 2000.
- [79] S. Jehan-Besson, M. Barlaud et G. Aubert. DREAM2S : Deformable Regions Driven by an Eulerian Accurate Minimization Method for Image and Video Segmentation. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 53(1), pp. 45-70, 2003.
- [80] S. Jehan-Besson. Modèles de contours actifs basés région pour la segmentation d'images et de vidéos. Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, France, 2003.
- [81] M. Kass, A. Witkin et D. Terzopoulos. Snakes : Active Contour Models. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 1(4), pp. 321-331, 1988.
- [82] H. Kautz, D. McAllester et B. Selman. Encoding Plans in Propositional Logic. In *Proceedings of the 5th International Conference on the Principle of Knowledge Representation and Reasoning (KR'96)*, pp. 374-384, 1996.
- [83] M. G. Kendall et A. Stuart. *The Advanced Theory of Statistics*. éditeur Charles Griffin & Cy, Vol. 2 et 3, 1983.
- [84] R. Khemmar, A. Lallement et E. Hirsch. Parameter Setting Through Design of Experiments for the Automated Delineation of Regions of Interest. In *Proceedings*

- of XII European Signal Processing Conference, EUSIPCO, Vienne (Autriche), 6-10 septembre, pp. 1135-1138, 2004.
- [85] R. Khemmar, A. Lallement et E. Hirsch. Système de planification intelligent dédié à l'inspection 3D de pièces manufacturées. *ORASIS, journées francophones des jeunes chercheurs en vision par ordinateur, Fournol, Clermont-Ferrand, France*, Proceedings sur CD-Rom, 23-27 mai, 2005.
- [86] R. Khemmar, A. Lallement et E. Hirsch. Design of an Intelligent System for the Automated Vision-based Evaluation of Manufactured Parts. 7th International Conference on Quality Control by Artificial Vision (QCAV), Nagoya - Aichi, Japan, May 18-20, pp. 241-246. 2005.
- [87] J. Kim, J.W. Fisher, M. Cetin, A. Yezzi et A.S. Willsky. Incorporating Complex Statistical Information in Active Contour-based Image Segmentation. In Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing, Barcelone, Espagne, September 14-17, pp. 655-658, 2003.
- [88] R. Kimmel, K. Siddiqi, B. Kimia et A. Bruckstein. Shape from Shading : Level Set Propagation and Viscosity Solutions. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 16, pp. 107-133, 1995.
- [89] S. Kohler et E. Hirsch. Cognitive Intelligent Sensory System for Vision-based Quality Control. Quality Control by Artificial Vision , QCAV 2003, Gatlinburg (USA), Proc of SPIE. Vol. 5132, pp. 331-341, 2003.
- [90] S. Kohler, A. B. Far et E. Hirsch. Intelligent Approaches for Computer Vision-Based Quality Control. 7th International Conference on Quality Control by Artificial Vision (QCAV), Nagoya - Aichi, Japan, May 18-20, pp. 247-252, 2005.
- [91] A. Kumar, A. Tannenbaum et G. Balas. Optical-flow : A curve Evolution Approach. *IEEE Transaction on Image Processing*, Vol. 5, pp. 598-610, 1996.
- [92] A. Lallement, R. Khemmar et E. Hirsch. Automated Delineation of Regions of Interest Through Adaptive Segmentation and Interpretation of Images in view of Dimensional Evaluation of Manufactured Parts. *Journal of Electronic Imaging (JEI)*, Vol. 13(3), pp. 462-473, 2004.
- [93] Larsen, O. V. Radeva et P. E. Marti. Bounds on the Optimal Elasticity Parameters for a Snake. Proceedings of 8th International Conference on Image Analysis and Processing (ICIAP), Sanremo, Italy, pp. 37-42, 1995.
- [94] Lee, M.S et G. Medioni. Inferred Descriptions in Terms of Curves, Regions and Junctions from Sparse, Noisy Binary Data. In Proc. of the IEEE International Symposium on Computer Vision, Coral Gable, Florida, pp. 73-78, 1995.
- [95] M. E. Levonton, O. Faugeras, W. E. L. Grimson et W.M Wells. Level Set Based Segmentation with Intensity and Curvature Priors. In *Mathematical Methods in Biomedical Image Analysis*, 2000.
- [96] P. Lopez. Comportement mécanique d'une fracture en cisaillement : Analyse par plan d'expériences des données macaniques et morphologiques connue sur une fracture. Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I, France, 2000.

