Analyse cinématique de l'appareil manducateur humain : constitution d'une base de données de sujets asymptomatiques et comparaison avec sujets à dysfonction

Typhaine Koeppel

▶ **To cite this version:**

Typhaine Koeppel. Analyse cinématique de l'appareil manducateur humain : constitution d'une base de données de sujets asymptomatiques et comparaison avec sujets à dysfonction. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Université de Lorraine, 2017. Français. NNT : 2017LORR0179 . tel-01778297

HAL Id: tel-01778297
https://theses.hal.science/tel-01778297

Submitted on 25 Apr 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

THÈSE

Pour l'obtention du titre de :

DOCTEUR de L'UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Spécialité : Science des matériaux

Présentée par :

Typhaine KOEPPEL

Analyse cinématique de l'appareil manducateur humain : constitution d'une base de données de sujets asymptomatiques et comparaison avec sujets à dysfonction

---

Thèse soutenue publiquement le 3 octobre 2017 à Metz devant le jury composé de :

Hélène PILLET	McF, HDR, Arts et Métiers ParisTech - Centre de Paris	Rapporteur
Narcisse ZWETYENGA	Professeur et Praticien hospitalier, CHU Dijon,	Rapporteur
Jean-François GANGHOFFER	Professeur, Université de Lorraine - ENSEM	Examinateur
Redha TAIAR	Professeur, Université de Reims Champagne Ardennes	Examinateur
Anne-Sophie BONNET	McF, HDR, Université de Lorraine - ENIM	Directrice de thèse
Emilie DE BROSSES	McF, Université de Lorraine	Co-directrice de thèse

LEM3 - Laboratoire d'Étude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux

Ecole doctorale EMMA- Energie Mécanique et Matériaux

Université de Lorraine

Remerciements

Tout d'abord je voudrais remercier Hélène Pillet, Maitre de conférences aux Arts et Métiers Paristech et Narcisse Zwetyenga Professeur et Praticien hospitalier au CHU de Dijon d'avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse et de me permettre d'atteindre cette version finale grâce à leurs remarques précieuses. Je tiens à remercier également les autres membres du jury : Jean-François Ganghoffer Professeur à l'Université de Lorraine et Redha Taiar Professeur à l'Université de Reims Champagne Ardennes, d'avoir accepté de juger ce travail.

Une thèse ne serait pas possible sans les encadrants, je tiens donc à remercier Anne-Sophie Bonnet et Emilie De Brosses pour les 4 années passées sous leur direction depuis mon stage de Master 2 et particulièrement pour leur aide, leurs conseils et leur sympathie. Merci d'avoir pris le temps de partager avec moi vos nombreuses connaissances en biomécanique.
Par ailleurs, je ne peux parler de mes directrices de thèse sans mentionner l'équipe de biomécanique dans son ensemble, que je remercie pour leur convivialité et pour ce bel esprit d'équipe qui les fait avancer.

Je tiens également à remercier Zitouni Azari, directeur du LaBPS pour m'avoir permis de réaliser cette thèse dans de bonnes conditions.

Je remercie la fondation des « Gueules Cassées » pour avoir financé une partie de ce travail.

Je remercie très chaleureusement l'ensemble des 66 volontaires qui ont donné de leur temps pour me permettre de réussir cette thèse. Je ne peux les nommer tous ici mais ils se reconnaitront. A tous je leur dis merci pour leur patience, leur sympathie, leur curiosité. C'est grâce à eux que tout a été possible.

Je tiens à remercier tous les membres du LaBPS et de l'ENIM que j'ai côtoyé durant cette thèse et en particulier je remercie Marilyne Stinger pour sa bonne humeur et son soutien sans faille. Tu as toujours les mots pour nous booster !

Je remercie tous les thésards et stagiaires du laboratoire qui m'ont accompagné durant ces nombreuses années. J'espère avoir su ou pu également vous aider dans les bons et les mauvais moments. Et en particulier je remercie Victor Creuillot et Ludovic Freund, pour tous nos échanges au quotidien, pour votre participation active à mon travail (et pas qu'une fois), pour les chansons insupportables (Diggy Diggy Hole), pour les bonbons, les tartes au sucre salées… merci pour tout ! Parallèlement je tiens à remercier Livia Forster Ribeiro et Imen Asma Mbarek pour la touche féminine parmi tous ces thésards (ça fait du bien). Enfin je souhaite une bonne continuation aux nouveaux venus : Foli et Lara et à ceux qui n'ont pas encore finalisé leur travail ! May the Force be with you !

Je remercie également les thésards messins et en particulier Cyril, Matthieu, Guillaume, avec qui j'ai partagé beaucoup scientifiquement mais surtout humainement. Merci d'avoir été présents. Dans ce même groupe, je remercie essentiellement Jasmine, pour son aide, son soutien, ses conseils, nos apitoiements et nos repas en tête à tête.

Enfin plus personnellement, je tiens à remercier tous les amis qui m'ont soutenu au quotidien. Elodie, Steph et leur future Quezac, Emilie, Chloé, Marminou, Julie et tous les autres qui se reconnaitront, merci à tous !

