UNIVERSITE DE STRASBOURG

FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE

Année 2018 N°22

THESE

Présentée pour le Diplôme d'Etat de Docteur en Chirurgie Dentaire
le 24/05/2018

par

PHILIPPIDES Nicolas

né le 26/03/1991 à STRASBOURG

LES ANALYSES CEPHALOMETRIQUES EN RESEAU, ETAT DES LIEUX AVANT INFORMATISATION

Président	:	Monsieur le Professeur MEYER Florent
Assesseurs	:	Monsieur le Docteur BOLENDER Yves
		Madame le Docteur GROS Catherine-Isabelle
		Madame le Docteur WAGNER Delphine
Membre invité	:	Monsieur le Docteur BONOMI-DUNOYER Hadrien

UNIVERSITE DE STRASBOURG

FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE DE STRASBOURG

Doyen : Professeur C. TADDEI-GROSS

Doyens honoraires : Professeur R. FRANK
Professeur M. LEIZE
Professeur Y. HAIKEL

Professeurs émérites : Professeur W. BACON
Professeur H. TENENBAUM

Responsable des Services Administratifs : Mme F. DITZ-MOUGEL

Professeurs des Universités

V. BALL	Ingénieurie Chimique, Energétique - Génie des Procédés
A. BLOCH-ZUPAN	Sciences Biologiques
F. CLAUSS	Odontologie Pédiatrique
J-L. DAVIDEAU	Parodontologie
Y. HAÏKEL	Odontologie Conservatrice - Endodontie
O. HUCK	Parodontologie
M-C. MANIERE	Odontologie Pédiatrique
F. MEYER	Sciences Biologiques
M. MINOUX	Odontologie Conservatrice - Endodontie
A-M. MUSSET	Prévention - Epidémiologie - Economie de la Santé - Odontologie Légale
C. TADDEI	Prothèses
B. WALTER	Prothèses

Maîtres de Conférences

S. BAHI-GROSS	Chirurgie Buccale - Pathologie et Thérapeutique - Anesthésiologie et Réanimation
L. BIGEARD	Prévention - Epidémiologie - Economie de la Santé - Odontologie Légale
Y. BOLENDER	Orthopédie Dento-Faciale
F. BORNERT	Chirurgie Buccale - Pathologie et Thérapeutique - Anesthésiologie et Réanimation
A. BOUKARI	Chirurgie Buccale - Pathologie et Thérapeutique - Anesthésiologie et Réanimation
O. ETIENNE	Prothèses
F. FIORETTI	Odontologie Conservatrice - Endodontie
C-I. GROS	Sciences Anatomiques et Physiologiques, Occlusodontiques - Biomatériaux - Biophysique - Radiologie
S. JUNG	Sciences Biologiques
N. LADHARI	Sciences Anatomiques et Physiologiques, Occlusodontiques - Biomatériaux - Biophysique - Radiologie
F. OBRY	Odontologie Pédiatrique
D. OFFNER	Prévention - Epidémiologie - Economie de la Santé - Odontologie Légale
R. SERFATY	Odontologie Conservatrice - Endodontie
M. SOELL	Parodontologie
E. WALTMANN	Prothèses

Equipes de Recherche

N. JESSEL	INSERM / Directeur de Recherche
Ph. LAVALLE	INSERM / Directeur de Recherche
H. LESOT	CNRS / Directeur de Recherche
M-H. METZ-BOUTIGUE	INSERM / Directeur de Recherche
P. SCHAAF	UdS / Professeur des Universités / Directeur d'Unité
B. SENGER	INSERM / Directeur de Recherche

À Monsieur le Professeur Florent MEYER

Professeur des Universités

Praticien Hospitalier

Département des Sciences Biologiques ; UFR d'Odontologie de Strasbourg

Merci de m'avoir fait l'honneur et le plaisir de présider ce jury de thèse.

Merci pour votre disponibilité et votre implication en tant qu'enseignant et clinicien durant mes années d'externat.

Veuillez-trouver ici l'expression de ma reconnaissance et sincère estime.

À Monsieur le Docteur Yves BOLENDER

Maître de Conférences des Universités
Praticien Hospitalier
Unité Fonctionnelle d'Orthopédie Dento-Faciale ; UFR d'Odontologie de Strasbourg

Merci de m'avoir fait l'honneur et le plaisir de codiriger ce travail.

Merci pour la qualité de l'enseignement que vous m'avez prodigué tout au long de ma formation théorique et pratique. Votre implication et votre pédagogie m'ont permis d'acquérir de précieuses connaissances au cours de mon cursus.

Veuillez-trouver ici mes sincères remerciements et le témoignage de mon profond respect.

À Madame le Docteur Catherine-Isabelle GROS

Maître de Conférences des Universités
Praticien Hospitalier
Unité Fonctionnelle de Radiologie ; UFR d'Odontologie de Strasbourg

Merci de m'avoir fait l'honneur et le plaisir de participer au jury de cette thèse.

Votre expertise dans les examens radiologiques m'a été d'une aide précieuse tout au long de mes études.

Veuillez-trouver ici l'expression de ma profonde gratitude.

À Madame le Docteur Delphine WAGNER

Assistant Hospitalo-Universitaire
Unité Fonctionnelle D'Orthopédie Dento-Faciale ; UFR d'Odontologie de Strasbourg

Merci de m'avoir fait l'honneur et le plaisir de codiriger ce travail.

Merci pour vos conseils, votre disponibilité et votre implication qui ont su développer ma pratique clinique.

Veuillez-trouver ici mes sentiments respectueux et le témoignage de ma profonde considération.

À Monsieur le Docteur Hadrien BONOMI-DUNOYER

Ancien Assistant Hospitalo-Universitaire
Unité Fonctionnelle D'Orthopédie Dento-Faciale ; UFR d'Odontologie de Strasbourg

Merci de m'avoir fait l'honneur et le plaisir de diriger ce travail.

Merci pour votre aide précieuse et votre accompagnement tout au long de ce projet. Merci également pour le savoir et les techniques que vous m'avez transmis avec toujours énormément d'enthousiasme.

Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mes sincères remerciements et de ma profonde considération.

À mes parents, *que j'aime. Je vous remercie de m'avoir apporté depuis toujours le cadre et le soutien le plus complet que l'on puisse souhaiter. Merci pour votre confiance, votre amour, votre dévouement et toutes les valeurs que vous m'avez transmises. Je suis fier de vous avoir comme parents, et n'aurai jamais pu rêver mieux. Ce travail marquant la fin de mes études vous est dédié, car c'est grâce à vous que j'en suis là aujourd'hui.*

À mes frères, *avec qui j'ai partagé mon enfance. Je suis fier des parcours que vous avez accomplis, et vous souhaite le meilleur à venir.*

À mes meilleurs amis, Alex, Julia, Louis, Pauline, Vincent, *avec qui j'ai partagé tant de moments inoubliables ! Merci de ce que vous m'avez toujours apporté. Vous avez fait de moi celui que je suis aujourd'hui.*

À Pierre, *qui mérite sa mention très spéciale. En plus de te remercier de m'avoir accompagné pour absolument tout, merci de m'avoir motivé lors de la préparation au concours de l'internat pour obtenir ma place en orthodontie.*

À mes amis et confrères, David, Laura, Léo, Max, *avec qui j'ai passé la majorité de mon cursus. Ces années ont été inoubliables tant à la fac que dans tous nos à-côtés. Je suis si heureux de partager cette profession avec vous.* **À Alex,** *dont la surprise qu'elle nous prépare me remplit de joie.*

À mes co-internes, *avec qui je partage mon quotidien. Merci de le rendre toujours aussi agréable et rempli de bonne humeur.* **À Gauthier, Maïlys et Valérie,** *qui m'ont tant apporté en dehors de mon cadre professionnel.*

UNIVERSITE DE STRASBOURG

FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE

Année 2018 N°22

THESE

Présentée pour le Diplôme d'Etat de Docteur en Chirurgie Dentaire
le 24/05/2018

par

PHILIPPIDES Nicolas

né le 26/03/1991 à STRASBOURG

LES ANALYSES CEPHALOMETRIQUES EN RESEAU, ETAT DES LIEUX AVANT INFORMATISATION

Président	:	Monsieur le Professeur MEYER Florent
Assesseurs	:	Monsieur le Docteur BOLENDER Yves
		Madame le Docteur GROS Catherine-Isabelle
		Madame le Docteur WAGNER Delphine
Membre invité	:	Monsieur le Docteur BONOMI-DUNOYER Hadrien

Sommaire

I. INTRODUCTION 7

II. LES ANALYSES CEPHALOMETRIQUES CONVENTIONNELLES 9

A. Principe de réalisation des clichés radiographiques 9

B. Les analyses céphalométriques en deux dimensions 10

1. Historique des analyses de profil 10
2. Les analyses de face 19

C. Les analyses céphalométriques en trois dimensions 21

D. Les limites des analyses céphalométriques conventionnelles 24

1. Les déformations des structures induites par la prise de clichés en deux dimensions 24
2. Dépendance du positionnement de la tête 25
3. Positionnement des points céphalométriques et définition des plans de référence 25
4. Sélection de la population de référence 26
5. Outil de communication réservé aux initiés 27

III. LES ANALYSES EN RESEAU EN DEUX DIMENSIONS 28

A. Historique 28

1. L'analyse en réseau de De Coster 28
2. Le Mesh de Coenraad F.A. Moorrees 30
3. La version simplifiée du Mesh de Moorrees : le Mesh normalisé 34
4. Extrapolation à différentes populations 35
5. Le Mesh de face 37

B. Avantages de l'analyse en réseau 39

1. Analyse de globalité 39
2. Analyse de proportionnalité 39
3. Visualisation graphique 39
4. Aspect didactique et communication inter-professionnelle 39
5. Aide dans les simulations chirurgicales 40

C. Inconvénients 40

1. Sélection de la population de référence 40
2. Dépendance de la position de la tête 40
3. Reproductibilité inter et intra-individuelle 42

IV. LES ANALYSES EN RESEAU EN TROIS DIMENSIONS 43

A. L'analyse de Ferrario 43

B. L'analyse de Terajima 45

C. Avantages 48

D. Inconvénients 49

V. CAHIER DES CHARGES POUR L'INFORMATISATION DU MESH DE MOORREES 50

A. Choix du logiciel 50

B. Construction du script 51

a. Insertion de l'image 51
b. Placement des points remarquables 51
c. Simplification de la représentation du patient 54
d. Construction de la grille individuelle du patient 56
e. Déformation de la grille 59
f. Customisation 63

C. Utilisation 63

VI. CONCLUSION 65

VII. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 67

Table des figures et tableaux

FIGURE 1 : SYSTEME POUR UNE TELERADIOGRAPHIE DE PROFIL, D'APRES W. PROFFIT[24]. 9
FIGURE 2 : ANALYSE DE STEINER 14
FIGURE 3 : CHARTE CEPHALOMETRIQUE DE STEINER, D'APRES CECIL C. STEINER[12]. 15
FIGURE 4 : ANALYSE DE WITS 16
FIGURE 5 : RELATIONS ENTRE LES ARCADES DENTAIRES DIFFERENTES, MALGRE DES ANB SIMILAIRES, D'APRES A. JACOBSON[33] 17
FIGURE 6 : ANALYSE DE RICKETTS DE PROFIL 18
FIGURE 7 : ANALYSE CEPHALOMETRIQUE DE FACE DE RICKETTS 20
FIGURE 8 : ORIENTATION SPATIALE DU MASSIF DENTO-FACIALE, D'APRES J. ACKERMAN[46] 22
FIGURE 9 : ANALYSE OSSEUSE EN TROIS DIMENSIONS, D'APRES J. TREIL[54] 23
FIGURE 10 : RESEAUX DE REFERENCE, D'APRES L. DE COSTER 29
FIGURE 11 : DESSIN D'UNE TELERADIOGRAPHIE DE PROFIL D'UN GARÇON DE 9 ANS, D'APRES L. DE COSTER ... 30
FIGURE 12 : DIAGRAMME DU MESH, D'APRES C.F.A. MOORREES[72] 32
FIGURE 13 : DEPLACEMENT DES POINTS REMARQUABLES POUR LE MESH DE C.F.A. MOORREES, D'APRES J. GHAFARI[75] 33
FIGURE 14 : DIAGRAMME DE MESH D'UN INDIVIDU DE CLASSE III, D'APRES C.F.A. MOORREES 34
FIGURE 15 : DIAGRAMME DU MESH NORMAL A GAUCHE ET MODIFIE A DROITE, D'APRES J. GHAFARI[75] 35
FIGURE 16 : ANALYSE EN RESEAU DE FACE DE KAPLINS, D'APRES GHAFARI[75] 37
FIGURE 17 : MESH DE FACE D'UN GARÇON DE 10 ANS, D'APRES GHAFARI[75] 38
FIGURE 18 : FILLE DE 10 ANS, EN POSITION NATURELLE DE LA TETE (A), AVEC LA TETE INCLINEE LEGEREMENT VERS LE BAS (B), INCLINEE LEGEREMENT VERS LE HAUT (C), D'APRES MOORREES[64] 41
FIGURE 19 : MESH DE REFERENCE POUR LES FEMMES A DROITE ET LES HOMMES A GAUCHE, EN VUE FRONTALE, D'APRES FERRARIO[89] 44
FIGURE 20 : ANALYSE DE FERRARIO DE FACE (A), DE PROFIL (B), DE HAUT (C), LES TRAITS CORRESPONDENT AU MESH DU PATIENT, LES POINTS ISOLES CORRESPONDENT A LA NORME, D'APRES FERRARIO[89] 44
FIGURE 21 : SURFACE DE REFERENCE POUR LES HOMMES (A) ET POUR LES FEMMES (B), D'APRES TERAJIMA .. 46
FIGURE 22 : SUPERPOSITION D'UN CBCT D'UNE PATIENTE JAPONAISE AVEC LA NORME POUR LES FEMMES, D'APRES TERAJIMA 46
FIGURE 23 : RESEAUX DE REFERENCE POUR LES HOMMES (A) ET LES FEMMES (B), D'APRES TERAJIMA 47
FIGURE 24 : SUPERPOSITION DU RESEAU DE REFERENCE SUR LE CRANE D'UNE FEMME DE 18 ANS, D'APRES TERAJIMA 47
FIGURE 25 : SUPERPOSITION DU RESEAU DE REFERENCE AU NIVEAU DE LA MANDIBULE, D'APRES TERAJIMA .. 48
FIGURE 26 : SUPERPOSITION DU RESEAU DE REFERENCE SUR LA SURFACE CUTANEE, D'APRES TERAJIMA 48
FIGURE 27 : POSITIONNEMENT DES POINTS 54
FIGURE 28 : REPRESENTATION MINIMALISTE DU PATIENT 56

FIGURE 29 : CONSTRUCTION DE LA GRILLE INDIVIDUELLE 58
FIGURE 30 : DEFORMATION DU RESEAU 63

TABLEAU 1 : CHARTE CEPHALOMETRIQUE DE RICKETTS, D'APRES M. DUMITRACHE[40] 19
TABLEAU 2 : CHARTE POUR L'ANALYSE DE RICKETTS DE FACE 21
TABLEAU 3 : POSITION DES POINTS DE L'ECHELLE 51
TABLEAU 4 : POSITION DES POINTS SQUELETTIQUES 52
TABLEAU 5 : POSITION DES POINTS DENTAIRES 53
TABLEAU 6 : POSITION DES POINTS DU PROFIL CUTANE 54
TABLEAU 7 : LISTE DES COEFFICIENTS A APPLIQUER AU VECTEUR DE TRANSLATION POUR LES DEFORMATIONS DES LIGNES VERTICALES 60
TABLEAU 8 : LISTE DES COEFFICIENTS A APPLIQUER AU VECTEUR DE TRANSLATION POUR LES DEFORMATIONS DES LIGNES HORIZONTALES 62

Liste des abréviations

AAO	American Association of Orthodontists.
CBCT	Cone Beam Computed Tomography
HAS	Haute Autorité de Santé.
JCO	Journal of Clinical Orthodontics
Mesh	Terme anglais signifiant « modélisation par éléments géométriques »
OIM	Occlusion d'Intercuspidie Maximale
ORC	Occlusion en Relation Centrée
VTO	Visual Treatment Objective

I. Introduction

A partir des années 1920, le diagnostic en orthopédie dento-faciale s'est vu enrichi par l'émergence des téléradiographies de profil et de face, grâce aux avancées de l'imagerie médicale. La téléradiographie du crâne a été introduite, de façon concomitante, aux Etats-Unis par Broadbent[1] et en Europe par Hofrath[2] en 1931.

Le principe physique de cet examen radiographique repose sur l'éloignement de la source radiogène (tube à rayons X) par rapport à l'organe d'intérêt (la tête, par exemple)[3], pour obtenir un parallélisme des rayons incidents et limiter ainsi les phénomènes d'agrandissement ou de distorsion. Initialement, cette distance était de 1,5 mètres. Des mesures directes avec un rapport de 1 : 1 peuvent être réalisées.

Cet examen complémentaire vient en sus de l'examen clinique de l'orthodontiste constituer une aide précieuse pour objectiver les positions des organes dentaires, des bases osseuses et des tissus mous d'un patient, grâce à la mise en place de points de référence (« landmarks »). Cette technique constitue une branche de la biomorphométrie[4,5], appelée céphalométrie. Diverses analyses crânio-faciales ont émergé à partir des années 1930.

Différents types d'analyses sont référencées, typologiques[6,7], dimensionnelles[8–16] ou encore architecturales[17,18]. Les premières méthodes d'analyses proposées, que l'on qualifiera de dimensionnelles, comparent des mesures (métriques et angulaires) du patient aux moyennes d'une population de référence. Les résultats de ces analyses sont exprimés sous forme de valeurs numériques.

Suite aux recommandations de la Haute Autorité de Santé[19] (HAS[a]), ainsi que l'American Association of Orthodontists[20] (AAO[b]), les praticiens intègrent de façon routinière les analyses céphalométriques à leurs dossiers orthodontiques initial et final.

[a] HAS : Haute Autorité de Santé.
[b] AAO : American Association of Orthodontists

Cependant, aucun consensus n'existe quant à la primauté d'une analyse céphalométrique par rapport aux autres. Un exemple marquant est l'absence de contrainte dans le choix de l'analyse céphalométrique pour les praticiens désirant se soumettre à l'examen du Board européen, certificat d'excellence de la pratique de l'orthodontie. Le candidat se doit uniquement de correctement référencer les valeurs choisies[21].

L'objectif de ce travail est de s'intéresser à une autre forme d'analyse céphalométrique, l'analyse en réseau. Le principe repose sur la déformation d'une grille appliquée sur une téléradiographie du patient par rapport à des normes de référence. Basée sur l'étude des proportions des différentes structures du massif crânio-facial, les unes par rapport aux autres, elle permet une approche visuelle didactique des dysmorphoses du patient[22]. Cependant, elle est peu enseignée et peu utilisée par nos confrères.

La première partie de ce travail reprendra les bases des analyses conventionnelles en deux, puis trois dimensions avant d'en exprimer les limites.

Les deuxième et troisième parties porteront sur les analyses en réseau en deux puis trois dimensions.

Enfin, une ouverture sera faite dans la quatrième partie pour poser les bases d'une informatisation d'une analyse céphalométrique en réseau. En effet, ce type d'analyse semble actuellement absent des logiciels de gestion de cabinet d'orthodontie en France.

II. Les analyses céphalométriques conventionnelles

A. Principe de réalisation des clichés radiographiques

Le système radiologique permettant l'obtention des téléradiographies de profil et de face comprend :

- un céphalostat, appareil assurant le maintien de la tête du patient et la reproductibilité de son orientation grâce à l'introduction de deux olives auriculaires dans les conduits auditifs externes.
- un récepteur radiologique, contenu dans le céphalostat, placé au plus proche de l'élément à étudier.
- une source radiogène fixe, distante habituellement de 1,50 à 4 mètres[23] du récepteur, pour obtenir un parallélisme des rayons incidents. Ceci permet une diminution de l'agrandissement et du dédoublement des structures latérales.