- [97] L. Lorigo, O. Faugeras, W. Grimson, R. Keriven et R. Kikinis. Segmentation of Bone in Clinical Knee Mri Using Texture-based Geodesic Active Contours. In Proceedings of 1st International Conference on *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*. W. M. Wells et al. (Eds.), Springer Verlag, Berlin, pp. 1195-1204, 1998.
- [98] T. Ma. Active Contour Models : Consistency, Stability, and Parameter Estimation. Thèse de doctorat, Université de Yale, USA, 1998.
- [99] A. D. Mali et Kambhampati. Encoding HTN Planning in Propositional Logic. In : R. G. Simmons, M. M. Veloso, and S. Smith (Eds.) : Proc. of the 4th International Conference on Artificial Intelligence Planning Systems (AIPS), Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 7-10 juin, pp. 190-198, 1998.
- [100] R. Malladi, J. Sethian et Vemuri. Evolutionary Fronts for Topology Independent Shape Modeling and Recovery. In Proc. of 3rd European Conference on Computer Vision (ECCV), Stockholm, Suède, 2-6 mai, Vol. 1, pp. 3-13, 1994.
- [101] R. Malladi et J. Sethian. A unified Framework for Shape Segmentation, Representation, and Recognition. Rapport LBL-36069, Lawrence Berkeley Laboratory, Université de California, 1994.
- [102] R. Malladi, J. Sethian et Vemuri. Shape Modeling with Front Propagation : A Level Set Approach. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 17(2), pp. 158-175, 1995.
- [103] R. Malladi et J. Sethian. A Real-Time Algorithm for Medical Shape Recovery. In Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), Bombay, India, 4-7 juin, pp. 304-310, 1998.
- [104] A. Marquina et S. Osher. Explicit Algorithms for a New Time Dependent Model Based on Level Set Motion for Nonlinear Deblurring and Noise Removal. Rapport UCLA-CAM, pp. 99-55, 1999.
- [105] S. O. Mason. *Conceptual Model of the Convergent Multistation Network Configuration Task*. Photogrammetric Record, pp. 277-299, 1995.
- [106] S. O. Mason et A. Gruen. Automatic Sensor Placement for Accurate Dimensional Inspection. *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 3(61), pp. 454-467, 1995.
- [107] S. O. Mason. Heuristic reasoning strategy for automated sensor placement. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 63(9), pp. 1093-1102, 1997.
- [108] D. Mathieu, J. Nony et R. P. Tan-Luu. NemrodW - *Plan d'expériences* - [CD d'évaluation], LPRAI, Marseille, 2003.
- [109] E. Maurincomme, D. Friboulet, G. Finet, I. Magnin et J.H.C. Reiber. ADDER : A Snake-based Segmentation Approach for Intravascular Ultrasound Images. In Proc. of Conference Digital Image Computing : Techniques and Applications (DICTA). Eds. Ka Kit Fung and Athula Ginige, Australian Pattern Recognition Society, Sydney, Australia, 8-10 décembre, pp. 422-429, 1993.
- [110] D. Mumford et J. Shah. Optimal Approximation by Piecewise Smooth Functions and Associated Variational Problems. *Communications on Pure and Applied Mathematics*. Vol. 42, pp. 577-684. 1989.