A ma famille, merci d'avoir été présents, disponibles et à l'écoute. Merci de m'avoir encouragé au quotidien, d'avoir su trouver les mots pour me motiver, me réconforter. Merci à cette famille formidable qui n'aurait pas pu mieux faire pour me permettre d'en arriver là.
A vous tous Elyse, Sylvain, Lindsay, Yves, Sheryl, Eléonore, Gauthier, Sylvie et Sylvain, Oncle Ben, les mamies et surtout mes parents. Merci du fond du cœur.
A Guy, qui clôture avec moi ces quatre années…
A mes grands-pères qui auraient été fiers de moi et qui auraient surement été les seuls dans la famille à comprendre ce travail dans son entièreté.
Et enfin, à toi, Jonathan. Merci pour ta présence, tes encouragements, ton soutien sans faille et ta patiente. Merci de m'avoir supporté, surtout sur les derniers moments, et d'avoir su « me mettre les coups de pieds au derrière » quand c'était nécessaire. Merci pour tes relectures et entrainements de soutenance. Merci d'avoir pris le temps de m'aider à finaliser tout ça. Et comme tu le dis si souvent : « on fait ce qu'on peut avec ce qu'on a », je pense que tu avais énormément pour moi. Merci d'avoir été là.

SOMMAIRE :

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 : L'appareil manducateur : études anatomique, clinique et cinématique 3

1. Anatomie descriptive de l'appareil manducateur 4
2. Les dysfonctions de l'appareil manducateur et leur diagnostic 9
3. Cinématique mandibulaire 13
   - 3.1. Etudes unidimensionnelles : amplitudes de mouvements 14
   - 3.2. Etudes bidimensionnelles : trajectoires de points mandibulaires 16
   - 3.3. Etudes tridimensionnelles : mobilités mandibulaires 24
4. Conclusion 33

CHAPITRE 2 : Précision du dispositif de mesure et répétabilité du protocole 35

1. Zebris CMS20 Jaw Motion Analyser 36
2. Etude de la précision système Zebris 37
   - 2.1. Conditions de réalisation de la mesure 39
   - 2.2. Précision dans le volume de mesure 42
3. Répétabilité du pointage des « points anatomiques » 50
   - 3.1. Etude sur mannequin 50
     - 3.1.1. Répétabilité du pointage par point anatomique et reproductibilité intra-opérateur sur un temps court 52
     - 3.1.2. Reproductibilité intra-opérateur sur un temps long 53
     - 3.1.3. Reproductibilité inter-opérateur 54
     - 3.1.4. Conclusion 54
   - 3.2. Etude sur l'humain 55
   - 3.3. Influence de l'empreinte sur le positionnement de la mandibule 58
     - 3.3.1. Répétabilité du pointage lorsque l'empreinte est collée sur les dents 59
     - 3.3.2. Différence de positionnement de la mandibule liée à la mise en place de l'empreinte dans la bouche 60
4. Conclusion 62

CHAPITRE 3 : Mise en place d'une méthode d'analyse de la cinématique mandibulaire . 63

1. Construction des repères anatomiques 64
2. Paramètres cinématiques étudiés 73
   - 2.1. Amplitudes des mouvements 73
   - 2.2. Vitesses naturelles d'exécution des mouvements 75
   - 2.3. Trajectoires condyliennes 75
   - 2.4. Mobilités de la mandibule par rapport au crâne 75
3. Mise en œuvre des mesures : description du protocole d'acquisition cinématique 80
   - 3.1. Questionnaire clinique 80
   - 3.2. Mesures anthropométriques 81
   - 3.3. Réalisation des acquisitions 82
4. Méthodologie de traitement des données 84
5. Conclusion 86

CHAPITRE 4 : Etude cinématique des sujets asymptomatiques 87

1. Recrutement des sujets 88
2. Etude anthropométrique 88
3. Etude cinématique 91
   - 3.1. Amplitudes de mouvement 91
   - 3.2. Vitesses de mouvement 93
   - 3.3. Trajectoires des points condyliens 95
   - 3.4. Mobilités 106
     - 3.4.1. Mouvement d'ouverture 107
     - 3.4.2. Mouvement de propulsion 114
     - 3.4.3. Mouvements latéraux 120
4. Conclusions 129

CHAPITRE 5 : Etude des sujets présentant des dysfonctions mineures 131

1. Les sujets atteints de dysfonctions mineures 132
2. Etude cinématique des cinq premiers sujets à dysfonctions 133
3. Sujets avec bruits articulaires 143
4. Discussion 154
5. Conclusions 155