La distance fixe entre la source et le récepteur ainsi que la position systématisée de la tête permettent une standardisation et une reproductibilité des clichés dans le temps et d'un individu à l'autre. De ce fait, la téléradiographie du crâne peut être le support de mesures directes pour la réalisation d'analyses céphalométriques.

Le système est illustré Figure 1.

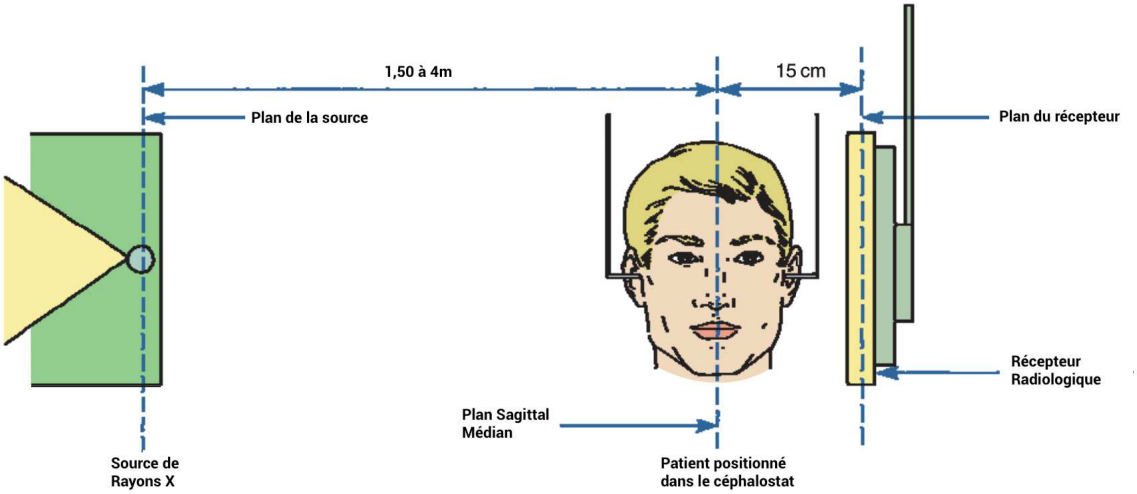


Figure 1 : Système pour une téléradiographie de profil, d'après W. Proffit[24].

Les mesures servent à quantifier de façon objective les relations existantes entre les bases osseuses, les dents et les tissus mous de la face. Ces mesures, linéaires ou angulaires, sont réalisées par rapport à un plan ou une ligne de référence. On parlera d'analyse céphalométrique conventionnelle.

De plus, elles autorisent des comparaisons intra-individu au cours du temps grâce à leur superposition sur des structures remarquables du squelette (évaluation de l'effet de la croissance ou d'une thérapeutique). Elles permettent également des études inter-individus à un moment précis, par rapport à des échantillons de référence (aide au diagnostic des dysmorphoses crânio-faciales des patients).

B. Les analyses céphalométriques en deux dimensions

Les analyses céphalométriques sont réalisées à partir d'une téléradiographie en occlusion (OIM[a] ou ORC[b] selon les techniques). Les structures tridimensionnelles de l'édifice facial sont projetées sur un plan en 2 dimensions. Les dimensions sagittales et verticales peuvent être étudiées sur les clichés de profil, alors que les clichés de face permettent d'évaluer les dimensions verticales et transversales. Les orthodontistes peuvent avec cette aide au diagnostic identifier les causes possibles de malocclusions[25].

1. Historique des analyses de profil

De 1930 à 1950, seuls les instituts de recherche et les universités avaient accès aux équipements pour réaliser des études céphalométriques, mais lorsque Margolis a introduit son porte-tête en 1950[26], la céphalométrie devint un réel outil de travail pour les cliniciens.
Lucien de Coster fut le premier (1939) à publier une analyse basée sur des relations proportionnelles du visage conformes aux principes de l'Antiquité.

---

[a] OIM : Occlusion d'Intercuspidie Maximale
[b] ORC : Occlusion en Relation Centrée

Herbert I. Margolis (1900-1984), Ukrainien de naissance, fut le premier à relier l'axe de l'incisive mandibulaire au rebord inférieur du corps mandibulaire (plan mandibulaire) (1943), un des constituants du Triangle de Tweed.

William B. Downs[27] (1899-1966) était un membre de la première classe de Brodie (1930) dans l'Illinois et est devenu un pilier de l'orthodontie. Avec Brodie, Goldstein et Myer, il a co-écrit « *Cephalometric Appraisal of Orthodontic Results* » (1938). En 1947, il a terminé une étude intitulée « *Variations in Facial Relationships: Their Significance in Treatment and Prognosis* », donnant naissance à l'analyse de Downs. Cet auteur a introduit l'usage du plan horizontal de Francfort (ligne reliant en postérieur le porion, point le plus antérieur et supérieur du conduit auditif externe, au point sous orbitaire en antérieur, point le plus antérieur et inférieur du plancher de l'orbite) comme plan de référence. L'échantillon de référence était basé sur l'étude de 20 garçons et filles âgés de 12 à 17 ans, comprenant une occlusion considérée comme normale selon l'auteur. L'analyse se voulait avant tout descriptive des relations existantes entre le maxillaire, la mandibule et les arcades dentaires s'y rapportant.

Son double objectif était d'évaluer le schéma du squelette facial, sans tenir compte des dents, et d'évaluer la relation entre les dents et les processus alvéolaires en tenant compte du squelette facial du patient. C'était la première analyse céphalométrique cliniquement applicable[27–29] et elle marquait la fin de l'ère du diagnostic uniquement basé sur des modèles en plâtre[30]. Les normes développées pour l'analyse de Downs sont toujours utiles mais ont été largement remplacées par de nouvelles normes[24].

Richard A. Riedel (1922-1994) a présenté l'une des mesures céphalométriques les plus largement acceptées : l'angle ANB, avant même d'avoir terminé ses études de maîtrise à Northwestern University. Le point A est le point le plus en arrière de la concavité antérieure de l'os maxillaire. Le point B est le point le plus en arrière de la concavité antérieure de la mandibule. Le point N (nasion) est le point le plus antérieur au niveau de la suture entre les os propres du nez et les os frontaux dans le plan sagittal médian[31]. Ainsi, l'angle ANB caractérise le décalage antéro-postérieur du maxillaire et de la mandibule[32]. Ce concept de l'angle ANB est considéré comme la deuxième innovation majeure dans le domaine de la céphalométrie, après la publication de l'analyse de Downs.

Bien que les bases de la céphalométrie aient été posées, de nombreux auteurs ont proposé leurs modifications, pour corriger, compléter ou faciliter l'utilisation de la céphalométrie.

Nous pouvons notamment citer les analyses de Arne Björk[6], Cecil C. Steiner[10–12], Charles H. Tweed[8,9], Viken Sassouni[7], Robert Murray Ricketts[13–16], Alexander Jacobson[33], Jean Delaire[17], Reed A. Holdaway[34], James A. McNamara[35], Joseph R. Jarabak[36].

Aux Etats-Unis, l'usage de ces analyses a été régulièrement évalué par les enquêtes nationales du Journal of Clinical Orthodontics (JCO[a]), en 1986, 1996, 2008 et 2014.

En 2014, le JCO a publié la dernière révision de son évaluation de la pratique de l'orthodontie aux Etats-Unis[37]. Il en ressort que les trois analyses les plus utilisées sont celle de Steiner (utilisée de façon routinière par 26% des orthodontistes), celle de Wits (19%), suivi de celle de Ricketts (18%). Nous décrirons de façon succincte ces trois analyses.

L'analyse de Steiner[10–12]

L'analyse de Steiner, publiée en 1953, introduit la notion de compromis thérapeutique nécessaire au niveau des axes des incisives pour obtenir une occlusion normale lorsque l'angle ANB n'est pas idéal. Il a également incorporé la longueur de l'arcade et d'autres considérations, telles que le profil, permettant de juger de la nécessité ou non d'extractions dentaires pour le patient considéré.

Au-delà de la simple description des malocclusions, Cecil C. Steiner est le premier auteur à adjoindre une dimension thérapeutique à son analyse.
Grâce à une approche étape par étape, l'analyse de Steiner a contribué à vulgariser la céphalométrie[38].

[a] JCO : Journal of Clinical Orthodontics

La partie descriptive se décompose en 3 dimensions : l'analyse squelettique, l'analyse dentaire et l'analyse des tissus mous.

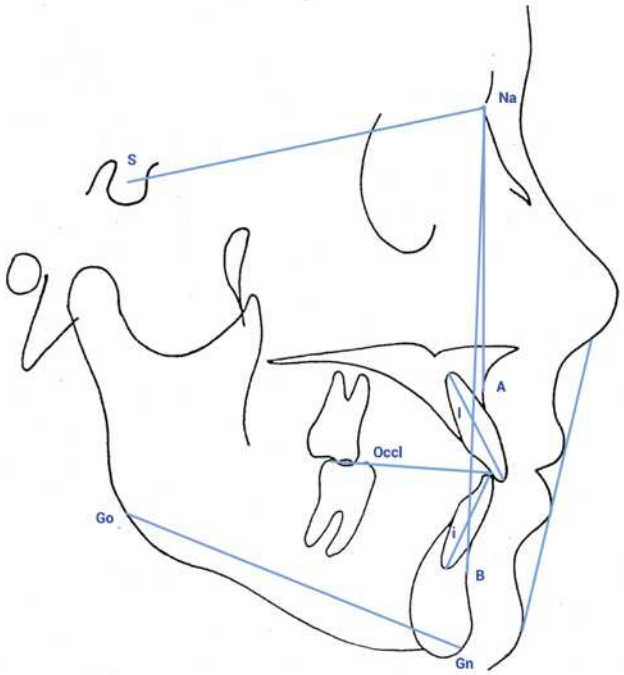
Steiner fut à l'origine des analyses modernes. Il a notamment proposé d'utiliser la ligne S-Na (ligne reliant les points « selle turcique » et « nasion ») comme ligne de référence, plus reproductible que le plan de Francfort - le point porion n'étant pas toujours identifiable sur une téléradiographie de profil[39].

Pour l'analyse squelettique, Steiner a décrit la position du maxillaire par rapport à la base du crâne (SNA), la position de la mandibule par rapport à la base du crâne (SNB), la relation entre les positions du maxillaire par rapport à la mandibule (ANB), l'inclinaison de la mandibule par rapport à la base du crâne (GoGn/SN).

Pour l'analyse dentaire, il a proposé d'étudier la position des incisives centrales maxillaire et mandibulaire par rapport à leur base osseuse (respectivement grâce aux angles I/NA ou i/NB), la relation entre la position des incisives maxillaire et mandibulaire (I/i), l'angulation du plan d'occlusion (reliant les molaires et les incisives) par rapport à la base du crâne (Occl/SN).

Enfin, l'analyse des tissus mous est basée sur le tracé d'une ligne esthétique qui rejoint le pogonion cutané à la moitié de l'aile du nez, permettant d'analyser la position des lèvres dans le profil. La norme veut que cette ligne affleure les lèvres supérieures et inférieures.

Tous ces éléments sont illustrés Figure 2.



A	Point le plus concave du maxillaire antérieur
B	Point le plus concave de la symphyse mandibulaire
Gn	Point le plus antéro-inférieur de la symphyse mandibulaire
Go	Point le plus postéro-inférieur de l'angle de la mandibule
I	Ligne rejoignant le bord incisif à l'apex de l'incisive maxillaire la plus proéminente
i	Ligne rejoignant le bord incisif à l'apex de l'incisive mandibulaire la plus proéminente
Na	Point le plus antérieur de la suture fronto-nasale
Occl	Plan d'occlusion matérialisé par une ligne reliant un point d'occlusion entre les molaires et entre les incisives
S	Centre de la selle turcique

Figure 2 : Analyse de Steiner

Le volet thérapeutique de l'analyse de Steiner est constitué par des « chevrons », véritables guides de traitement. Ils donnent des informations sur le positionnement des dents pour compenser des décalages squelettiques. Ils permettent aussi d'orienter la décision d'extraction dentaire.

La charte céphalométrique de Steiner est représentée Figure 3. On y retrouve une série de mesures où les valeurs individuelles sont à inscrire à côté des normes. Il s'agit ensuite de comparer nos mesures aux normes pour évaluer les dysmorphoses (Figure 3.A).

Les chevrons représentés en bas de la charte céphalométrique sont construits à partir des valeurs de l'angle ANB du patient, de la relation entre la ligne NB et le pogonion, et de la position des incisives centrales (Figure 3.B).

Ils sont le support d'une démarche diagnostique, aboutissant à la définition des objectifs de traitement, notamment au niveau du redressement incisif, de l'expansion, de la courbe de Spee et des avulsions (Figure 3.C).

STEINER CEPHALOMETRIC ANALYSIS

NAME _____ ORTHO. NO. _____

Analyse descriptive — A

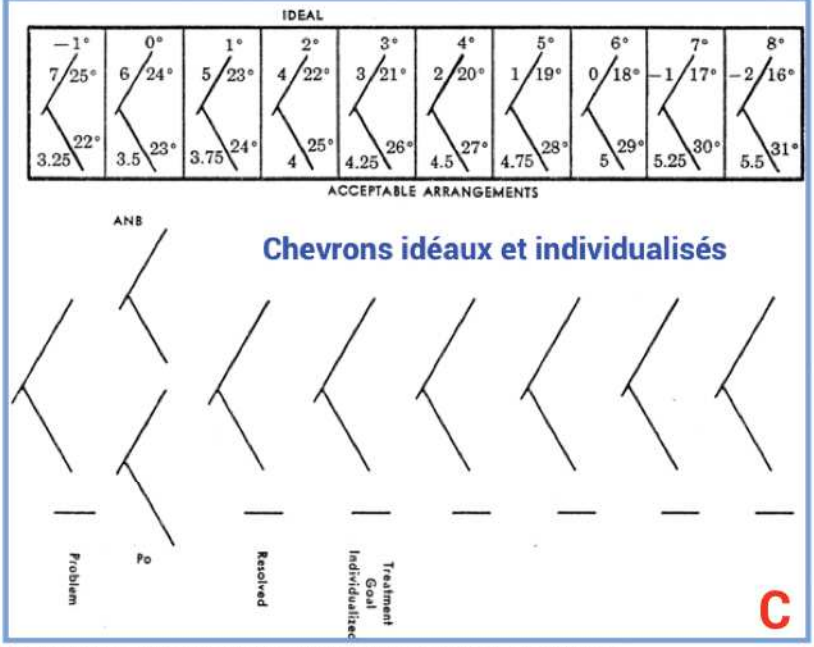
		Ref. Norm.											
SNA	(angle)	82°											
SNB	(angle)	80°											
ANB	(angle)	2°											
SND	(angle)	76°											
1 to NA	(mm)	4											
1 to NA	(angle)	22°											
$\overline{1}$ to NB	(mm)	4											
$\overline{1}$ to NB	(angle)	25°											
Po to NB	(angle)	Not Established											
Po & $\overline{1}$ to NB	(Difference)	Varies											
1 to $\overline{1}$	(angle)	131°											
Occl to SN	(angle)	14°											
GoGn to SN	(angle)	32°											
SL	(mm)	51											
SE	(mm)	22											
H-line to NB	(angle)	Varies with ANB											
$\overline{3}\,|\,\overline{3}$	width												
$\overline{4}\,|\,\overline{4}$	width												
$\overline{6}\,|\,\overline{6}$	width												
$\overline{e}\,|\,\overline{e}$	present												
Tooth Size Relationship	(Bolton Index)	6 = 77	12 = 91	6 =	12 =	6 =	12 =	6 =	12 =	6 =	12 =	6 =	12 =
Arch length Discrepancy													

Objectifs de traitement — B

	(mm) +	(mm) −
Correcting Arch Form Moves $\overline{1}$		

+	−	LOWER ARCH ← $\overline{6}$ →		
		Discrepancy		
		Expansion		
		Relocation $\overline{1}$		
		Relocation $\overline{6}$		
		E Space		
		Intermaxillary Extra-Oral		
		Extraction		
		Totals		
		Net		

Chevrons idéaux et individualisés — C



* *These estimates are useful as guides but they must be modified for individuals.*

Figure 3 : Charte céphalométrique de Steiner, d'après Cecil C. Steiner[12].

L'analyse de Wits[33]

L'analyse de Wits tire son nom de l'Université de Witwatersrand en Afrique du Sud et fut importée aux États-Unis par Alexander Jacobson (Université d'Alabama) en 1975.

Son originalité est de quantifier le décalage sagittal des bases osseuses maxillaire et mandibulaire non pas grâce à l'angle ANB, comme précédemment citée, mais en se basant sur la distance séparant la projection orthogonale des points A et B sur le plan d'occlusion[33] (Figure 4).

A partir d'un échantillon adulte composé d'hommes (21) et de femmes (25) ayant une occlusion jugée comme excellente par l'auteur, A. Jacobson a indiqué que le point B_o se situait en moyenne 1,17mm [-2mm ; 4mm] en avant du point A_o dans l'échantillon masculin et que le point A_o était -0,10mm [-4,5mm ; 1,5mm] en arrière du point B_o chez les femmes.

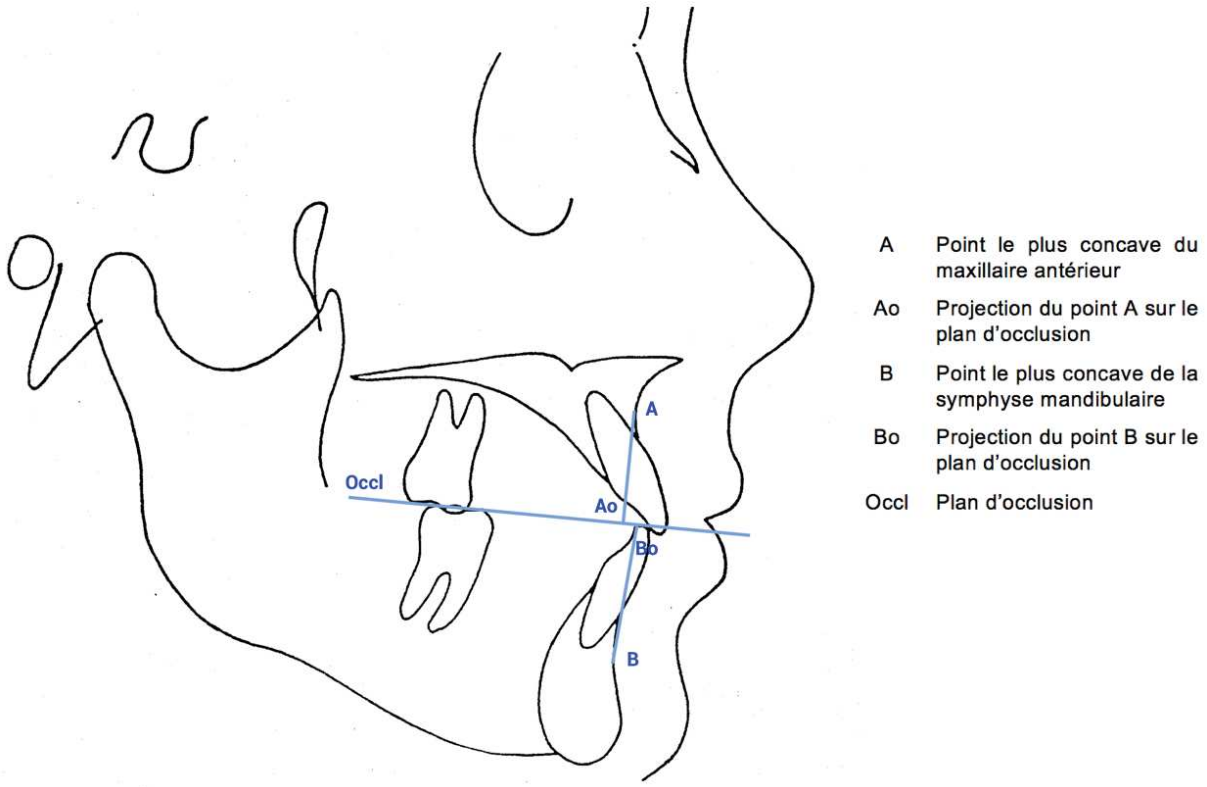


Figure 4 : Analyse de Wits

Alexander Jacobson a proposé cette méthodologie car il indique que l'angle ANB présente des défauts, notamment à cause de l'orientation de la base du crâne et des arcades dentaires[33]. Comme illustré par la Figure 5, malgré des angles ANB très similaires (-1° fig. 5A et -1,5° fig. 5B), les relations entre le maxillaire et la mandibule peuvent grandement varier. L'analyse de Wits offre une meilleure estimation du décalage sagittal maxillo-mandibulaire (-1,5mm fig. 5A contre -12mm fig. 5B).