- [111] H.-H. Nagel. From Image Sequences towards Conceptual Descriptions. *Image and Vision Computing*, Vol. 6(2), pp. 59-74, 1988.
- [112] H.-H. Nagel, H. Kollnig, M. Haag et H. Damm. The association of Situation Graphs Variations in Image Sequences. Institut für Algorithmen und Kognitive Systeme, Universität Karlsruhe (TH) , Germany, 1995.
- [113] H.-H. Nagel. Natural Language Description of Image Sequences as a Form of Knowledge Representation. In Proceedings of the 23rd Annual German Conference on Artificial Intelligence (KI-99), Bonn, Germany, W. Burgard, T. Christaller et A. B. Cremers (Eds.), LNCS 1701, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 13-15 septembre, pp. 45-60, 1999.
- [114] G. Olague. Planification du placement de caméras pour des mesures 3D de précision. Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, France, 1998.
- [115] A. Osher et J. Sethian. Fronts Propagating with Curvature Dependent Speed : Algorithms Based on Hamilton-Jacobi Formulation. *Journal of Computational Physics*, Vol. 79, pp. 12-49, 1988.
- [116] N. Paragios et R. Deriche. A PDE-based Level Set Approach for Detection and Tracking of Moving Objects. *Rapport de recherche INRIA*, France, Vol. 3173, 1997.
- [117] N. Paragios et R. Deriche. A PDE-based Level Set approach for Detection and Tracking of moving objects. In Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision, Bombay, India, 4-7 janvier, pp. 1139-1145, 1998.
- [118] N. Paragios et R. Deriche. Geodesic Active Regions for Texture Segmentation. *Rapport de recherche INRIA*, France, Vol. 3440, 1998.
- [119] N. Paragios et R. Deriche. Geodesic Active Regions for Motion Estimation and Tracking. *Rapport de recherche INRIA*, France, Vol. 3631, 1999.
- [120] N. Paragios. Geodesic Active Regions and Level Set methods : Contributions and Applications in Artificial Vision. Thèse de doctorat, Université de Nice Sophia-Antipolis, France, 2000.
- [121] T. Pavlidis et Y. Liow. Integrating Region Growing and Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 12(3), pp. 225-233, 1990.
- [122] M. Peot et D. Smith. Suspending Recursion in Causal Link Planning. In Proc. of the International Conference on Artificial Intelligence Planning System (AIPS), 29-31 mai, pp. 182-190, 1996.
- [123] R. Péteri, J. Celle et T. Ranchin. Contours actifs et analyse multirésolution pour l'extraction de réseaux de rues à partir d'images satellites. *ORASIS, journées francophones des jeunes chercheurs en vision par ordinateur, Gerardmer, France*, 19-23 mai, 2003.
- [124] R. Phan Tan Luu. Les critères d'optimalité : utiles, nécessaires, suffisants?. Dans les Actes du Colloque « 30 Ans de méthodologie de la recherche expérimentale », Université Paul Cézanne, Aix-en-Provence, 2-3 juin, pp. 10-11, 2005.
- [125] M. Pillet. *Les plans d'expériences par la méthode TAGUCHI*. Les éditions d'organisation, Paris, 1997.

- 
- [126] M. Pillet et E. Duclos. Interpretation d'un plan d'expériences dans le cas de réponse non mesurable : utilisation de la variable de Wilcoxon Mann-Whitney. Dans les Actes du Colloque « 30 Ans de méthodologie de la recherche expérimentale » Université Paul Cézanne, Aix-en-Provence, 2-3 juin, pp. 85-88, 2005.
- [127] R. L. Plackett et J. P. Burman. *The Design of Optimal Multifactorial Experiments*. Biometrika, Vol. 33, pp. 305-325, 1946.
- [128] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky et W. T. Vetterling. Numerical Recipes in C. The Art of Scientific Computing. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1992.
- [129] J. J. Rousselle et N. Vincent. Plans d'expériences et segmentation par contours actifs. Dans les Actes du Colloque National de la Recherche en IUT, Le Creusot (France), 15-16 mai, pp. 209-214, 2002.
- [130] J. J. Rousselle et N. Vincent. Design of Experiments to Set Active Contours. In Proceedings of the 6th International Conference on Quality Control by Artificial Vision (QCAV), Gatlinburg, Tennessee, USA, May 19-23, Vol. 5132, pp. 51-55, 2003.
- [131] J. J. Rousselle. Les contours actifs, une méthode de segmentation, application à l'imagerie médicale. Thèse de Doctorat, Université François Rabelais - Tours, France, 2003.
- [132] M. Saadatesresht, C. S. Fraser, F. Samadzadegan et A. Azizi. Visibility Analysis in Vision Metrology Network Design. The Photogrammetric Record, Vol. 19(107), pp. 219-236, 2004.
- [133] E. D. Sacerdoti. Planning in a Hierarchy of Abstraction Spaces. *Artificial Intelligence*. Vol. 5, pp. 115-135, 1974.
- [134] E. D. Sacerdoti. A structure for Plans and Behavior. Elsevier-North Holland, Amsterdam, RC Schank, 1977.
- [135] S. Sakane, M. Ishii et M. Kakikura. Occlusion avoidance of visual sensors based on a hand eye action simulator system : Heaven. *Advanced Robotics*, Vol. 2(2), pp. 149-165, 1987.
- [136] S. Sakane et T. Sato. Automatic Planning of Light Source and Camera Placement for an Active Photometric Stereo System. In *proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sacramento, California, USA*, pp. 1080-1087, 1991.
- [137] S. Sakane, R. Niepold, T. Sato et T. Shirai. Illumination setup planning for a hand-eye system based on an environmental model. *Advanced Robotics*, Vol. 6(4), pp. 461-482, 1992.
- [138] R. Samadani. A Deformable Model for Human Organ Extraction. International Symposium on Optical Applied Science en Engineering. Proc SPIE : Geometric Methods in Computer Vision, San Diego, California, USA, Vol. 1570, pp. 202-213, 1991.
- [139] C. Samson, L. Blanc-Féraud, G. Aubert et J. Zerubia. A level Set Model for Image classification. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 40(3), pp. 187-197, 2000.