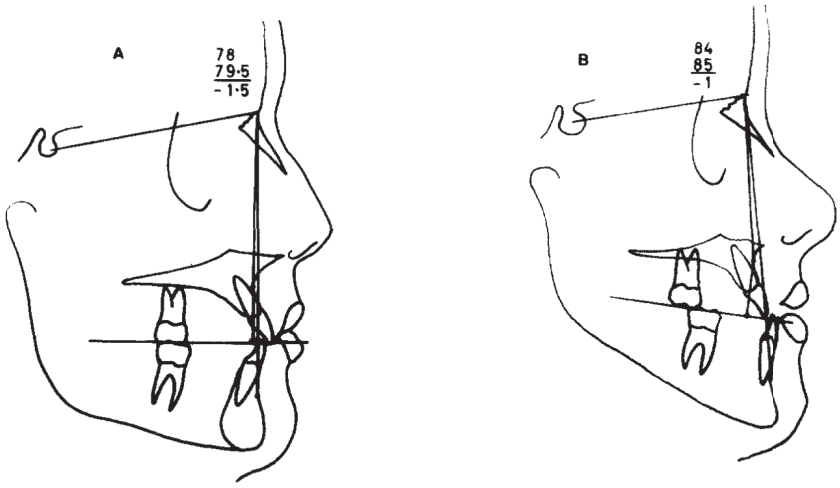


Figure 5 : Relations entre les arcades dentaires différentes, malgré des ANB similaires, d'après A. Jacobson[33]

L'analyse de Wits se concentre sur le décalage squelettique des mâchoires. Cependant, il ne s'agit pas d'une analyse complète, mais d'un complément pour étudier la relation dans le sens sagittal entre le maxillaire et la mandibule, indépendamment de la base du crâne et de l'inclinaison des arcades dentaires. Sa faiblesse est d'être influencée par le stade de dentition[24].

L'analyse de Ricketts[13–16]

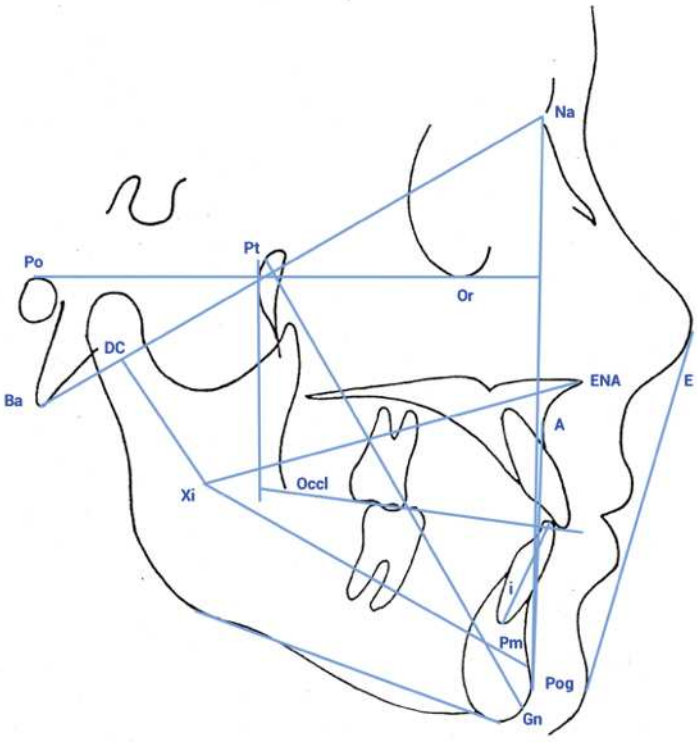
L'analyse de profil de Ricketts a été publiée au travers de différents articles de 1960 à 1981[13–16]. Elle propose 3 volets : l'analyse des tissus durs, l'analyse des tissus dentaires et une analyse esthétique.

Comme ses prédécesseurs, Robert M. Ricketts reprend des valeurs utilisées par d'autres auteurs, en y ajoutant de nouvelles, citons de façon non exhaustive X_i, le

centre géométrique du ramus mandibulaire ; l'axe facial, l'axe général de croissance de la face ; le plan facial, la limite antérieure de la face ; la ligne esthétique E de Ricketts.

L'échantillon initial pour établir les normes était un échantillon de 2000 cas traités orthodontiquement avec succès selon la technique bioprogressive. L'informatisation de cette analyse céphalométrique (Rocky Mountain® Orthodontics, Denver Colorado, USA), a permis d'atteindre les 60 000 cas témoins en 1977[13].

L'analyse de Ricketts a su se démarquer des autres en proposant des normes adaptées à l'âge et au sexe du patient. La Figure 6 représente le tracé d'une analyse de Ricketts classique. 10 angles peuvent y être mesurés et comparés à une charte dont la norme varie en fonction de l'âge du patient (Tableau 1).



A	Point le plus concave du maxillaire antérieur
Ba	Point le plus inférieur du basioccipital
DC	Centre du col du condyle mandibulaire situé sur la ligne Na-Ba
E	Ligne esthétique
ENA	Pointe de l'épine nasale antérieure
Gn	Point le plus antéro-inférieur de la symphyse mandibulaire
i	Axe de l'incisive inférieure
Na	Point le plus antérieur de la suture fronto-nasale
Occl	Plan d'occlusion
Or	Point le plus déclive du rebord latéro-orbitaire
Pm	Point situé au changement d'inflexion du contour antérieur de la symphyse mandibulaire
Po	Point le plus supérieur du méat acoustique externe osseux
Pog	Point le plus antérieur de la symphyse mandibulaire
Pt	Point le plus postéro-supérieur du foramen sphénopalatin
Xi	Centre géométrique de la branche mandibulaire

Figure 6 : Analyse de Ricketts de Profil

Normes cliniques (NC) de l'analyse de profil avec les déviations cliniques (DC), les variations selon l'âge et le tableau permettant de déterminer le type facial.

		NC 9 ans	NC 12 ans	NC 15 ans	DC	Variations avec l'âge	Patient	Dolico	Méso	Brachy
Mandibule										
1	Axe facial	90°	90°	90°	4°	Aucune				
2	Angle facial	87°	88°	89°	3°	+1°/3 ans				
3	Angle mandibulaire	26°	25°	24°	4°	–1°/3 ans				
4	Hauteur étage inférieur	47°	47°	47°	4°	Aucune				
5	Arc mandibulaire	26°	27,5°	29°	4°	+0,5°/an				
Maxillaire										
6	Convexité	+2 mm	+1 mm	0 mm	2 mm	–1 mm/3 ans				
Denture										
7	Distance i/A–Pog	+1 mm	+1 mm	+1 mm	2 mm	Aucune				
8	Angle i/A–Pog	22°	22°	22°	4°	Aucune				
9	Distance 6 supérieure/PTV	12 mm	15 mm	18 mm	3 mm	+1 mm/an				
Profil										
10	Lèvre inférieure/ligne E	0 mm	–0,75 mm	–1,5 mm	2 mm	–0,25 mm/an				

Axe facial	Angle inféropostérieur formé par la ligne Na-Ba et l'axe facial (ligne Pt-Gn)
Angle facial	Angle inféropostérieur formé par le plan de Francfort (ligne Po-Or) et le plan facial (ligne Na-Pog)
Angle mandibulaire	Angle antérieur formé par le plan de Francfort (ligne Po-Or) et le plan mandibulaire (plan tangent à la partie inférieure de la symphyse et à la région angulaire mandibulaire)
Hauteur étage inférieur	Angle antérieur formé par les lignes Xi-ENA et Xi-Pm
Arc mandibulaire	Angle supéropostérieur formé par les lignes Xi-ENA et Xi-DC
Convexité	Distance entre le point A et le plan facial (ligne Na-Pog)
PTV	Verticale qui passe par le point Pt

Tableau 1 : Charte céphalométrique de Ricketts, d'après M. Dumitrache[40]

Par la suite, l'analyse a aussi intégré un volet prédictif de la croissance et des effets thérapeutiques, par la construction du VTO[a], permettant une prévisualisation des objectifs de traitement individualisés.

2. Les analyses de face

Les analyses de face, effectuées sur des téléradiographies de face, sont pratiquées de façon beaucoup moins routinière. En 2014, seulement 5% des orthodontistes aux Etats-Unis réalisent un cliché radiographique de face de façon systématique, avant le début d'un traitement[37]. Ce nombre est évalué à 14% en France[41].

Le patient est positionné dans le céphalostat, le visage faisant face à la source de rayons X.

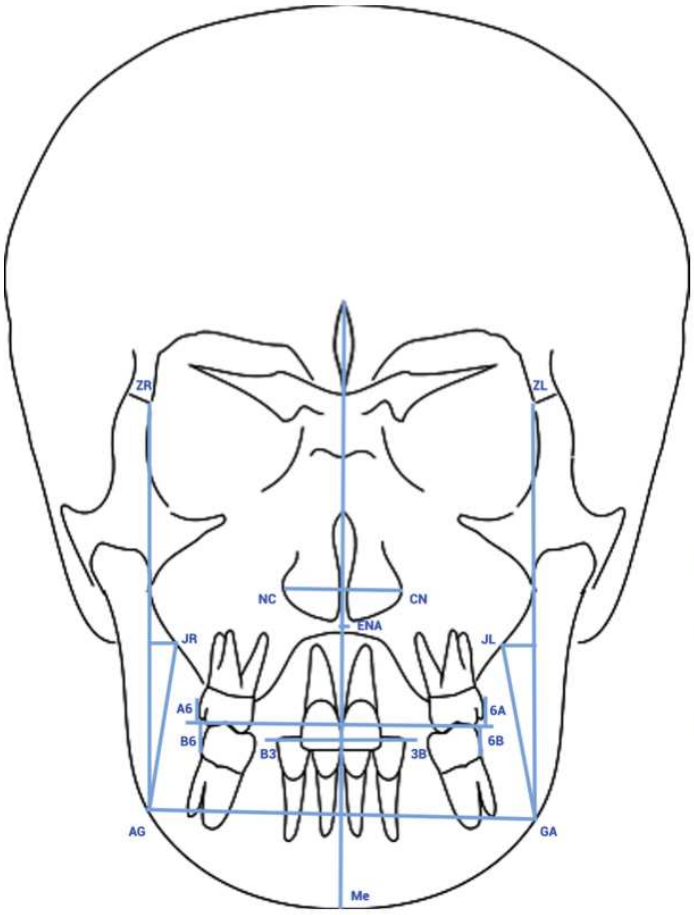
Cet examen permet d'analyser les dimensions verticale et transversale. C'est un moyen d'affiner le diagnostic différentiel entre l'endognathie (déficit transversal localisé

[a] VTO : Visual Treatment Objective

au niveau des bases osseuses) et l'endoalvéolie (déficit transversal localisé au niveau de procès alvéolaires). Il permet également une quantification de l'asymétrie faciale.

Les principales analyses céphalométriques de face retrouvées dans la littérature sont celle de Ricketts[13], de Svanholt et Solow[42], de Grummons[43], de Grayson[44], et de Hewitt[45].

Décrivons brièvement en exemple l'analyse de face de Ricketts (Figure 7) où nous pouvons étudier la largeur des cavités nasales, la largeur du maxillaire, les relations entre le maxillaire et la mandibule, la largeur de la mandibule, une asymétrie par rapport à la ligne sagittale médiane, la distance inter-molaires et inter-canines, ainsi que la version corono-vestibulaire des molaires. Les données mesurées seront comparées à la charte de Ricketts (Tableau 2).



ZR/ZL	Point le plus médial de la suture frontozygomatique droite (ZR) et gauche (ZL)
NC/CN	Point le plus externe de la cavité nasale du côté droit (NC) et gauche (CN)
ENA	Pointe présumée de l'épine nasale antérieure
JR/JL	Intersection entre la face latérale de la tubérosité maxillaire et le processus zygomatique du maxillaire du côté droit (JR) et gauche (JL)
A6/6A	Projection orthogonale du point le plus vestibulaire de la première molaire maxillaire droite (A6) et gauche (6A) sur le plan d'occlusion
B6/6B	Projection orthogonale du point le plus vestibulaire de la première molaire mandibulaire droite (B6) et gauche (6B) sur le plan d'occlusion
B3/3B	Pointe cuspidienne de la canine mandibulaire droite (B3) ou gauche (3B)
AG/GA	Point le plus haut de l'échancrure préangulaire droite (AG) et gauche (GA) de la mandibule
Me	Point le plus bas de la symphyse mandibulaire

Figure 7 : Analyse céphalométrique de face de Ricketts

N°	Variable	Moyenne ± écart-type en mm à 8 ans	Modification selon l'âge en mm/an
1	Largeur nasale : NC-CN	24,5 ± 2	+ 0,5
2	Relation maxillo-mandibulaire transversale à gauche : Distance JL / ZL-GA	10 ± 1	Ne change pas
3	Relation maxillo-mandibulaire transversale à droite : Distance JR / ZT-AG	10 ± 1	Ne change pas
4	Largeur mandibulaire : AG-GA	75 ± 3	+ 1,25
5	Symétrie faciale : Distance ENA et Me / plan sagittal médian	0 ± 2	Soit l'asymétrie persiste, soit elle s'aggrave
6	Largeur de l'arcade au niveau des surfaces vestibulaires des premières molaires permanentes mandibulaires : B6-6B	56 ± 2	Peut diminuer en raison de la dérive mésiale, sans quoi demeure inchangée
7	Largeur intercanine mandibulaire : B3-3B	22,5 ± 2	Les couronnes convergent puis divergent lors de l'éruption des canines
8	Harmonie de la largeur d'arcade / mâchoires à gauche : Distance 6B / JL-GA	6 ± 2	+ 0,8
9	Harmonie de la largeur d'arcade / mâchoires à droite : Distance B6 / JR-AG	6 ± 2	+ 0,8
10	Décalage de la médiane incisive mandibulaire	0 ± 1	Pas de modification en cas de symétrie. Augmente en cas d'asymétrie
11	Rapports molaires transversaux gauches : Distance 6A-6B	1 ± 1	Ne change pas
12	Rapports molaires transversaux droits : Distance A6-B6	1 ± 1	Ne change pas

Tableau 2 : Charte pour l'analyse de Ricketts de face

Pour Ricketts, cette analyse de face ouvre également la porte sur les décisions thérapeutiques avec notamment la quantité d'expansion maxillaire réalisable.

C. Les analyses céphalométriques en trois dimensions

Les analyses céphalométriques conventionnelles, de profil ou de face, analysent les structures faciales par essence tridimensionnelles, sur une projection en deux dimensions. De ce fait, des erreurs sont automatiquement induites par l'incidence du faisceau de rayons X, qui n'est pas tout à fait orthogonale au récepteur, ainsi que par les erreurs de positionnement du patient dans le céphalostat (mouvements de lacet, roulis, tangage, voir Figure 8).

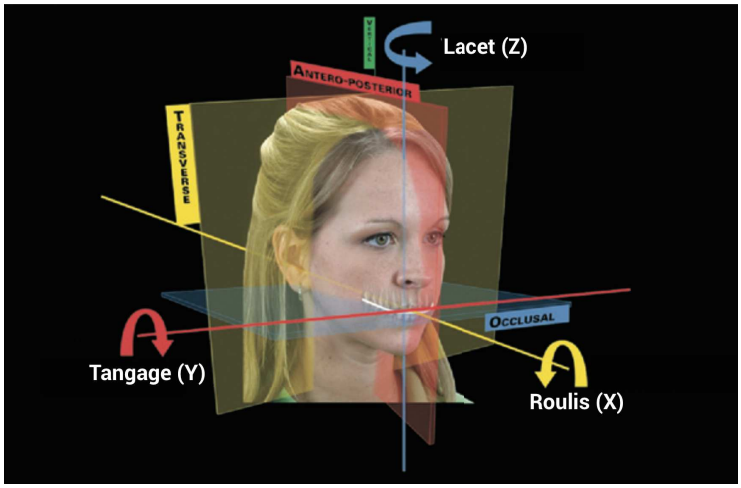


Figure 8 : Orientation spatiale du massif dento-faciale, d'après J. Ackerman[46]

Les structures para-médianes et latérales sont alors fréquemment dédoublées, induisant une imprécision de repérage des points céphalométriques par l'opérateur[47]. L'analyse en trois dimensions se veut ainsi plus précise.

Parmi les analyses tridimensionnelles les plus répandues, nous pouvons citer les analyses de G. Farronato[48], J. Treil[49–55], R. Olszewski[56], J. Gateno[57], et M. G. Hans[58].

L'analyse de J. Treil prend des repères anatomiques afin d'établir un modèle tridimensionnel de l'architecture crânio-faciale. Ce modèle permet de repérer des asymétries au niveau de la face et des arcades dentaires, mais aussi de comparer les données du patient par rapport à une norme. Cette analyse comprend deux niveaux : l'analyse de la charpente maxillo-faciale ou analyse osseuse et l'analyse alvéolo-dentaire.

L'analyse osseuse se fait par le placement de huit repères anatomiques : les foramens supraorbitaires, les foramens infraorbitaires, les foramens mentonniers et la tête des marteaux (Figure 9).

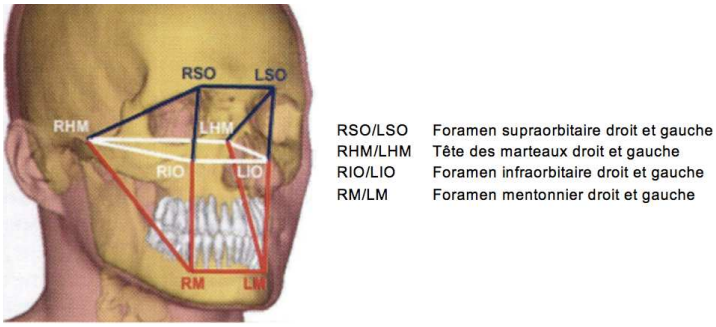


Figure 9 : Analyse osseuse en trois dimensions, d'après J. Treil[54]

L'analyse alvéolo-dentaire se fait par l'analyse des axes de chacune des dents et par groupes de dents. Une dent unitaire, une hémi-arcade, une arcade ou les deux pourront ainsi être comparées au complexe maxillo-facial dans les trois sens de l'espace.

Pittayapat[59] a voulu réaliser en 2014 une revue systématique de la littérature sur les analyses céphalométriques en trois dimensions pour évaluer leur supériorité. Sur les 35 articles retenus, la méta-analyse n'a pas pu être réalisée à cause de l'hétérogénéité des protocoles mis en place. Cependant, la quasi-totalité des études tendent à indiquer que le placement des points et les mesures sont plus précis sur les analyses en trois dimensions que sur celles en deux dimensions, notamment par une meilleure visibilité des points de référence.

Le cliché en trois dimensions engendre cependant une exposition plus importante que les clichés classiques. C'est pourquoi ces analyses ne font pas encore consensus dans le monde médical. Le concept de radioprotection a notamment conduit la HAS[a] à formuler ses recommandations pour l'analyse céphalométrique en orthopédie dento-faciale[60] :

- Le CBCT[b] ne saurait se substituer pour l'instant à la téléradiographie conventionnelle, car « les mesures céphalométriques obtenues avec le CBCT sont comparables à celles obtenues avec la céphalométrie conventionnelle ».
- Cependant, lorsque l'examen clinique initial révèle la présence d'une ou plusieurs dents incluses, d'une asymétrie faciale importante ou d'une

[a] HAS : Haute Autorité de Santé
[b] CBCT : Cone Beam Computed Tomography

malformation dentaire ou squelettique, un CBCT pourra remplacer la prise du cliché panoramique et la téléradiographie de profil. L'analyse céphalométrique pourra alors être effectuée sur celui-ci.

Dans sa revue de littérature publiée en 2011[61], Rossini indiquait par ailleurs que comme pour les analyses en deux dimensions, aucune analyse en trois dimensions ne fait référence. En effet, sur les 27 articles retenus, aucun n'identifiait les mêmes points céphalométriques ni relevait les mêmes mesures.

D. Les limites des analyses céphalométriques conventionnelles

Les analyses conventionnelles décrites précédemment présentent différentes spécificités et intérêts que nous avons étudiés. Néanmoins, qu'il s'agisse d'une analyse en deux dimensions de profil, de face, ou en trois dimensions, elles souffrent toutes de certains inconvénients inhérents à la technique utilisée.

1. Les déformations des structures induites par la prise de clichés en deux dimensions

Les rayons X incidents ne sont pas parfaitement parallèles entre eux lorsqu'ils traversent l'objet à étudier, mais suivent une trajectoire plus ou moins conique. Les structures les plus proches du récepteur paraissent moins agrandies que celles qui sont plus éloignées.

De plus, une superposition des différentes structures du massif crânio-facial, va accentuer la difficulté de repérage des structures anatomiques d'intérêt. Il en résultera une reproductibilité imparfaite du positionnement des points de références nécessaires à l'analyse céphalométrique.

2. Dépendance du positionnement de la tête

A l'inverse des analyses en trois dimensions, les analyses en deux dimensions dépendent du positionnement adéquat de la tête du patient dans le céphalostat au cours de la réalisation des clichés (mouvements de lacet et roulis, voir Figure 8).

Ce décalage de structures sera de plus accentué si le patient positionne sa tête avec une légère rotation dans le céphalostat. Major[47] a démontré qu'un mauvais positionnement de la tête, même de 5°, pouvait entraîner des erreurs dans le placement de certains points remarquables.

3. Positionnement des points céphalométriques et définition des plans de référence

Bien que les points céphalométriques correspondent à des structures anatomiques clairement définies, le positionnement exact des points sur nos clichés est soumis à variation.

Bourriau[62] montrait sur des clichés radiographiques de profil en deux dimensions, que les points les plus reproductibles se situent sur le plan sagittal médian. A contrario, les points pour lesquels le nuage de dispersion est le plus important, se trouvent au niveau des apex incisifs et des structures latérales.

En trois dimensions, le positionnement des points est également critique et soumis à variation. Fagertun[63] a évalué la reproductibilité du positionnement des points en trois dimensions. Les zones n'étant pas clairement définies par des extrémités ou des intersections de pièces osseuses sont plus sujettes à variation, comme les angles goniaques ou les sourcils.

Certains points vont également définir des lignes de référence en 2D ou plans de référence en 3D (ligne SN, plan horizontal de Francfort, ...) qui se verront altérés en cas de mauvais positionnement des points de repère. En complément il est à noter que les variations anatomiques inter-individus, même non pathologiques, peuvent

influencer ces lignes et plans de référence (cf. exemple des angles SNA SNB chez deux individus ayant une flexion de la base du crâne plus ou moins marquée, Figure 5).

4. Sélection de la population de référence

Toutes les analyses céphalométriques conventionnelles sont construites de telle sorte qu'elles comparent les valeurs trouvées chez un patient aux moyennes d'une population de référence.

Comme vu précédemment, toutes les analyses existantes ne se sont pas basées sur le même panel d'individus pour établir leurs normes. Ces dernières sont parfois issues d'une population non traitée ayant une occlusion idéale selon l'auteur, alors que pour d'autres, elles proviennent de patients traités avec une normocclusion finale. Plusieurs arguments de discussion entrent en ligne de compte, influençant la représentativité de l'échantillon par rapport à la population générale[13] :

- la taille de l'échantillon initial
- l'âge et le sexe de l'échantillon
- l'ethnie d'origine

Cependant, comparer un patient à des normes s'oppose à son « optimum individuel » comme le suggère Philippe et Loreille[64]. En effet, selon son âge, son ethnie, son sexe, les critères esthétiques des normes ne correspondront pas forcément à ceux du patient, à son individualisation au sein de la société.

Le jugement esthétique est basé sur un critère subjectif pour la création des normes. Il est ainsi dépendant de l'évaluateur et de son background culturel[65] qui peut être différent de celui du patient analysé.

5. Outil de communication réservé aux initiés

Les analyses céphalométriques s'avèrent utiles à l'établissement du diagnostic et du pronostic. Cependant, devant la multitude des analyses disponibles, la communication entre différents praticiens n'est pas toujours claire, chacun ayant ses propres habitudes tirées de sa formation et de ses expériences personnelles.

Il en va de même pour la communication avec le patient. Il sera toujours très difficile de lui expliquer ses dysmorphoses à partir d'angles et de mesures qu'il ne connaît pas. La représentation graphique semble en effet déterminante dans la compréhension fine des dysmorphoses[66].

III. Les analyses en réseau en deux dimensions

Les analyses en réseau se veulent plus visuelles et didactiques que les analyses conventionnelles. Leur but est de faire ressortir les proportions du visage et/ou du massif crânio-facial à travers un maillage dessiné selon le positionnement de certains points anatomiques remarquables.

Cette méthode d'analyse s'inspire notamment des travaux d'artistes célèbres du XV-XVIe siècle comme Léonard De Vinci, Michel-Ange ou Albert Dürer[67] qui avaient proposé des règles de proportions pour la beauté d'un visage.

A. Historique

1. L'analyse en réseau de De Coster

Lucien De Coster, orthodontiste de Bruxelles, fut le premier à publier une analyse céphalométrique en réseau en 1939[68], un moyen graphique d'illustrer les écarts céphalométriques par rapport à la norme.

En s'inspirant du travail d'Albert Dürer, De Coster a construit des normes de proportions à partir d'un échantillon de 365 soldats qu'il considérait comme normaux parmi un échantillon de 4000. Afin d'élargir ses normes de réseaux, il a aussi utilisé quelques téléradiographies d'enfants. Il a ainsi pu créer ses normes en fonction de six classes d'âges différentes (Figure 10) :

- de 4 à 6 ans, avant l'éruption des premières molaires ;
- de 6 à 8 ans, après l'éruption des premières molaires ;
- de 8 à 12 ans
- de 12 à 15 ans
- de 15 à 20 ans
- plus de 20 ans.

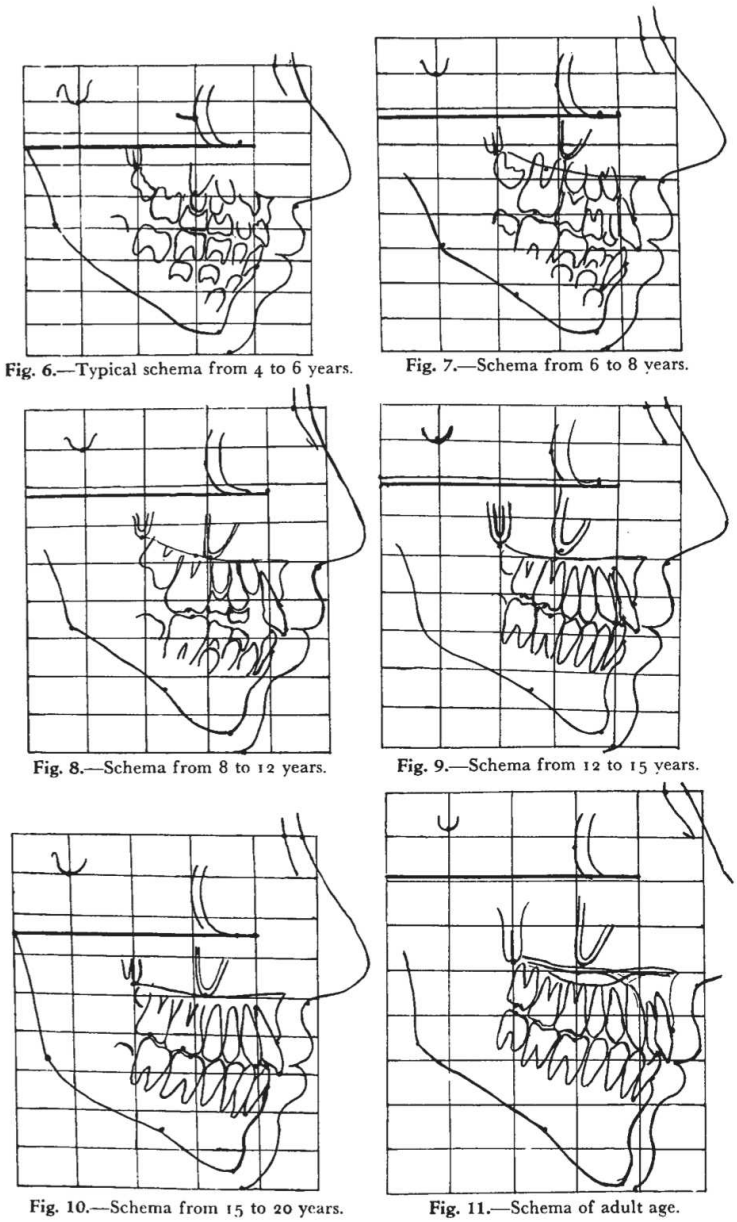


Figure 10 : Réseaux de référence, d'après L. De Coster

Grâce à ces réseaux de référence, De Coster a pu alors les superposer à des réseaux construits sur d'autres téléradiographies de profil pour en étudier les différences et comprendre les anomalies de proportion de la face.

Dans l'exemple de la Figure 11, De Coster a tracé le réseau individualisé du patient en trait continu. Pour ce faire, il a réalisé le déplacement relatif des points remarquables selon des proportions calculées à partir d'une norme. Ces points ont ensuite été reliés par des courbes de Bézier.

Il a ensuite pris la norme des enfants entre 6 et 8 ans qu'il a mise à l'échelle et superposée à son tracé. Cette norme est représentée en pointillés.

Dans l'exemple illustré Figure 11, nous pouvons notamment visualiser une position postérieure de la mâchoire inférieure, alors que la denture supérieure semble s'être avancée par rapport à la norme.

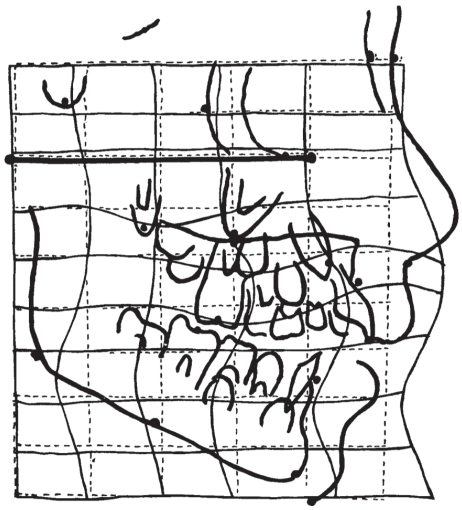


Figure 11 : Dessin d'une téléradiographie de profil d'un garçon de 9 ans, d'après L. De Coster

2. Le Mesh[a] de Coenraad F.A. Moorrees

Moorrees a par la suite voulu apporter des modifications au travail de De Coster. Il a ainsi publié son analyse en réseau en 1953[69], suivie d'une mise à jour en 1976[70].

Les principales modifications apportées au travail de De Coster étaient :

- le choix de la base du crâne comme plan de référence (plan Selle turcique – Nasion) à la place du plan de Francfort, car ce dernier n'était pas clairement identifiable sur tous les clichés radiographiques[71].
- l'utilisation du point menton cutané pour la construction du mesh de référence était elle aussi sujette à une grande variation, il lui a donc préféré le point menton osseux.

[a] Mesh : Maillage en anglais

- et enfin le trop grand nombre de lignes horizontales compliquait l'utilisation de cette méthode, qui était alors réalisée de façon manuelle, il en a diminué le nombre.

La première version de son Mesh prenait pour référence un échantillon de 50 filles américaines, d'origine caucasienne, blanches, âgées de 18 à 21 ans et présentant une occlusion parfaite.

Cette première version a rapidement évolué. En effet, en 1958[72], Morrees critiquait l'utilisation de lignes de références intracrâniennes qui étaient sujettes à des variations individuelles en terme d'inclinaison et provoquaient ainsi des sources d'erreurs dans le diagnostic. Il proposa alors d'utiliser une ligne de référence extracrânienne : la verticale vraie, qui supposait que le patient soit placé en position naturelle de la tête. Position obtenue quand l'individu se regarde dans un petit miroir placé en face des yeux.

En 1976, Moorres publia dans ces conditions la deuxième version de son analyse en réseau[70], en utilisant un nouvel échantillon, plus représentatif de la population générale :

- 46 hommes et 47 femmes de Boston. L'échantillon provenait de l'étude longitudinale sur la santé et le développement des enfants de l'Université d'Harvard.
- les individus sélectionnés pour cet échantillon ne présentaient pas systématiquement une occlusion parfaite, mais avaient une large variation d'engrènements dentaires considérés comme normaux selon l'auteur.

Enfin, la première version utilisait la hauteur faciale totale pour la construction de la grille de référence. Mais comme l'étage inférieur de la face est sujet à variation de par des problèmes de malocclusion, Moorrees a décidé d'utiliser uniquement la hauteur faciale supérieure pour la construction de son réseau, en ne prenant plus comme référence le point menton osseux, mais plutôt le point représentant le point le plus antérieur de l'épine nasale antérieure.

En conclusion, la construction de la grille de référence se fait depuis lors sur une téléradiographie de profil, obtenue en position naturelle de la tête, en traçant un rectangle de référence, défini par l'intersection de quatre droites :

- en haut : la ligne horizontale passant par le point Nasion.
- à droite : la ligne verticale passant par le point Nasion.
- à gauche : la ligne verticale séparée de la première par la distance Nasion – Selle turcique.
- en bas : la ligne horizontale passant par l'épine nasale antérieure.

Ce rectangle est alors divisé en 4 parties égales, puis chaque petit rectangle est projeté à son tour pour compléter la grille de référence, comme illustré à la Figure 12.

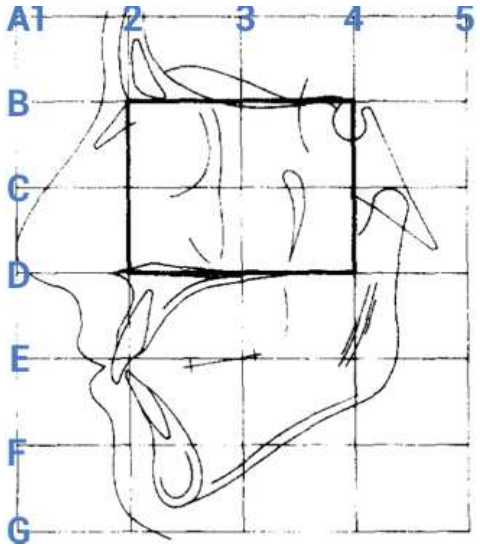


Figure 12 : Diagramme du Mesh, d'après C.F.A. Moorrees[70]

A la suite de cela, un deuxième réseau est construit par-dessus le premier. Pour ce faire, il s'agit de déplacer les points remarquables à une certaine distance des lignes verticales et horizontales comme indiqué dans la Figure 13 (les désignations des lignes horizontales et verticales sont retrouvées sur la Figure 12).

Comme pour l'analyse de De Coster, les différents points sont ensuite reliés par des courbes de Bézier pour former un nouveau maillage déformé selon l'anatomie du patient.

Landmark	Rectangle	Vertical position Grid line	%*	Horizontal position Grid line	%*
Soft tissue					
A Glabella	a	A	45	1	71
B Nasion	b	B`	10	1	82
C Pronasale	c	C	67	1	10
D Subnasale	d	D	18	1	54
E Labrale superior	d	D	70	1	50
F Stomion		E	0	1	68
G Labrale inferior	e	E	25	1	56
H Supramentale	e	E	66	1	79
I Pogonion	f	F	17	1	73
Hard tissue					
1 Glabella	a	A	46	1	89
2 Nasion		B	0	2	0
3 Sella		B	40	4	0
4 Basion	u	C	88	4	67
5 Anterior nasal spine		D	0	1	87
6 Point A		D	25	2	0
7 Posterior nasal spine		D	0	3	38
8 Maxillary incisor edge	e	E	7	1	87
9 Maxillary incisor axis	j	D	37	2	8
10 Mandibular incisor edge		E	0	1	96
11 Mandibular incisor axis	k	E	67	2	22
12 Point B	k	E	67	2	15
13 Symphysis superior (lingual)	k	E	67	2	45
14 Pogonion	l	F	25	2	10
15 Menton	l	F	56	2	27
16 Symphysis inferior	l	F	12	2	50
17 Gonion	w	E	27	4	14
18 Ramus posterior	v	D	50	4	22
19 Ramus anterior	p	D	50	3	36
20 Articulare	u	C	60	4	42
21 Condyle (anterior)	u	C	36	4	13
22 Anterior limit of occlusal plane		E	0	2	53
23 Posterior aspect of occlusal plane	p	D	87	3	10
24 Lowest point/zygomatic process	i	C	90	2	72
25 Dorsal surface of orbit	h	B	59	2	81
26 Anterior pterygomaxillary fissure	o	C	43	3	43

*Landmark positions are given as a percentage of the respective rectangle sides. Percentages are given as the distance from the right side of the rectangle for horizontal position and from the top of the rectangle for vertical position.

Figure 13 : Déplacement des points remarquables pour le Mesh de C.F.A. Moorrees, d'après J. Ghafari[73]

La superposition des deux grilles permet de mettre en évidence les variations individuelles au regard de la norme établie, comme illustré Figure 14. Là où les deux réseaux concordent, il n'y a pas de variation de l'individu par rapport à la norme. Mais plus les deux réseaux s'éloignent, plus l'individu présente une variation importante par rapport à la norme.

Dans l'exemple illustré Figure 14, on voit que l'individu présente un prognathisme mandibulaire important.

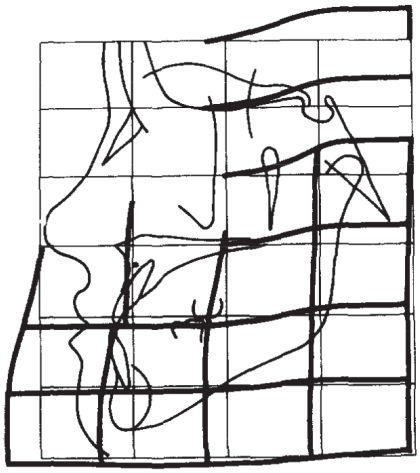


Figure 14 : Diagramme de Mesh d'un individu de classe III, d'après C.F.A. Moorrees

C.F.A. Moorrees ne changeait pas de norme en fonction du genre. En effet, il avait constaté une légère différence entre les sexes, avec un faible prognathisme et une position plus basse du point S chez les filles par rapport aux hommes. Cette différence n'était cependant pas significative. Dans son analyse, Moorrees a ainsi préféré utiliser la norme des femmes où la verticale passant par le point N passe par le point A et le bord libre de l'incisive inférieure, limitant les déformations à effectuer.