- [140] K. Schäfer. Unscharfe zeitlogische Modellierung von Situation und Handlungen in Bildfolgenauswertung und Robotik. Dissertation, Fakultät für Informatik der Universität Karlsruhe (TH), Juli 1996. Published in : Dissertationen zur Künstlichen Intelligenz (DISKI), Band 135, Infix Verlag, St. Augustin, Germany, 1996.
- [141] Ch. Schoenenberger, P. Graebing et E. Hirsch. Recalage de séquences spatiales d'images en vue d'une inspection et d'une reconstruction dimensionnelles de surfaces libres. Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle. RFIA'98, Clermont-Ferrand (France), Proc. Vol. 3, pp. 283-292, janvier 1998.
- [142] M. Sergent. Bon et mauvais usages des matrices d'expériences uniformes. Dans les Actes du Colloque « 30 Ans de méthodologie de la recherche expérimentale ». Université Paul Cézanne, Aix-en-Provence, 2-3 juin, pp. 21-24, 2005.
- [143] J. A. Sethian. *Level Set Methods*. Cambridge University Press, New York (USA), 1996.
- [144] J. A. Sethian. *Level Set Methods and Fast Marching Methods : Evolving Interfaces in Computational Geometry, Fluid Mechanics, Computer Vision and Material Sciences*. Cambridge Monograph on Applied and Computational Mathematics. Cambridge University Press, New York (USA), 1999.
- [145] J. Sethian. Curvature Flow and Entropy Conditions Applied to Grid Generation. *Journal of Computational Physics*, Vol. 115, pp. 440-454, 1994.
- [146] J. Sethian. Numerical Algorithms for Propagating Interfaces : Hamilton-Jacobi Equations and Conservation Laws. *Journal of Differential Geometry*, Vol. 31, pp. 131-161, 1990.
- [147] J. A. Sethian. Curvature and the Evolution of Fronts. Comm. in math, Physics, Vol. 101, pp. 487-499, 1985.
- [148] J. A. Sethian. A Fast Marching Level Set Method for Monotonically Advancing Fronts. In Proc. Nat. Ac. Science, Vol. 93, pp 1591-1694, 1996.
- [149] K. Siddiqi, Y. B. Lauzière, A. Tannenbaum et S. W. Zucker. Area and Length Minimizing Flows for Shape Segmentation. *IEEE Transactions in Image Processing*, Vol. 7, pp. 433-443, 1998.
- [150] G. Strang. *Introduction to Applied Mathematics*. Wellesley-Cambridge Press, Boston (USA), 1986.
- [151] M. Sussman, P. Smereka et S. Osher. A Level Set Approach for Computing Solutions to Incompressible Two-phase Flow. *Journal of Computational Physics*, Vol. 114, pp. 146-159, 1994.
- [152] G. Taguchi. Linear Graphs for Orthogonal Arrays and their Applications to Experimental Designs with the aid of Various Techniques. *Reports of Statistical Application Research, Union of Japanese Scientists and Engineers*. pp. 1-43, 1959.
- [153] K. Tarabanis et R. Y. Tsai. Computing Viewpoints that Satisfy Optical Constraints. In Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Hawaii, USA, 3-6 juin, pp. 152-158, 1991.