Pour ce qui est de l'âge, Moorrees n'a aussi utilisé qu'une norme : celle établie pour l'âge de 18 ans. En effet, en superposant ses normes établies aux âges de 8 ans et 18 ans, il a constaté que les rectangles étaient plus petits chez les plus jeunes. Cependant, en mettant la norme de 8 ans à l'échelle de celle de 18 ans, il a constaté que la position des points de référence était similaire.

3. La version simplifiée du Mesh de Moorrees : le Mesh normalisé

La construction de la grille modifiée et déformée selon les points remarquables de l'individu constitue une tache fastidieuse. Selon Ghafari, c'est la raison pour laquelle peu de praticiens utilisent cette analyse en réseau[73].

Cet auteur a alors proposé en 1987 une modification de l'analyse de Moorrees[74], pour en simplifier la construction.

En partant sur une base similaire, il propose de créer la grille de référence du patient. Mais plutôt que de créer la deuxième grille distendue en fonction des points remarquables, il positionne simplement ces points en fonction de la grille du patient, puis les relie, afin d'obtenir le tracé de ce qu'aurait été l'individu s'il avait été dans la norme. Cette étape se veut plus rapide en utilisant une superposition d'images numériques. En effet, il s'agit de tracer la grille individuelle du patient, puis de prendre la grille avec la position des points remarquables selon la norme, et de mettre à l'échelle les deux images pour que les grilles se confondent et laissent apparaître les variations individuelles en regard de la norme établie.

On peut voir par exemple dans la Figure 15 que les mêmes informations sont retrouvées dans les deux méthodes. Par exemple, l'individu a ici un menton en position haute, et une lèvre supérieure en avant. Bien que les informations présentées soient identiques, la représentation graphique obtenue est notablement différente.

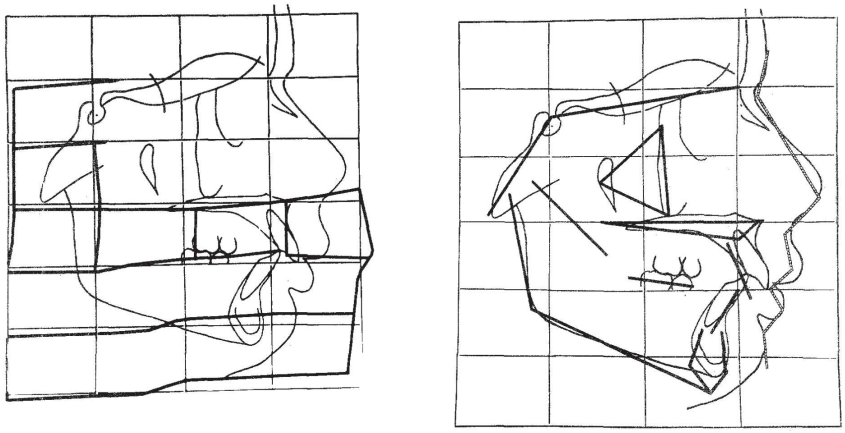


Figure 15 : Diagramme du Mesh normal à gauche et modifié à droite, d'après J. Ghafari[73]

4. Extrapolation à différentes populations

Comme l'a prouvé Nomura[75], des personnes d'origines ethniques différentes auront des préférences différentes concernant la norme esthétique recherchée. Il y aura alors des différences dans le positionnement dentaire et le positionnement des tissus mous. Ceci est d'autant plus vrai en termes de silhouette de profil et notamment au niveau de la position des lèvres dans le profil.

Il n'est pas surprenant de retrouver dans la littérature des auteurs qui ont réactualisé les travaux de Moorrees en créant des normes plus orientées vers certaines origines ethniques.

McNulty, en 1968[76], a recalculé la position des points remarquables de la norme de la première version du Mesh de Moorrees pour une population australienne. Avec un échantillon de 34 hommes et 31 femmes âgés d'une trentaine d'années, l'auteur a établi une norme pour les hommes et une norme pour les femmes, car ces dernières avaient tendance à présenter un prognathisme bi-maxillaire plus important.

Faustini a suivi le pas en 1997[77]. Son échantillon comprenait 43 adolescents (25 femmes et 18 hommes), tous étant des individus mélanodermes de New York, de descendance africaine. L'auteur a lui aussi séparé les résultats entre hommes et femmes et a pu constater une concordance des résultats au sein de l'ethnie mais une différence par rapport à la population d'origine caucasienne utilisée par Moorrees :

- une biprochéilie retrouvée au niveau des lèvres.
- les incisives ont une position plus antérieure.
- la hauteur faciale inférieure est augmentée.

La même année, Evanko a extrapolé les résultats pour une population portoricaine[78]. Il a utilisé un échantillon de 50 adolescents pour créer sa norme (30 filles et 20 garçons). Les plus grandes différences retrouvées par rapport à la norme de Moorrees se trouvent au niveau dento-alvéolaire et l'écart est plus important chez les hommes que chez les femmes. Une biprochéilie est ainsi retrouvée. Elle est due à une position plus antérieure du maxillaire et de la mandibule, ainsi qu'à une vestibuloversion des incisives par rapport à la norme de Moorrees.

Des travaux similaires ont été ensuite réalisés dans la population chinoise par Jiang[79] en 2005.

Enfin, en 2011, Sharma[80] a établi des normes pour la population indienne. L'échantillon utilisé était de 30 filles et 30 garçons âgés de 13 à 16 ans avec un profil jugé comme esthétique selon l'auteur et présentant une occlusion correcte, sans

antécédents de traitement orthodontique. Dans son article, Sharma n'a pas comparé ses normes entre elles ni par rapport à celles de Moorrees.

5. Le Mesh de face

Kalpins a publié en 1985 les travaux de Moorrees sur l'analyse en réseau de face, afin d'étudier les asymétries dans le plan frontal[81].

En reprenant les bases du Mesh de profil, il propose alors la construction d'une grille de référence comprenant 24 rectangles. A partir de cette grille, un côté de la face de l'individu sert de norme de référence pour la construction d'une deuxième grille déformée de l'autre côté de la face, où comme pour le Mesh de profil, les points remarquables sont repositionnés en fonction de la norme, puis reliés par des courbes de Bézier, comme l'illustre l'exemple Figure 16.

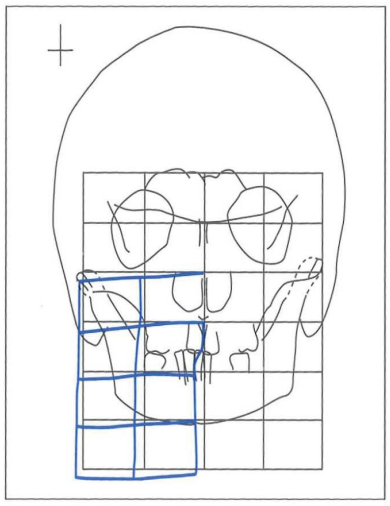


Figure 16 : Analyse en réseau de face de Kaplins, d'après Ghafari[73]

Dans cet exemple, on constate que la branche montante du ramus mandibulaire gauche est plus haute que celle de droite, que l'angle goniaque gauche est plus haut que celui de droite, et enfin que le milieu inter-incisif mandibulaire est décalé vers la droite.

Ghafari a voulu aller plus loin dans cette analyse en créant une norme par rapport à une population de référence. Il a alors repris le travail précédemment réalisé conjointement avec Cortella[82] pour en extraire les normes de référence de 30 individus, 16 femmes et 14 hommes, tous avec une occlusion excellente, et une face considérée comme esthétique, sans asymétrie.

Ghafari a alors pu établir les Mesh de référence pour les hommes et les femmes de 10 et 18 ans[73], comme illustré Figure 17.

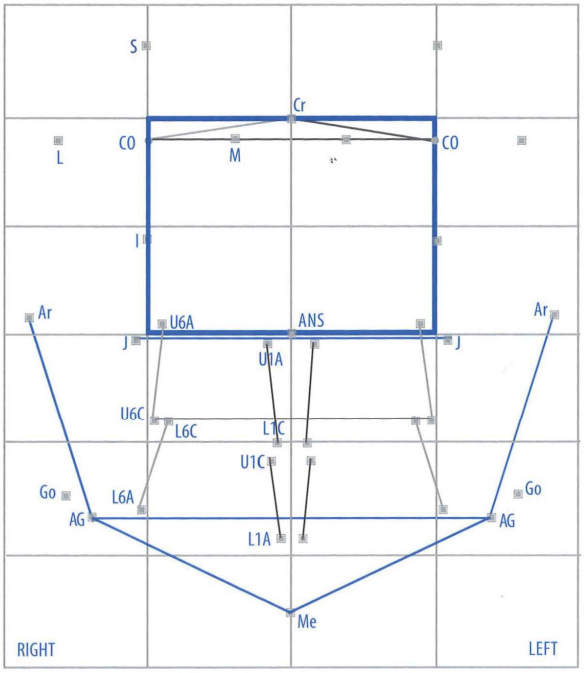


Figure 17 : Mesh de face d'un garçon de 10 ans, d'après Ghafari[73].

L'auteur a par ailleurs remarqué qu'à l'âge de 10 ans, la norme des garçons et celle des filles ne présentaient pas de différence statistiquement significative. Il est alors possible d'utiliser indifféremment l'une ou l'autre. Par contre, à l'âge de 18 ans, il convient d'utiliser la norme appropriée selon le sexe de l'individu.

Il suffit alors de superposer cette norme sur la construction des 24 rectangles de référence de l'individu pour étudier les déviations de l'individu par rapport à la norme.

B. Avantages de l’analyse en réseau

1. Analyse de globalité

L’analyse en réseau permet d’évaluer les structures osseuses, dentaires et les tissus mous de façon concomitante, contrairement aux analyses céphalométriques classiques qui analysent une à une chaque relation recherchée.

2. Analyse de proportionnalité

Ces analyses répondent à des règles de proportionnalité. En effet, même si une norme est établie par rapport à une population de référence, cette norme est adaptée par une règle de proportionnalité au réseau individuel de l’individu. Les résultats obtenus par une telle analyse sont donc propres à chaque patient, et apportent une dimension plus juste qu’une analyse céphalométrique traditionnelle.

3. Visualisation graphique

Le fait de supprimer toute valeur angulaire ou linéaire et de présenter les résultats de façon graphique améliore grandement la compréhension globale des dysmorphoses de l’individu. Il n’y a plus besoin de comparer une valeur à une norme pour comprendre le sens et l’importance d’une dysmorphose.

4. Aspect didactique et communication inter-professionnelle

Du fait que la représentation soit graphique, les résultats peuvent être présentés à un praticien, au patient ou à sa famille sans avoir besoin d’expliquer à quoi correspond telle ou telle mesure. Ici, d’un simple coup d’œil, il est facile de voir qu’une structure

ne se trouve pas dans sa position optimale, tout en voyant par la même occasion le degré de sévérité de cette dysmorphose.

5. Aide dans les simulations chirurgicales

Selon Carlotti en 1987[83], il est alors possible de réaliser une simulation des gestes chirurgicaux sur le tracé céphalométrique, puis de projeter à nouveau le Mesh distendu du patient sur sa grille de référence pour apprécier les résultats espérés.

C. Inconvénients

1. Sélection de la population de référence

Tout comme les analyses céphalométriques classiques, les normes sont établies à partir d'un échantillon de référence, considéré comme normal selon l'auteur et bien souvent limité.

Cet échantillon est supposé représentatif de la population générale mais ne reflète pas les variations de différentes sous-populations.

De plus, comme nous l'avons vu, en fonction des ethnies, les critères esthétiques ne sont pas les mêmes. Il faudrait donc avoir une base de données comprenant les réseaux de référence en fonction de l'ethnie, de l'âge et du sexe du patient.

2. Dépendance de la position de la tête

Initialement, les analyses céphalométriques reposaient sur le positionnement de structures crâniennes de référence, considérées comme invariables d'un individu à l'autre telles que la base du crâne ou le plan de Francfort.

Il s'avère cependant que ces lignes de références intra-crâniennes sont sujettes à une forte variation inter- et intra-individuelle.

Afin de s'affranchir de cette variabilité, l'analyse en réseau de Moorrees utilise comme référence la verticale vraie, basée sur le positionnement naturel de la tête.

Cependant, une erreur dans le positionnement de la tête va entraîner une construction de la grille de référence erronée et ainsi l'analyse sera faussée.

Dans l'exemple ci-dessous (Figure 18), la photographie présente une fille de 10 ans en position naturelle de la tête. La photographie du milieu la présente avec une inclinaison légère de la tête vers le bas. On remarque ici que le menton est positionné légèrement en arrière par rapport à la situation précédente, la hauteur faciale totale est par ailleurs augmentée. Sur la photographie de droite, la tête est inclinée légèrement vers le haut, le menton se retrouve ici décalé vers l'avant.

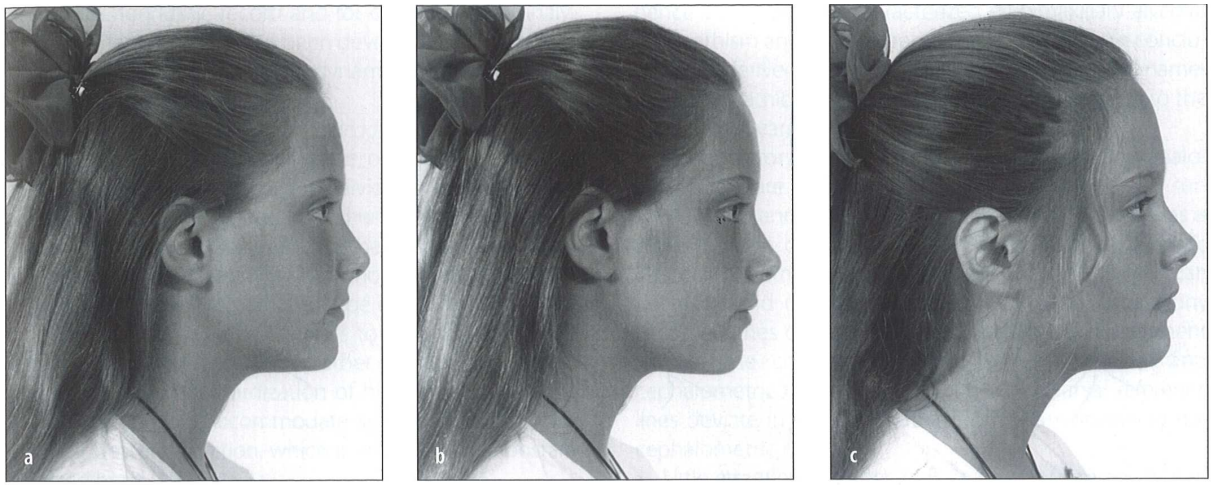


Figure 18 : Fille de 10 ans, en position naturelle de la tête (a), avec la tête inclinée légèrement vers le bas (b), inclinée légèrement vers le haut (c), d'après Moorrees[84]

Afin d'obtenir le positionnement naturel de la tête de façon reproductible, Moorrees propose d'asseoir le patient, et de lui demander de fixer un point éloigné et à hauteur des yeux[84].

Cooke a évalué la reproductibilité de cette méthode en prenant un cliché chez un individu à 5 ans, puis à 15 ans. Sur les 10 ans qui séparent les deux radios, la variation de la position naturelle de la tête de l'individu n'est que de 4,8° [-4,5° ; 6,5°][85][86].

Le positionnement naturel de la tête est donc utilisable et reproductible.

3. Reproductibilité inter et intra-individuelle

La construction de l'analyse en réseau de façon manuelle est quelque chose de chronophage et fastidieux. Il s'agit dans un premier temps de créer les rectangles de référence. Puis il faut prendre une table de proportionnalité pour reporter la position de la grille distendue en fonction des points remarquables du patient. La grille distendue peut ensuite être reliée pour permettre l'analyse céphalométrique.

Cette série d'étapes peut engendrer au fur et à mesure des erreurs, qui peuvent se répercuter sur l'analyse finale.

Pour des analyses céphalométriques classiques, Uysal avait testé la reproductibilité inter- et intra-individuelle entre des analyses manuelles ou numériques[87]. Pour ce faire, il avait utilisé une analyse personnelle regroupant 11 mesures angulaires et 6 mesures linéaires. Il avait conclu qu'il n'y avait pas de différence statistiquement significative entre les deux méthodes, bien que la méthode numérique soit bien plus rapide.

A notre connaissance, aucun travail ne teste en revanche la reproductibilité pour l'analyse en réseau de Moorrees. Ceci fera donc l'objet d'une future publication bibliographique.

IV. Les analyses en réseau en trois dimensions

Comme vu précédemment, l'analyse en trois dimensions se veut plus précise et plus riche en informations particulièrement utiles pour les traitements orthodontico-chirurgicaux et leurs planifications.

Alors que les analyses céphalométriques conventionnelles en trois dimensions commencent à se développer, les ressources disponibles pour des analyses en réseau sont faibles et se limitent à quelques auteurs.

A. L'analyse de Ferrario

Ferrario a publié en 1998 un premier article décrivant une méthode inspirée de celle de Moorrees puis de Ghafari pour analyser la face d'un patient en trois dimensions[88]. Sa méthode se limite aux tissus cutanés, mais est une ébauche de ce que pourrait donner une analyse plus globale.

Il va ainsi reprendre une de ses études précédentes[89] pour créer des normes de référence à partir de 50 hommes et 50 femmes, caucasiens, âgés de 18 à 32 ans, présentant une occlusion normale de Classe I d'Angle (Figure 19). Ces normes sont inscrites dans une géométrie comprenant 84 parallélépipèdes disposés dans les trois dimensions.

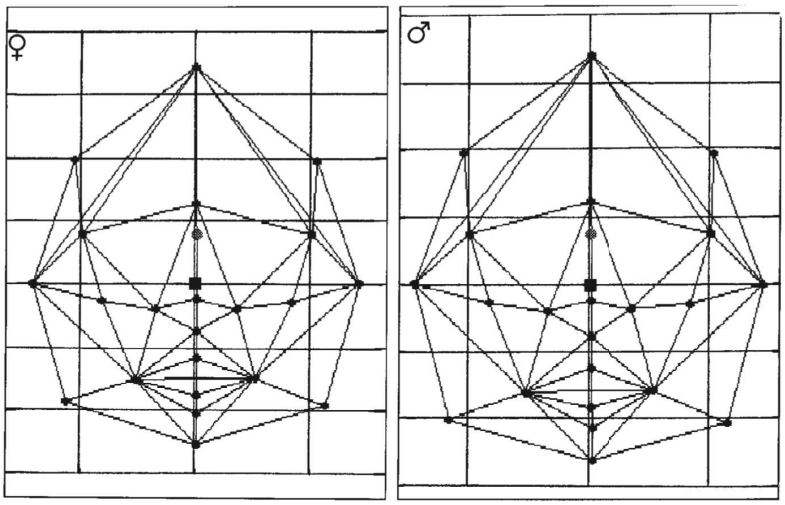


Figure 19 : Mesh de référence pour les femmes à droite et les hommes à gauche, en vue frontale, d'après Ferrario[88]

Ces normes peuvent ensuite être superposées à la grille individualisée d'un patient pour étudier ses dysmorphoses faciales, mises en évidence par un écart entre les deux tracés (exemple Figure 20).

A la différence du Mesh de Moorrees, Ferrario ne permet cependant pas la visualisation graphique par déformation de la grille de référence.

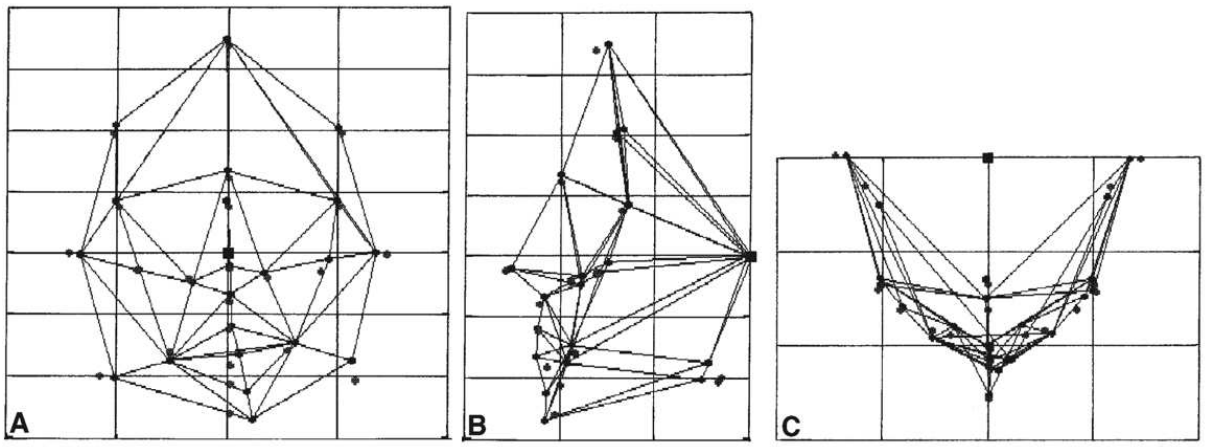


Figure 20 : Analyse de Ferrario de face (A), de profil (B), de haut (C), les traits correspondent au Mesh du patient, les points isolés correspondent à la norme, d'après Ferrario[88]

Dans l'exemple ci-dessus, on peut constater que le menton du patient est dévié vers la gauche et qu'il est proéminent, il est aussi hyperdivergent.

En 2003, Ferrario a publié une deuxième version de son analyse[90]. Elle en reprend les principes de base, mais se veut plus précise. Ainsi, le nombre de repères faciaux a été augmenté à 50 pour prendre en compte les oreilles, les yeux, le nez, les lèvres, le menton, les joues et le front. Le nombre d'individus nécessaires à la réalisation des grilles de référence a lui aussi été revu à la hausse pour passer à 591 Italiens, permettant d'établir les normes en fonction de différentes tranches d'âge en fonction du sexe.

B. L'analyse de Terajima

En 2009, Terajima publie une nouvelle méthode[91], beaucoup plus précise, rendue possible grâce à la démocratisation des outils informatiques de modélisation en trois dimensions.

A partir d'images scanner de 10 hommes et 10 femmes d'origine japonaise, il va extraire les données de la surface cutanée. Cette surface sera ensuite divisée en 69 000 cellules géométriques triangulaires, reliées entre elles par 135 000 points anatomiques.

Les données des différents patients ont ensuite été regroupées pour former des surfaces de référence moyennes pour les hommes et pour les femmes (Figure 21).

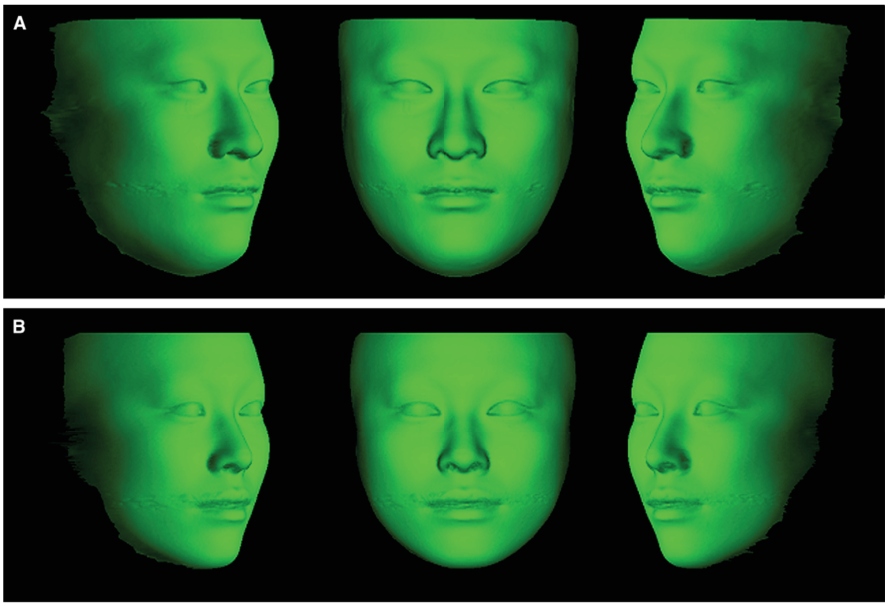


Figure 21 : Surface de référence pour les hommes (A) et pour les femmes (B), d'après Terajima

Ces surfaces de référence peuvent ensuite être superposées au scanner d'un patient afin d'évaluer les dysmorphoses par rapport à la norme, comme illustré Figure 22, présentant une femme d'origine japonaise en classe III squelettique par promandibulie.

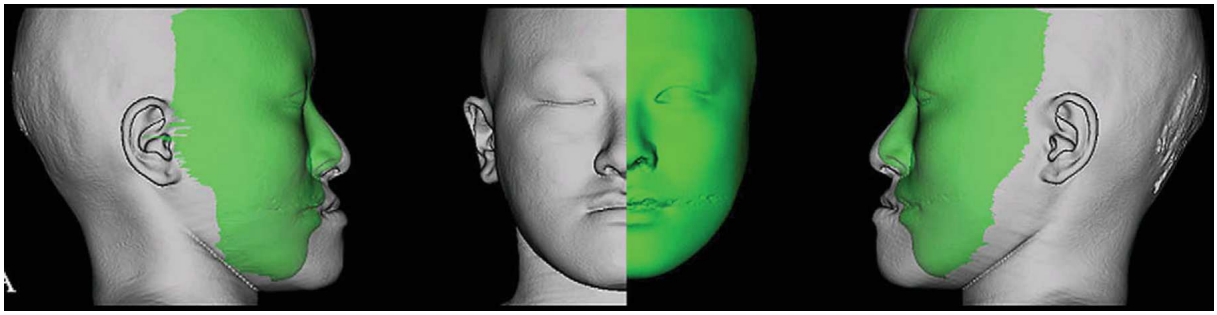


Figure 22 : Superposition d'un CBCT d'une patiente japonaise avec la norme pour les femmes, d'après Terajima

Quelques mois plus tard, Terajima a publié un second article où il étendait sa méthode à l'analyse concomitante des tissus durs. En fusionnant les données des 10 patients hommes et 10 patients femmes, il a obtenu des réseaux de référence pour les tissus durs, comprenant 7 757 polygones et 5 072 points. Il a de plus repris son travail précédent pour représenter les tissus mous sous la même forme à l'aide de 1 882 polygones et 1 013 points.

Ces réseaux de référence sont illustrés Figure 23.

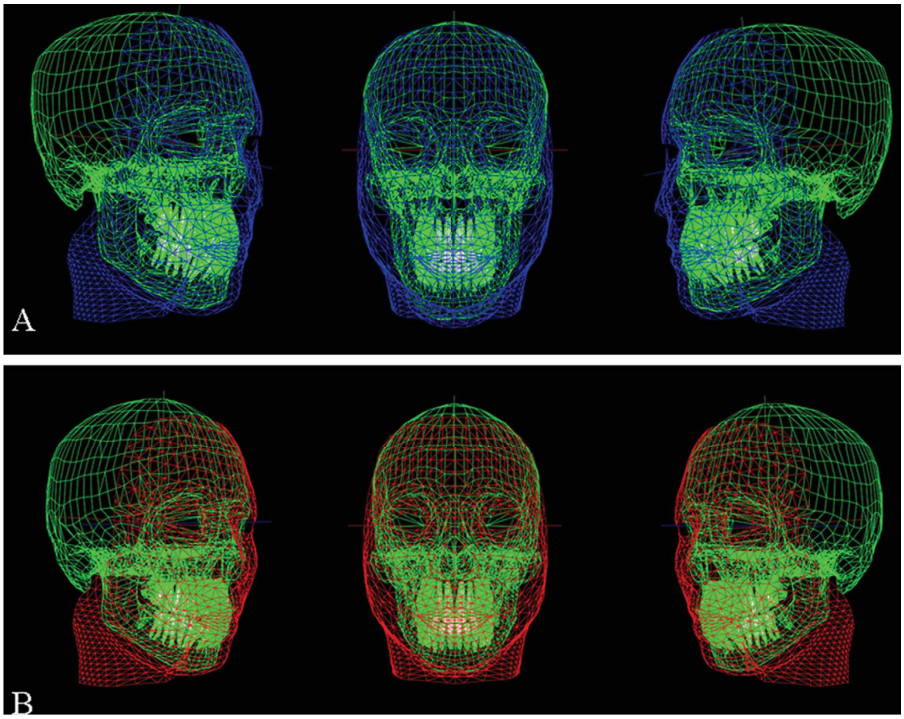


Figure 23 : Réseaux de référence pour les hommes (A) et les femmes (B), d'après Terajima

Comme précédemment, il est alors possible de mettre la norme à l'échelle du patient pour en analyser ses dysmorphoses, tant au niveau du crâne entier (Figure 24) que d'une région plus précise comme la mandibule (Figure 25) ou au niveau des tissus mous (Figure 26). Le patient illustré sur ces 3 images est une japonaise de 18 ans qui présente une prognathie mandibulaire et une occlusion dentaire de Classe III d'Angle avec un surplomb négatif.

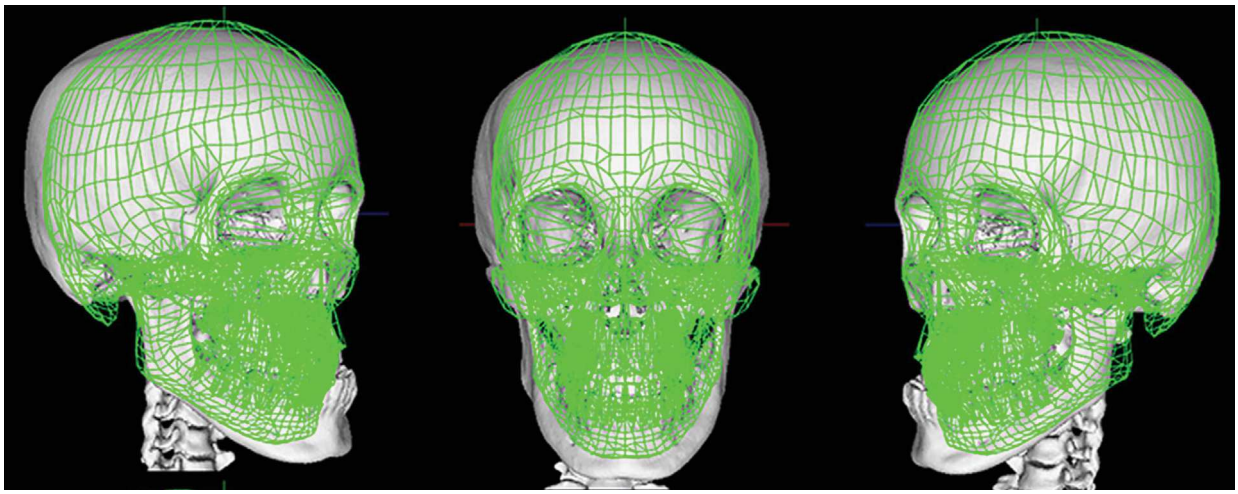


Figure 24 : Superposition du réseau de référence sur le crâne d'une femme de 18 ans, d'après Terajima

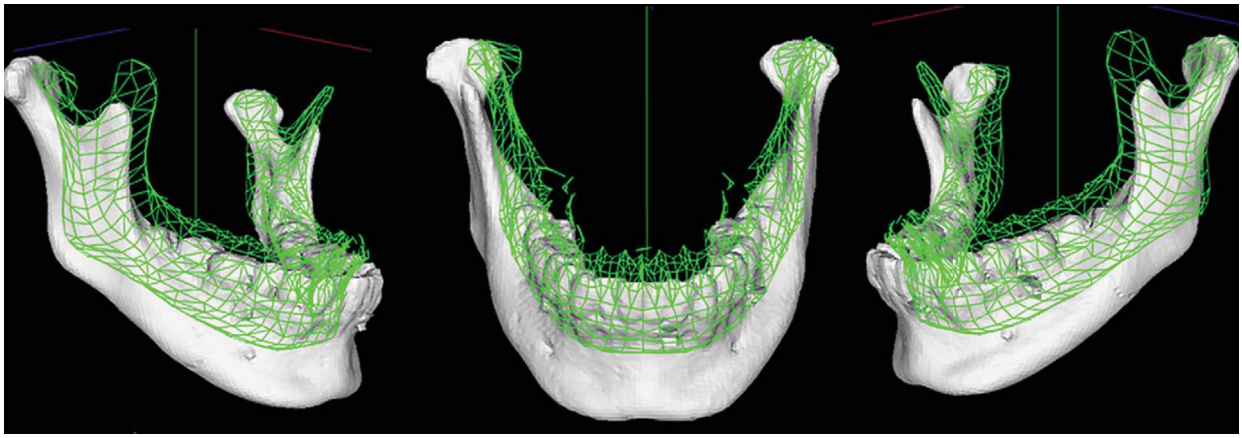


Figure 25 : Superposition du réseau de référence au niveau de la mandibule, d'après Terajima

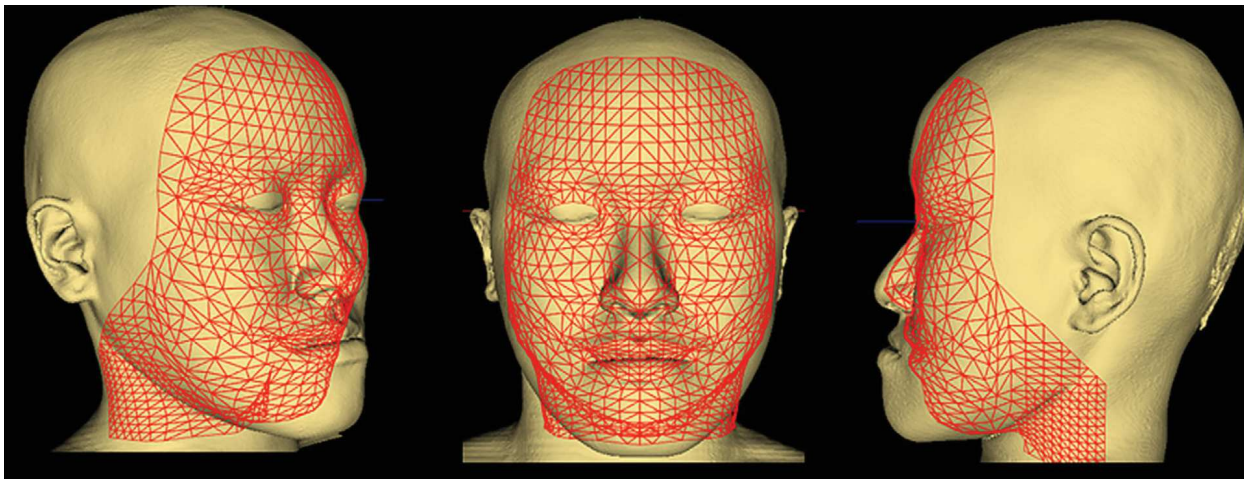


Figure 26 : Superposition du réseau de référence sur la surface cutanée, d'après Terajima

C. Avantages

Le principal avantage d'utiliser une analyse en réseau en trois dimensions est la représentation didactique d'une dysmorphose avec son degré de sévérité. En effet les modèles sont visuels et parfois même manipulables.

Elle permet également de quantifier précisément le degré des dysmorphoses, notamment des dysmorphoses asymétriques.

C'est un réel avantage pour la communication entre confrères, avec le patient ou ses parents pour expliquer les thérapeutiques nécessaires.

Enfin, elles auront un avantage dans la planification chirurgicale avec une simulation précise des résultats et dans la réalisation d'aides per-opératoires par la réalisation notamment de guides chirurgicaux de repositionnement modélisés sur ordinateur puis imprimés en trois dimensions[92].

D. Inconvénients

Ces analyses proposées sont encore récentes et non démocratisées. Les échantillons ne sont pas suffisamment conséquents et diversifiés en fonction des différentes populations à travers le monde. L'usage d'une telle analyse semble dès lors, réservé à la recherche scientifique.

La question se pose notamment de la complexité de réalisation ainsi que de l'expertise technologique nécessaire à une telle analyse.

Leur utilisation se justifie plutôt lors de cas orthodontico-chirurgicaux où des déplacements osseux importants sont nécessaires. En effet, le surplus d'informations n'est pas forcément nécessaire pour un patient ne présentant pas de grande dysmorphose.

Par ailleurs, ces analyses se focalisent essentiellement sur les tissus mous et squelettiques du patient. Les tissus dentaires ne sont à l'heure actuelle pas pris en compte. Dans certains cas, une analyse complémentaire pourra également être indiquée (céphalométrie traditionnelle par exemple).

V. Cahier des charges pour l'informatisation du mesh de Moorrees

La construction manuelle du mesh de Moorrees est chronophage. L'absence de cette analyse des logiciels de gestion de patients dans les cabinets d'orthodontie français en limite sa démocratisation et son utilisation.

Le travail de cette thèse est de fournir toutes les ressources nécessaires pour l'informatisation de cet outil, et son exploitation de façon aisée.

A. Choix du logiciel

L'analyse en réseau de Moorrees se résume à une construction géométrique d'une grille par-dessus une téléradiographie de profil, puis à la déformation de cette grille par la translation de points remarquables selon des vecteurs verticaux et horizontaux.

Une informatisation de cette procédure peut donc être réalisée par n'importe quel logiciel de géométrie informatique en deux dimensions permettant l'incorporation d'une image externe en fond de construction graphique.

Un candidat reconnu dans le milieu de l'enseignement supérieur en mathématiques est le logiciel Geogebra™ (v5, GeoGebra Institute et GeoGebra GmbH, Australie). Sa licence d'utilisation est gratuite dès lors qu'elle n'a pas pour rôle une exploitation commerciale[93].

B. Construction du script

a. Insertion de l'image

La première étape nécessaire à la construction de l'outil informatique est l'insertion d'une téléradiographie de profil prise en position naturelle de la tête, exportée au format jpeg. Le bord inférieur de cette image est parallèle à l'axe des x, afin de pouvoir matérialiser la verticale vraie par l'axe des y. Cette image est laissée en fond de construction, ce qui nous servira de base pour les étapes suivantes.

b. Placement des points remarquables

Dans un premier temps il faut placer deux points qui nous serviront à la construction d'une échelle, nécessaire au placement d'un point particulier, dépendant d'une longueur (Tableau 3).

Point	Position
E0cm	Point positionné à la base d'une échelle métrique.
E4cm	Point positionné sur une échelle métrique, espacé de 4cm du point précédent.

Tableau 3 : Position des points de l'échelle

Les points squelettiques sont les points remarquables identifiés en tant que standards dans le domaine de l'anthropologie par Martin et Saller[94] (Tableau 4).

Point	Position
ANS	Point le plus antérieur de l'épine nasale antérieure.
Articulare	Point matérialisé par l'intersection de la partie postérieure du condyle mandibulaire avec la base du crâne sur la radiographie.
Basion	Point le plus postéro-inférieur du basi-occipital.