- [154] K. A. Tarabanis, R. Y. Tsai et P. K. Allen. The MVP Sensor Planning System for Robotic Vision Tasks. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 11(1), pp. 72-104, 1995.
- [155] D. Terzopoulos, A. Witkin et M. Kass. Constraints on Deformable Model : Recovering 3D Shape and non Rigid Motions. *Artificial Intelligence*, Vol. 36, pp. 91-123, 1988.
- [156] R. Y. Tsai et K. Tarabani. Model-based Planning of Sensor Placement and Optical Settings. In Proc. of Conference of Sensor Fusion II : Human and Machine Strategies (SPIE), Philadelphia, USA, pp. 5-89, 1989.
- [157] R. Tsai et S. Osher. Level Set Methods in Image Science. *Communication Mathematical Science*, Vol. 1(4), pp. 1-20, 2003.
- [158] M. G. Vigier. *Pratique des plans d'expériences : Méthodologie Taguchi*. Les éditions d'organisation. 1988.
- [159] D. Wilkins. Practical planning : Extending the Classical AI Planning Paradigm. *The Morgan Kaufmann Series in Representation and Reasoning*. Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, USA, 1988.
- [160] D. J. Williams et M. Shah. A Fast Algorithm for Active Contours and Curvature Estimation. *CVIGP Computer Vision Graphics Image Process : Image Understanding*, Vol. 55(1), pp. 14-26, 1992.
- [161] Xu, C. Prince et J. L. Snakes, Shapes and Gradient Vector Flow. *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 7(3), pp. 359-369, 1998.
- [162] A. Yaacoubi, A. Bacaoui, K. Nyazi, A. Dahbi, C. Bennouna et R. P. Than-luu. Utilisation de la M.R.E. pour l'optimisation des conditions de preparation des charbons actifs. Dans les Actes du Colloque « 30 Ans de méthodologie de la recherche expérimentale ». Université Paul Cézanne, Aix-en-Provence, 2-3 juin, pp. 108-111, 2005.
- [163] A. Yezzi, A. Tsai et A. Willsky . A Statistical Approach to Snakes for Bimodal and Trimodal Imagery. In Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Computer Vision, Kerkyra, Corfu, Grece, 20-25 septembre, Vol. 2, pp. 898-903, 1999.
- [164] S. Yi, R. M. Haralick et L. G. Shapiro. Optimal Sensor and Light Source Positioning for Machine Vision. *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 61(1), pp. 122-137, 1995.
- [165] H. K. Zhao, S. Osher, B. Merriman et M. Kang. Implicit, Nonparametric Shape Reconstruction from Unorganised Points Using A Variational Level Set Method. *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 80, pp 295-319, 2000.
- [166] S. Zhu et A. Yuille. Region competition : Unifying Snakes, Region Growing, and Bayes/MDL for Multiband Image Segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 18(9), pp. 884-900, 1996.
- [167] [http://covisys.iaks.univ-karlsruhe.de/Vid-Text/f\\_limette](http://covisys.iaks.univ-karlsruhe.de/Vid-Text/f_limette).

# Liste de publications

## Revue internationale

- A. Lallement, R. Khemmar and E. Hirsch. Automated Delineation of Regions of Interest Through Adaptive Segmentation and Interpretation of Images in view of Dimensional Evaluation of Manufactured Parts. *Journal of Electronic Imaging (JEI)*, Vol. 13(3), pp. 462-473, July 2004.

## Conférences internationales avec actes et comité de lecture

- R. Khemmar, A. Lallement and E. Hirsch. Parameter Setting Through Design of Experiments for the Automated Delineation of Regions of Interest. XII European Signal Processing Conference, EUSIPCO, Vienne (Austria), September 6-10, pp. 1135-1138, 2004.