CondyleAnt	Point matérialisé par l'intersection du la partie antérieure du condyle mandibulaire avec la base du crâne sur la radiographie.
Glabella	Point le plus antérieur de la base du crâne.
Gonion	Point représentant l'angle mandibulaire, à la rencontre de la partie montante du ramus mandibulaire avec le corps de la mandibule.
Menton	Point le plus inférieur de la symphyse mandibulaire.
Nasion	Point le plus antérieur au niveau de la suture naso-frontale.
OrbitalPost	Point le plus postérieur du mur de l'orbite, situé au niveau de la projection du procès zygomatique.
PNS	Epine nasale postérieure.
Pogonion	Point le plus antérieur de la symphyse mandibulaire.
PointA	Point le plus postérieur sur la concavité alvéolaire maxillaire.
PointB	Point le plus postérieur sur la concavité alvéolaire mandibulaire.
PterygomaxillaryFissureAnt	Point représentant la partie postérieure du maxillaire, représentée par le point le plus profond au niveau du bord antérieur de la fissure pterygo-maxillaire.
RamusAnt	Point le plus postérieur au niveau de la concavité antérieure du ramus mandibulaire.
RamusPost	Point le plus antérieur au niveau de la concavité postérieure du ramus mandibulaire.
Sella	Point situé au centre de la selle turcique.
SymphysisPost	Point le plus postérieur de la symphyse mandibulaire.
SymphysisPostSup	Point le plus supérieur au niveau de la partie postérieure de la symphyse mandibulaire.
ZygomaticInf	Point le plus inférieur au niveau du processus zygomatique.

Tableau 4 : Position des points squelettiques

Les points dentaires se limitent à représenter les incisives et l'orientation du plan d'occlusion (Tableau 5). Le point OcclusalPost doit se situer à 2 cm du point Pm2Mesial, une construction géométrique est nécessaire. Ainsi, il s'agit de créer un cercle qui a pour origine le point Pm2Mesial et dont le rayon est égal à la moitié de la distance séparant les deux points de l'échelle. Il faut alors créer une contrainte pour que le point OcclusalPost appartienne à ce cercle.

Point	Position
MandIncAxis	Point représentant l'apex de l'incisive mandibulaire.
MandIncEdge	Point représentant le bord triturant de l'incisive mandibulaire.
MaxIncAxis	Point représentant l'apex de l'incisive maxillaire.
MaxIncEdge	Point représentant le bord triturant de l'incisive maxillaire.
OcclusalPost	Point espacé de 2cm du point Pm2Mesial et situé entre les cuspides des molaires supérieures et inférieures.
Pm2Mesial	Point situé sur la plan d'occlusion, au niveau du bord mésial de la deuxième prémolaire maxillaire.

Tableau 5 : Position des points dentaires

Enfin, une série de points cutanés sont ajoutés pour compléter notre ensemble de points remarquables (Tableau 6).

Point	Position
GlabellaST	Point le plus antérieur du front.
LabraleInf	Point le plus antérieur de la lèvre inférieure.
LabraleSup	Point le plus antérieur de la lèvre supérieure.
NasionST	Point situé à l'intersection du front avec le nez.
PogonionST	Point le plus antérieur du menton.
Pronasale	Point représentant la pointe du nez.
Stomion	Point représentant le contact de la lèvre supérieure avec la lèvre inférieure.

Subnasale	Point situé à l'intersection de la lèvre supérieure avec le septum nasal.
Supramentale	Point représentant le sillon labio-mentonnier.

Tableau 6 : Position des points du profil cutané

Une fois cette série de points créée, puis correctement positionnée, nous nous retrouvons dans la situation représentée ci-dessous (Figure 27).

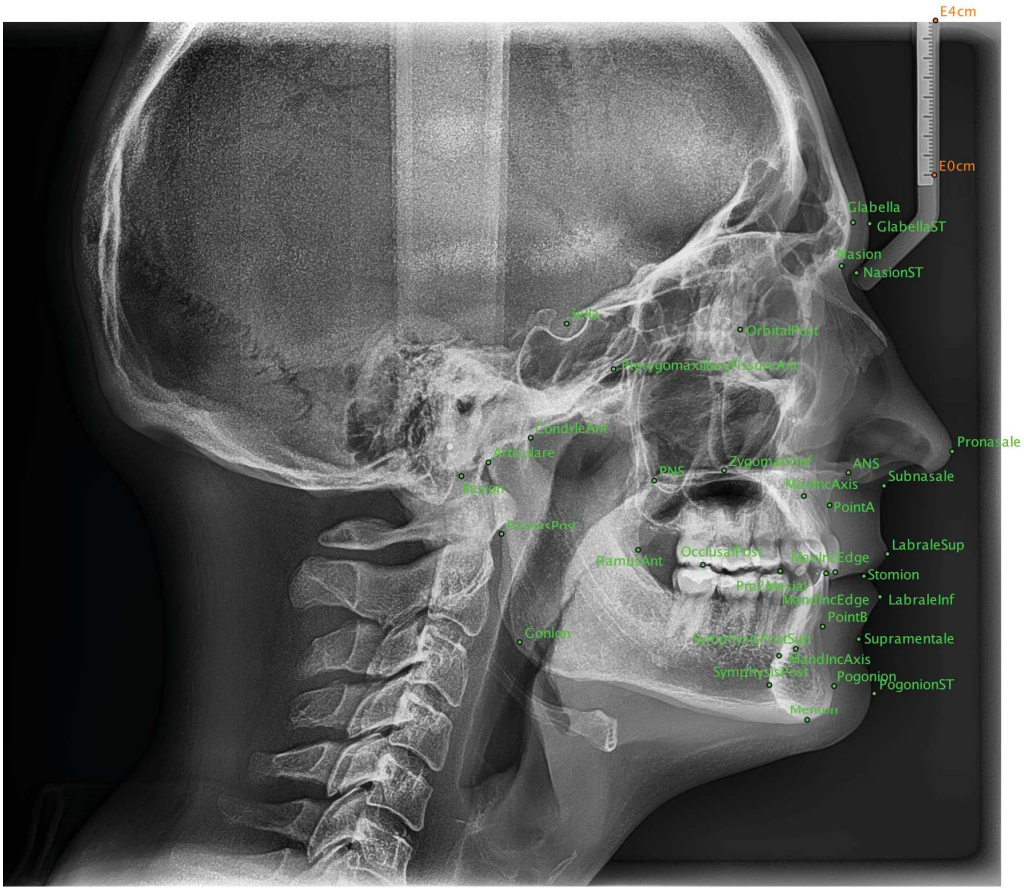


Figure 27 : Positionnement des points

c. Simplification de la représentation du patient

Afin d'alléger la représentation graphique de l'analyse en réseau, nous pouvons créer des droites reliant différents points entre eux pour obtenir un dessin minimaliste de la morphologie du patient.

Pour représenter le profil cutané, il faut créer une ligne brisée passant par les points : GlabellaST, NasionST, Pronasale, Subnasale, LabraleSup, Stomion, LabraleInf, Supramentale, PogonionST.

La base du crâne est représentée par la création d'une ligne brisée rejoignant les points : Glabella, Nasion, Sella et Basion.

Le maxillaire est représenté par deux triangles. L'un reliant les points OrbitalPost, PterygomaxillaryFissureAnt et ZygomaticInf. L'autre reliant les points ANS, PNS et PointA.

La mandibule est quant à elle représentée par trois lignes. Une première ligne brisée relie les points : PointB, Pogonion, Menton, SymphysisPost et SymphysisPostSup. Une autre ligne brisée relie les points : Menton, Gonion, RamusPost et Articulare. Et enfin, un segment simple relie les points CondyleAnt et RamusAnt.

L'incisive supérieure est représentée par un segment reliant les points MaxIncEdge et MaxIncAxis.

L'incisive inférieure est représentée par un segment reliant les points MandIncEdge et MandIncAxis.

Et enfin, le plan d'occlusion est représenté par un segment reliant les points Pm2Mesial et OcclusalPost.

En masquant la radiographie, ainsi que les points remarquables, nous obtenons alors la représentation minimaliste de la morphologie du patient (Figure 28).

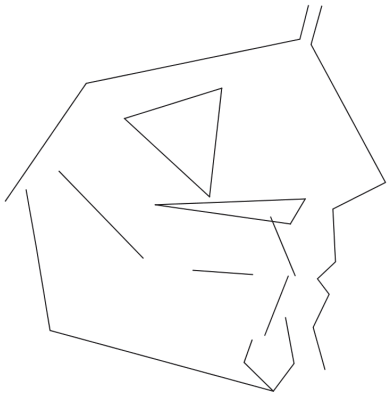


Figure 28 : Représentation minimaliste du patient

d. Construction de la grille individuelle du patient

L'étape suivante consiste à construire la grille individuelle du patient qui servira de base de déformation pour l'analyse en réseau de Moorres.

i. Construction du rectangle de référence

La construction de cette grille démarre par celle du rectangle de référence :

- Le côté droit est une ligne verticale (construction d'une ligne parallèle à celle représentant l'axe des y) passant par le point Nasion.
- Le côté supérieur est modélisé par la création d'une ligne perpendiculaire à la ligne précédente passant par le point Nasion.
- Le côté inférieur est créé par une ligne parallèle à la ligne précédente passant par le point ANS.
- Pour le côté gauche, il faut créer une ligne verticale passant par un point situé sur le côté supérieur. Point situé à une distance du point Nasion égale à la distance séparant les points Nasion et Sella. Pour ce faire, il faut créer un cercle qui a pour origine le point Nasion et pour rayon le segment reliant les points Nasion et Sella. L'intersection de ce cercle avec le côté supérieur du rectangle de référence donne le point où passe la ligne verticale modélisant le côté gauche du rectangle.

ii. Division du rectangle de référence

Chaque côté du rectangle de référence est alors divisé en deux parties égales. Les points résultants de ces séparations sont reliés entre eux au niveau du côté opposé pour obtenir 4 petits rectangles de tailles égales.

iii. Construction de la grille individuelle

Les petits rectangles peuvent alors être projetés pour former la grille individuelle du patient.

Ainsi, le petit rectangle en contact du point Nasion peut subir une projection symétrique, dont l'axe de symétrie est son côté droit.

Le nouveau rectangle obtenu est projeté de la même façon, une fois au-dessus et quatre fois en-dessous.

Il faut ensuite réaliser cette opération avec les différents rectangles obtenus pour obtenir une grille finale composée de 24 petits rectangles comme illustré Figure 29. Les droites nécessaires à la construction du rectangle de référence sont alors masquées pour ne laisser apparaître que les informations qui nous sont utiles.

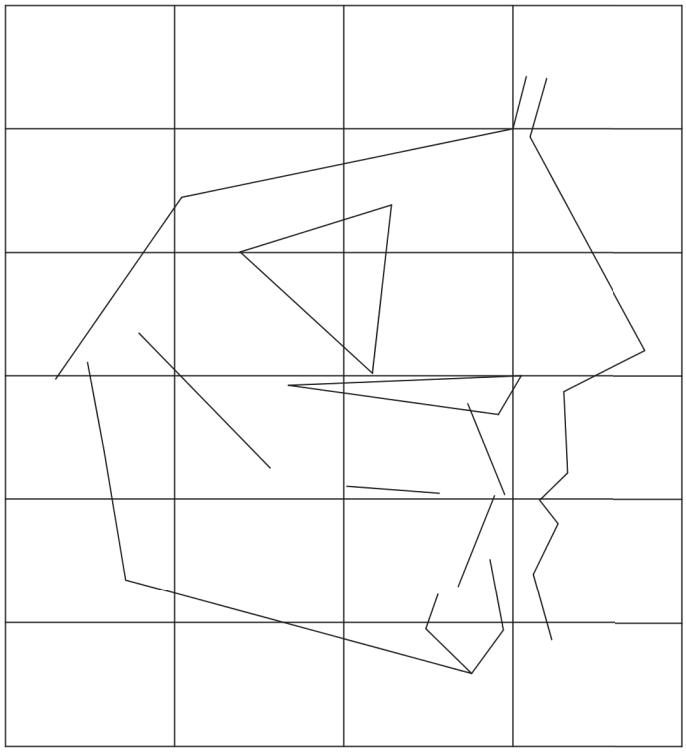


Figure 29 : Construction de la grille individuelle

A partir de là, le logiciel est assez abouti et permet la superposition du Mesh normalisé avec la grille individualisée du patient.

Pour continuer avec la méthode originale de Moorrees, il faut appliquer une déformation du réseau qui représente les dysmorphoses du patient.

e. Déformation de la grille

La grille individuelle du patient est déformée en fonction de certains points remarquables qui se trouvent, dans la norme, à une certaine distance de la grille de référence.

i. Déformation des lignes verticales

La première ligne verticale, en partant de la droite, est déformée en fonction des points GlabellaST, NasionST, Pronasale, Subnasale, LabraleSup, Stomion (si les lèvres sont en occlusion), LabraleInf, Supramentale, PogonionST.

La deuxième ligne verticale est déformée en fonction des points : GlabellaST, ANS, PointA, MaxIncEdge, MandIncEdge, PointB, Pogonion, Menton.

La troisième ligne verticale est déformée selon deux points : PNS et OcclusalPost.

Les quatrième et cinquième lignes sont quant à elles déformées selon les points Articulare, Basion, Gonion.

Dans la norme, tous ces points se trouvent normalement à une distance connue des différentes lignes.

Pour modéliser les distorsions des lignes verticales, il faut alors déplacer les différents points cités ci-dessus par des translations issues du pourcentage d'un vecteur.

On commence alors par créer un vecteur horizontal qui pourra être superposé au grand côté d'un des rectangles de la grille. Ainsi sa direction est horizontale, son sens est de la gauche vers la droite et sa norme est égale à la longueur du grand côté d'un rectangle de la grille.

Il faut alors appliquer la translation pour chacun des points cités précédemment, selon un pourcentage du vecteur. Les différents coefficients à appliquer au vecteur de translation sont retrouvés dans le Tableau 7.

Point à subir la translation	Coefficient à appliquer au vecteur
ANS	-0,13
Articulare	0,42 et -0,58
Basion	0,67 et -0,33
GlabellaST	0,71 et -0,29
Gonion	0,14 et -0,86
LabraleInf	0,56
LabraleSup	0,50
MandIncEdge	0
MaxIncEdge	-0,13
Menton	0,26
NasionST	0,82
OcclusalPost	0,12
PNS	0,38
Pogonion	0,10
PogonionST	0,73
PointA	0
PointB	0,15
Pronasale	0,10
Stomion	0,68
Subnasale	0,54
Supramentale	0,79

Tableau 7 : Liste des coefficients à appliquer au vecteur de translation pour les déformations des lignes verticales

Une fois cette série de points créée, nous pouvons les relier par des lignes brisées, en fonction des lignes verticales qu'ils doivent représenter.

ii. Déformation des lignes horizontales

Il faut alors en faire de même pour les lignes horizontales.

Les deux premières lignes horizontales en partant du haut sont déformées en fonction du point Sella.

La troisième ligne est déformée selon les points Pronasale, Articulare et Basion.

La quatrième ligne est déformée selon les points Pronasale, ANS, PNS, Articulare et Basion.

La cinquième ligne est déformée selon les points Stomion (si les lèvres sont en occlusion), MaxIncEdge, MandIncEdge, Pm2Mesial, OcclusalPost, Gonion.

Les sixième et septième lignes sont déformées en fonction des points Menton et Gonion.

Comme précédemment il faut créer un vecteur qui servira de base pour les translations. Ce vecteur est superposé au petit côté d'un des rectangles de la grille individuelle du patient. Il a ainsi une direction verticale, un sens du bas vers le haut et pour norme la longueur du petit côté du rectangle.

Nous pouvons alors appliquer les translations aux différents points remarquables selon le vecteur, multiplié par différents coefficients retrouvés dans le Tableau 8.

Point à subir la translation	Coefficient à appliquer au vecteur
ANS	0
Articulare	0,60 et -0,40
Basion	0,88 et -0,12
Gonion	0,27 et -0,73 et -1,73
MandIncEdge	0
MaxIncEdge	0,10
Menton	0,53 et -0,47
OcclusalPost	-0,13
Pm2Mesial	0
PNS	0
Pronasale	0,67 et -0,33
Sella	0,42 et 1,42
Stomion	0

Tableau 8 : Liste des coefficients à appliquer au vecteur de translation pour les déformations des lignes horizontales

Une fois cette série de points remarquables transformée, il faut les relier entre eux par des lignes brisées afin de représenter les lignes horizontales correspondantes.

Les lignes horizontales et verticales ainsi créées doivent être prolongées par des segments pour venir compléter la grille déformée.

Après masquage des points nécessaires à la construction, nous nous retrouvons avec notre déformation en réseau comme illustré Figure 30.

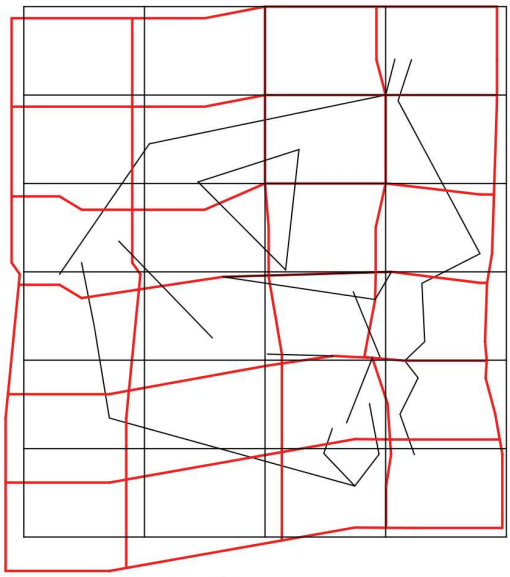


Figure 30 : Déformation du réseau

f. Customisation

De petits outils peuvent alors être ajoutés pour simplifier l'utilisation du logiciel.

On peut notamment créer une série de cases à cocher permettant d'afficher ou de masquer différentes variables de la représentation graphique. Ces cases transforment une valeur booléenne en « true » ou « false » selon qu'elles sont cochées ou pas.

Ainsi, nous pouvons choisir d'afficher ou masquer la téléradiographie de profil, les points, le tracé simplifié de la morphologie du patient, la grille de référence individualisée, ou encore la déformation de cette grille. Pour ce faire, il suffit de donner une condition qui réponde à la valeur booléenne correspondante pour afficher l'objet.

C. Utilisation

Pour utiliser le logiciel avec une téléradiographie de profil souhaitée, il suffit dès lors de supprimer celle qui a servi de base de construction, puis d'en importer une nouvelle.

Il faut alors déplacer chaque point remarquable un à un à la bonne position pour que toute la construction suive automatiquement le déplacement des points et s’adapte à la nouvelle situation.

VI. Conclusion

Nous avons vu qu'il existe une multitude d'analyses céphalométriques en deux et trois dimensions pour étudier les relations entre les bases osseuses, les organes dentaires et les tissus mous de nos patients.

Cependant, aucune ne fait consensus, chacune présentant des avantages et des inconvénients.

Notre travail a permis de proposer une analyse en réseau informatisée en deux dimensions pour étudier les dysmorphoses de nos patients, basée sur les publications de Moorrees.

Cette méthodologie présente plusieurs avantages, notamment d'être un outil standardisé, didactique, de communication et suivant une procédure innovante peu chronophage.

En perspective, le développement de telles analyses informatisées en deux puis en trois dimensions vont probablement enrichir nos pratiques cliniques, d'autant plus qu'elles pourront être intégrées aux logiciels de gestion des cabinets.