- R. Khemmar, A. Lallement and E. Hirsch. Design of an Intelligent Self-Reasoning System for the Automated Vision-based Evaluation of Manufactured Parts. 7th International Conference on Quality Control by Artificial Vision, QCAV, Nagoya (Japan), May 18-20, pp. 241-246, 2005.

## Conférences nationales avec actes et comité de lecture

- R. Khemmar, A. Lallement et E. Hirsch. Système de planification intelligent dédié à l'inspection 3D de pièces manufacturées. Journées francophones des jeunes chercheurs en vision par ordinateur, ORASIS, Clermont-Ferrand (France), 23-27 mai, article N°17, 2005.



## Résumé

La mise en œuvre d'un système complet de reconstruction 3D d'objets quasi-polyédriques par vision par ordinateur, par exemple en vue d'une inspection et d'un contrôle qualité, nécessite de coordonner un ensemble de processus complexes permettant l'acquisition et l'analyse des données image, leur évaluation dimensionnelle ainsi que leur comparaison avec un modèle de référence. Notre contribution porte sur le développement d'un système de vision reposant sur une gestion automatique des traitements permettant une analyse dimensionnelle complète d'une pièce manufacturée incluant des surfaces gauches, et autorisant le contrôle de têtes de mesure variées. Il met à profit des connaissances conceptuelles *a priori* portant non seulement sur l'objet à analyser, mais également sur son environnement, et s'articule autour de la coopération de deux modules distincts. Le premier module, organisant et contrôlant le déroulement de l'application, repose sur une synthèse des connaissances *a priori* liées au modèle de l'objet ainsi qu'au système d'acquisition. Plus spécifiquement, la séquence de traitements est élaborée hors-ligne et planifie la reconstruction 3D complète de l'objet et son évaluation. Le second exploite le formalisme des arbres de graphes de situation et réalise, en ligne, les opérations d'acquisition et de reconstruction partielle planifiées. Il est également capable de s'adapter dynamiquement aux conditions réelles de prise de vue et de modifier automatiquement les conditions effectives d'acquisition et de traitement des données. Enfin, dans le but d'automatiser complètement la chaîne de traitements, une procédure de détournement de l'objet du fond de l'image a été développée. Afin d'éviter tout post-traitement, une approche de segmentation par contours actifs a été privilégiée et une méthode de réglage des paramètres par plans d'expériences a été adoptée. L'ensemble des développements a été partiellement validé par application à l'évaluation d'une pale de turbine.

## Mots-clés

Vision par ordinateur, reconstruction 3D, automatisation du processus, planification, graphes de situation, segmentation par contours actifs, plans d'expériences, inspection dimensionnelle et contrôle qualité.

## Abstract

The set-up of a full 3D reconstruction vision-based system for quasi-polyhedral objects, for example in view of inspection and quality control tasks, requires the coordination of a set of complex processes allowing acquisition and analysis of image data, their dimensional evaluation, as well as their comparison with some reference model. Our contribution concerns the development of a computer vision system relying on an automated management of the processing allowing the full dimensional analysis of manufactured part including free-form surfaces, and enabling the control of various measuring heads. It makes use of *a priori* conceptual knowledge not only related to the object to be analyzed, but also to its environment, and is articulated around the cooperation of two distinct modules. The first module, organizing and controlling the application execution, relies on the synthesis of *a priori* knowledge related to the object model, as well as to the acquisition system. More specifically, the processing sequence is elaborated off-line and plans the full 3D reconstruction of the object and its evaluation. The second exploits the Situation Graph Trees formalism and carries out, on line, the planned acquisition and partial reconstruction operations. It is also able to dynamically adapt its behaviour to the actual acquisition conditions and to modify automatically the real acquisition and data processing conditions. Lastly, with the aim to fully automate the data processing chain, a procedure for object delineation from the image background has been developed. In order to avoid any post-processing, a segmentation approach using active contours has been privileged and a parameter adjustment method using design of experiments has been adopted. The whole of the developments has been partially validated by application to the evaluation of a turbine blade.

## Keywords

omputer vision, 3D reconstruction, process automation, planning, situation graph trees, active contour based segmentation, design of experiments, dimensional inspection and quality control.