Faculté
de chirurgie dentaire

UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

SIGNATURE DES CONCLUSIONS

Thèse en vue du Diplôme d'Etat de Docteur en Chirurgie Dentaire

Nom - prénom de l'impétrant : PHILIPPIDES Nicolas

Titre de la thèse : Les analyses céphalométriques en réseau, état des lieux avant informatisation

Directeur de thèse : Docteur Yves BOLENDER

VU
Strasbourg, le : 27.03.2018
Le Président du Jury,

Professeur F. MEYER

VU
Strasbourg, le : 5 - AVR. 2018
Le Doyen de la Faculté
de Chirurgie Dentaire de Strasbourg,

Professeur C. TADDEI-GROSS

Faculté de Chirurgie Dentaire de Strasbourg - service de scolarité / bureau des thèses
8 rue Sainte Elisabeth - 67000 Strasbourg - Tél. : 03.68.85.60.80

VII. Références bibliographiques

1. Broadbent BH. A new X-ray technique and its application to orthodontia: the introduction of cephalometric radiography. Angle Orthod. 1931 ; 51 : 93-114.
2. Hofrath H. Die Bedeutung der Röntgenfern- und Abstandsaufnahme für die Diagnostik der Kieferanomalien. Fortschritte Orthod Theor Prax. 1931 ; 1 : 232-58.
3. Larousse. Encyclopédie Larousse en ligne - téléradiographie [En ligne]. http://www.larousse.fr/encyclopedie/medical/téléradiographie/16478. Consulté en 2017.
4. Bookstein FL. Morphometric tools for landmark data: geometry and biology. Cambridge : Cambridge University Press ; 1997, 435p.
5. Dryden IL, Mardia KV. Statistical shape analysis. Chichester : John Wiley ; 1998, 347p.
6. Björk A. The face in profile. An anthropological X-ray investigation on swedish children and conscripts. Sweden : Berlingska Boktryckeriet ; 1947, 180p.
7. Sassouni V. A roentgenographic cephalometric analysis of cephalo-facio-dental relationships. Am J Orthod. 1955 ; 41 : 735-64.
8. Tweed CH. The Frankfort-Mandibular Incisor Angle (FMIA) in orthodontic diagnosis, treatment planning and prognosis. Angle Orthod. 1954 ; 24 : 121-69.
9. Tweed CH. The diagnostic facial triangle in the control of treatment objectives. Am J Orthod. 1969 ; 55 : 651-67.
10. Steiner CC. Cephalometrics for you and me. Am J Orthod. 1953 ; 39 : 729-55.
11. Steiner CC. Cephalometrics in clinical practice. Angle Orthod. 1959 ; 29 : 8-29.
12. Steiner CC. The use of cephalometrics as an aid to planning and assessing orthodontic treatment. Am J Orthod. 1960 ; 46 : 721-35.
13. Ricketts RM. Perspectives in the clinical application of cephalometrics: the first fifty years. Angle Orthod. 1981 ; 51 : 115-150.
14. Ricketts RM. A foundation for cephalometric communication. Am J Orthod. 1960 ; 46 : 330-57.
15. Ricketts RM. Cephalometric synthesis. Am J Orthod. 1960 ; 46 : 647-73.
16. Ricketts RM. Cephalometric analysis and synthesis. Angle Orthod. 1961 ; 31 : 141-56.

17. Delaire J, Schendel SA, Tulasne J-F. An architectural and structural craniofacial analysis: A new lateral cephalometric analysis. Oral Surg Oral Med Oral Pathol. 1981 ; 52 : 226-38.
18. Coben SE. The integration of facial skeletal variants: a serial cephalometric roentgenographic analysis of craniofacial form and growth. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 1955 ; 41 : 407-434.
19. Haute Autorité de Santé. Indications de l'orthopédie dento-faciale et dento-maxillo-faciale chez l'enfant et l'adolescent. [En ligne]. 2002. http://www.has-sante.fr/portail/jcms/c_272208/fr/indications-de-l-orthopedie-dento-faciale-et-dento-maxillo-faciale-chez-l-enfant-et-l-adolescent. Consulté en 2017.
20. American Association of Orthodontists. Clinical Practice Guidelines. [En ligne]. 2016. https://www.aaoinfo.org/practice-management/clinical-practice-guidelines. Consulté en 2017.
21. Duterloo HS, Planché P-G. An illustrated guide to prepare for the examination of the European Board of Orthodontists. [En ligne]. 2005. https://www.eoseurope.org/documents/instructions/EBO05.pdf. Consulté en 2017.
22. Kapoor DN, Sharma R. Clinical utility of the mesh diagram method in malocclusion and surgical orthodontic patients. J Indian Orthod Soc. 2006 ; 40 : 42.
23. Bassigny F. Manuel d'orthopédie dento-faciale. Paris ; Milan ; Barcelone : Masson ; 1991, 218p.
24. Proffit WR, Fields HW, Sarver DM. Contemporary orthodontics. 5th ed. Missouri : Elsevier Mosby ; 2014, 768p.
25. Wylie W. Quantitative method for the comparison of cranio-facial growth in different individuals. Am J Anat. 1947 ; 74 : 39-60.
26. Curtis A. Cephalometric tracing. [En ligne]. 2003. http://bol.ucla.edu/~acurtis/cephalo.htm. Consulté en 2017.
27. Downs WB. Variations in facial relationships; their significance in treatment and prognosis. Am J Orthod. 1948 ; 34 : 812-40.
28. Downs WB. The role of cephalometrics in orthodontic case analysis and diagnosis. Am J Orthod. 1952 ; 38 : 162-82.

29. Downs WB. Analysis of the dentofacial profile. Angle Orthod. 1956 ; 26 : 191-212.
30. Rutter RR. Orthodontic milestones: sixty journal articles that rocked the specialty. Unpublished manuscript, 1995.
31. American Association of Orthodontists. Orthodontic glossary: glossary of dentofacial orthopedic terms. American Association of Orthodontists ; 1993, 31p.
32. Zwemer TJ. Mosby's Dental Dictionary. 1st edition. St. Louis : Mosby Inc ; 1998, 658p.
33. Jacobson A. The "Wits" appraisal of jaw disharmony. Am J Orthod. 1975 ; 67 : 125-38.
34. Holdaway RA. A soft-tissue cephalometric analysis and its use in orthodontic treatment planning. Part I. Am J Orthod. 1983 ; 84 : 1-28.
35. McNamara JA. A method of cephalometric evaluation. Am J Orthod. 1984 ; 86 : 449-69.
36. Siriwat PP, Jarabak JR. Malocclusion and facial morphology is there a relationship? Angle Orthod. 1985 ; 55 : 127-38.
37. Keim RG, Gottlieb EL, Vogels DS, Vogels PB. 2014 JCO study of orthodontic diagnosis and treatment procedures, Part 1: results and trends. J Clin Orthod. 2014 ; 48 : 607-30.
38. In memory of Cecil Steiner. Angle Orthod. 1989 ; 59 : 311-2.
39. Graber TM. Problems and limitations of cephalometric analysis in orthodontics. J Am Dent Assoc. 1956 ; 53 : 439-54.
40. Dumitrache M, Gabison K, Atrtchine A, Chabre C. Trois analyses céphalométriques usuelles. [En ligne]. 2013. http://www.em-premium.com.scd-rproxy.u-strasbg.fr/article/851936. Consulté en 2017.
41. Balteau M. Evaluation des pratiques orthodontiques dans les cabinets en France et comparaison avec les Etats-Unis. Mémoire de spécialisation en orthopédie dento-faciale. Université de Strasbourg ; 2018, 84p.
42. Svanholt P, Solow B. Assessment of midline discrepancies on the postero-anterior cephalometric radiograph. Trans Eur Orthod Soc. 1977 ; 25 : 261-268.
43. Grummons DC, Kappeyne van de Coppello MA. A frontal asymmetry analysis. J Clin Orthod. 1987 ; 21 : 448-65.

44. Grayson BH, McCarthy JG, Bookstein F. Analysis of craniofacial asymmetry by multiplane cephalometry. Am J Orthod. 1983 ; 84 : 217-24.
45. Hewitt AB. A radiographic study of facial asymmetry. Br J Orthod. 1975 ; 2 : 37-40.
46. Ackerman JL, Proffit WR, Sarver DM, Ackerman MB, Kean MR. Pitch, roll, and yaw: describing the spatial orientation of dentofacial traits. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2007 ; 131 : 305-10.
47. Major PW, Johnson DE, Hesse KL, Glover KE. Landmark identification error in posterior anterior cephalometrics. Angle Orthod. 1994 ; 64 : 447-54.
48. Farronato G, Garagiola U, Dominici A, Periti G, de Nardi S, Carletti V, et al. “Ten-point” 3D cephalometric analysis using low-dosage cone beam computed tomography. Prog Orthod. 2010 ; 11 : 2-12.
49. Faure J, Oueiss A, Marchal-Sixou C, Braga J, Treil J. Céphalométrie tridimensionnelle : applications en clinique et en recherche. Orthod Fr. 2008 ; 79 : 13-30.
50. Faure J, Treil J, Borianne P, Casteigt J, Baron P. Céphalométrie tridimensionnelle en orthopédie dento-faciale. Les possibilités actuelles du logiciel Cépha 3dt. Orthod Fr. 2002 ; 73 : 19-37.
51. Treil J, Casteigt J, Borianne PH, Madrid C, Jaeger M, De Bonnecaze P. L’équilibre architectural de la face: un concept céphalométrique 3D. Rev Stomatol Chir Maxillofac. 1999 ; 100 : 111-122.
52. Treil J, Casteigt J, Roch P, Puech C, Cavezian R. Imagerie 3D des dysmorphoses maxillo-faciales. Orthod Fr. 1994 ; 64 : 295-308.
53. Treil J. Une nouvelle construction céphalometrique tridimensionnelle. Un nouveau paramètre d’analyse tridimensionnelle: les axes d’inertie. Un nouveau concept: l’équilibre maxillo-facial. Orthod Fr. 1997 ; 68 : 171-181.
54. Treil J, Faure J, Braga J, Casteigt J, Borianne P. Imagerie et céphalométrie tridimensionnelles des asymétries crânio-faciales. Orthod Fr. 2002 ; 73 : 179-197.
55. Treil J, Waysenson B, Borianne P, Casteigt J, Faure J, Horn A. Three-dimensional cephalometry. Alpha Omegan. 2001 ; 94 : 34.

56. Olszewski R, Zech F, Cosnard G, Nicolas V, Macq B, Reychler H. Three-dimensional computed tomography cephalometric craniofacial analysis: experimental validation in vitro. Int J Oral Maxillofac Surg. 2007 ; 36 : 828-33.
57. Gateno J, Xia JJ, Teichgraeber JF. New 3-dimensional cephalometric analysis for orthognathic surgery. J Oral Maxillofac Surg. 2011 ; 69 : 606-22.
58. Hans MG, Palomo JM, Dean D, Çakirer B, Min K-J, Han S, et al. Three-dimensional imaging: The caseWestern Reserve University method. Semin Orthod. 2001 ; 7 : 233-43.
59. Pittayapat P, Limchaichana-Bolstad N, Willems G, Jacobs R. Three-dimensional cephalometric analysis in orthodontics: a systematic review. Orthod Craniofac Res. 2014 ; 17 : 69-91.
60. Saint-Pierre F. Tomographie volumique à faisceau conique de la face (cone beam computirized tomography). Rapport d'évaluation technologique. Haute Autorité de Santé. [En ligne]. 2009. http://docplayer.fr/9168007-Tomographie-volumique-a-faisceau-conique-de-la-face-cone-beam-computerized-tomography.html. Consulté en 2017.
61. Rossini G, Cavallini C, Cassetta M, Barbato E. 3D cephalometric analysis obtained from computed tomography. Review of the literature. Ann Stomatol (Roma). 2011 ; 2 : 31-9.
62. Bourriau J, Bidange G, Foucart J-M. Les erreurs de mesure en céphalométrie 2D. Orthod Fr. 2012 ; 83 : 23-36.
63. Fagertun J, Harder S, Rosengren A, Moeller C, Werge T, Paulsen RR, et al. 3D facial landmarks: Inter-operator variability of manual annotation. BMC Med Imaging. 2014 ; 14 : 35.
64. Philippe J, Loreille JP. Analyse céphalométrique simplifiée. EMC Odontol-Stomatol. 2000 ; 23 : 455.
65. Faure J, Bolender Y. Beauty judgment: review of the literature. Orthod Fr. 2014 ; 85 : 3-29.
66. Ferrario VF, Sforza C, Dalloca LL, DeFranco DJ. Assessment of facial form modifications in orthodontics: proposal of a modified computerized mesh diagram analysis. Am J Orthod Dentofac Orthop. 1996 ; 109 : 263-70.
67. Dürer A. Traité des proportions. Paris : Hermann ; 2008, 202p.

68. De Coster L. The network method of orthodontic diagnosis. Angle Orthod. 1939 ; 9 : 3-14.
69. Moorrees CFA, Tandarts. Normal variation and its bearing on the use of cephalometric radiographs in orthodontic diagnosis. Am J Orthod. 1953 ; 39 : 942-50.
70. Moorrees CF, uan Venrooij ME, Lebret LM, Glatky CG, Kent RL, Reed RB. New norms for the mesh diagram analysis. Am J Orthod. 1976 ; 69 : 57-71.
71. Loreille J-P. Les analyses céphalométriques en réseaux. In: Loreille J-P. Céphalométrie et Orthodontie. Paris : SNPMD ; 1992, 234-45.
72. Moorrees CFA, Kean MR. Natural head position, a basic consideration in the interpretation of cephalometric radiographs. Am J Phys Anthropol. 1958 ; 16 : 213-34.
73. Ghafari J. The Moorrees Mesh Diagram: Proportionate analysis of the human face. In: Jacobson A, Jacobson RL. Radiographic cephalometry. From basics to 3-D imaging. Chicago : Quintessence Publishing Co. Inc. ; 2006, 161-84.
74. Ghafari J. Modified use of the Moorrees mesh diagram analysis. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 1987 ; 91 : 475-82.
75. Nomura M, Motegi E, Hatch JP, Gakunga PT, Ng'ang'a PM, Rugh JD, et al. Esthetic preferences of European American, Hispanic American, Japanese, and African judges for soft-tissue profiles. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2009 ; 135 : 87-95.
76. McNulty EC, Barrett MJ, Brown T. Mesh diagram analysis of facial morphology in young adult Australian aborigines. Aust Dent J. 1968 ; 13 : 440-6.
77. Faustini MM, Hale C, Cisneros GJ. Mesh diagram analysis: developing a norm for African Americans. Angle Orthod. 1997 ; 67 : 121-8.
78. Evanko AM, Freeman K, Cisneros GJ. Mesh diagram analysis: developing a norm for Puerto Rican Americans. Angle Orthod. 1997 ; 67 : 381-8.
79. Jiang J, Xu T, Wang G, Yin D, Lin J. MESH diagrams of Chinese in Beijing and its preliminary application in practice. Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi Zhonghua Kouqiang Yixue Zazhi Chin J Stomatol. 2005 ; 40 : 46-9.
80. Sharma R. A cephalometric proportionate template for the Indian population. J Innov Dent. [En ligne]. 2011. http://journal.pdmdentalcollege.com/issue1/originalarticle/article1.html. Consulté en 2017.

81. Kalpins. A new method for evaluating craniofacial asymmetry utilizing posteroanterior radiography. J Dent Res. 1985 ; 64 : 1520.
82. Cortella S, Shofer FS, Ghafari J, others. Transverse development of the jaws: norms for the posteroanterior cephalometric analysis. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 1997 ; 112 : 519-522.
83. Carlotti AE, George R. A diagnostic adjunct in treatment planning for the dentofacial deformity patient. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 1987 ; 91 : 451-62.
84. Moorrees CFA. Natural head position: The key to cephalometry. In: Jacobson A, Jacobson RL. Radiographic cephalometry. From basics to 3-D imaging. Chicago : Quintessence Publishing Co. Inc. ; 2006, 153-60.
85. Cooke MS. Five-year reproducibility of natural head posture: A longitudinal study. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 1990 ; 97 : 489-94.
86. Peng L, Cooke MS. Fifteen-year reproducibility of natural head posture: A longitudinal study. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 1999 ; 116 : 82-5.
87. Uysal T, Baysal A, Yagci A. Evaluation of speed, repeatability, and reproducibility of digital radiography with manual versus computer-assisted cephalometric analyses. Eur J Orthod. 2009 ; 31 : 523-8.
88. Ferrario VF, Sforza C, Schmitz JH, Miani A, Serrao G. A three-dimensional computerized mesh diagram analysis and its application in soft tissue facial morphometry. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 1998 ; 114 : 404-13.
89. Ferrario VF, Sforza C, Poggio CE, Serrao G. Facial three-dimensional morphometry. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 1996 ; 109 : 86-93.
90. Ferrario VF, Sforza C, Serrao G, Ciusa V, Dellavia C. Growth and aging of facial soft tissues: A computerized three-dimensional mesh diagram analysis. Clin Anat N Y N. 2003 ; 16 : 420-33.
91. Terajima M, Furuichi Y, Aoki Y, Goto TK, Tokumori K, Nakasima A. A 3-dimensional method for analyzing facial soft-tissue morphology of patients with jaw deformities. Am J Orthod Dentofac Orthop. 2009 ; 135 : 715-22.
92. Moulin P. L’apport de la troisième dimension dans la planification d’un traitement associant orthodontie et chirurgie orthognathique. Thèse d'odontologie. Université de Strasbourg ; 2017, 109p.

93. GeoGebra. Licence [En ligne]. https://www.geogebra.org/license. Consulté en 2017.
94. Martin R. Lehrbuch der anthropologie. Gustav Fisch Verl Stuttg Bd. 1957 ; 1 : 311-321.

PHILIPPIDES (Nicolas) – Les analyses céphalométriques en réseau, état des lieux avant informatisation.
(Thèse : 3ème cycle Sci. Odontol. : Strasbourg : 2018 ; N°22).
N°43.22.18.22

Résumé : L'incidence radiographique de profil est utilisée de façon routinière en Orthopédie Dento-Faciale et constitue le support de nombreuses analyses céphalométriques. Cet examen complémentaire vient compléter l'examen clinique du patient et fournit une aide précieuse dans la définition de la position et des relations des organes dentaires, des bases osseuses et des tissus mous.
Ces analyses reposent sur la détermination de mesures tant angulaires que linéaires qui sont comparées aux moyennes d'un échantillon historique de référence dont l'effectif est le plus souvent réduit.
L'objectif de ce travail est de porter notre intérêt sur une autre forme d'analyse céphalométrique, d'un usage peu répandu en France : l'analyse en réseau. Il s'agit d'une analyse de proportions où les différents points céphalométriques remarquables vont s'inscrire dans une grille dont les lignes vont faire l'objet de déformations, illustrant ainsi le siège et le sens des dysmorphoses. Elle permet ainsi d'appréhender de façon extrêmement graphique le patient dans sa globalité. Son unique inconvénient réside dans sa réalisation manuelle chronophage. Les logiciels de gestion des cabinets d'orthodontie français n'incluent pas à ce jour d'outil informatique adapté à la réalisation de cette analyse. C'est pourquoi, nous posons les bases de l'informatisation d'une analyse en réseau, notamment par l'élaboration d'un cahier de charges spécifique.

Rubriques de classement : orthodontie

Mots clés MeSH : orthodontics ; cephalometrics ; imaging ; 3D ; cone beam computed tomography

Jury :

Président	:	Monsieur le Professeur MEYER Florent
Assesseurs	:	Monsieur le Docteur BOLENDER Yves
		Madame le Docteur GROS Catherine-Isabelle
		Madame le Docteur WAGNER Delphine
Membre invité	:	Monsieur le Docteur BONOMI-DUNOYER Hadrien

Coordonnées de l'auteur :

PHILIPPIDES Nicolas
4 rue Westercamp, 67000 Strasbourg
nicolas.philippides@gmail.com