CONCLUSION ET PERSPECTIVES 157

Références bibliographiques 161

TABLE DES FIGURES 168

TABLE DES TABLEAUX 173

ANNEXES : 175

Annexe 1 : Amplitudes maximales de mouvement 176

Annexe 2 : Trajectoires condyliennes 177

Annexe 3 : Mobilités mandibulaires – Etude de la main dominante 191

Annexe 4 : Mobilités mandibulaires – Etude de la classe d'occlusion 197

INTRODUCTION

L'appareil manducateur est un système particulier et complexe. Une diversité de tâches précises, comme mâcher, parler ou déglutir, dépend de son bon fonctionnement. La cinématique de l'appareil manducateur, et plus précisément de la mandibule (mâchoire inférieure), est liée de manière indissociable à la fonction de l'articulation temporo-mandibulaire (ATM), dont le dysfonctionnement peut directement nuire aux fonctions naturelles de ce système. L'articulation temporo-mandibulaire est l'une des articulations les plus complexes du corps humain. En plus de ses six degrés de liberté, de sa géométrie particulière par la présence d'un disque fibreux mobile par rapport aux structures osseuses et de sa position directement contrainte par les dents, c'est la seule articulation du corps humain à travailler en simultané à gauche et à droite. Les mouvements de l'appareil manducateur s'effectuent, de plus, sous l'action de nombreux muscles de la face et de différents tissus de soutien (ligaments, tendons…). La complexité de cette articulation temporo-mandibulaire et du système manducateur dans son ensemble entraine une pluralité des dysfonctionnements, que ce soit par leurs origines ou encore par leurs symptômes. Environ un quart de la population mondiale est touchée par ces dysfonctions, mais une prise en charge n'est effectuée que dans 5 à 12% de ces cas. La question de l'amélioration du diagnostic se pose alors de manière incontournable afin d'améliorer la prise en charge des patients.

A l'heure actuelle, le diagnostic s'effectue par l'intermédiaire de questionnaires, pouvant être accompagnés d'acquisition d'imagerie médicale, et permettant une détection plus ou moins précise des dysfonctions. En effet, les méthodes actuelles ne permettent pas l'évaluation tridimensionnelle (3D) complète et précise du mouvement de l'ATM, qui revêt pourtant une importance capitale dans l'analyse clinique des fonctions de l'appareil manducateur. L'étude cinématique de la mâchoire peut être effectuée en utilisant des systèmes non invasifs d'acquisition 3D du mouvement. Les premières recherches dans ce domaine ont analysé le mouvement d'un seul point mandibulaire facile à localiser, généralement le point interincisif mandibulaire, qui a été utilisé pour calculer l'amplitude maximale d'ouverture de la bouche. Cependant, la trajectoire de ce point interincisif ne permet pas de fournir suffisamment

d'informations sur la fonction articulaire. Les trajectoires des points condyliens ont alors été étudiées afin de comprendre le fonctionnement localisé de l'ATM. Cependant, l'analyse du mouvement d'un point condylien est plus complexe, car la présence des tissus mous autour de l'articulation empêche l'enregistrement direct de ses trajectoires.
C'est pourquoi, plus récemment, c'est l'analyse des mouvements de la mandibule en tant que solide rigide par rapport au crâne qui s'est avérée la plus pertinente pour déterminer les mobilités de la mandibule dans les trois directions de l'espace. Cependant, contrairement à d'autres articulations du corps humain, il n'existe pas de standard pour l'étude de l'articulation temporo-mandibulaire. A l'heure actuelle, peu d'études sont effectuées sur l'analyse des mobilités de cette articulation. De plus, ces études ne concernent que le mouvement d'ouverture maximale et les résultats présentés se limitent aux valeurs des mobilités à un instant donné du mouvement et non sur toute la durée de celui-ci.

Ainsi, l'objectif principal de cette thèse est d'effectuer une étude des mobilités 3D de la mandibule pour différents mouvements de la bouche et de quantifier ces mobilités tout au long des mouvements, avec comme enjeu principal, la création d'un outil de quantification robuste qui pourrait être utilisé dans le cadre du diagnostic ou du suivi de patient.

Pour cela, nous décrirons dans un premier chapitre, l'anatomie du système manducateur, ainsi que ses nombreuses dysfonctions et leurs prises en charge. Ce premier chapitre sera également consacré à la bibliographie sur l'étude cinématique mandibulaire afin d'en comprendre les limites. Le chapitre 2 traitera de la description du système d'analyse du mouvement utilisé dans notre travail ainsi que de l'évaluation de sa précision et de la répétabilité de notre protocole. Le chapitre 3 présentera ensuite la méthodologie de l'analyse du mouvement appliquée à notre étude de la mandibule, afin de calculer les rotations et translations de la mandibule par rapport au crâne à chaque instant pour les mouvements considérés. Ce chapitre présentera également les autres paramètres cinématiques importants à quantifier pour l'étude des mouvements mandibulaires. Le chapitre 4 sera donc tout naturellement consacré à la présentation des résultats de ces paramètres cinématiques et mobilités lors des différents mouvements, pour l'ensemble de notre base de données de référence constituée de sujets asymptomatiques. Le chapitre 5 permettra ensuite une comparaison de sujets à dysfonctions mineures avec cette base de données de référence. Nous pourrons alors discuter de la possibilité d'utilisation de l'analyse cinématique 3D en tant qu'aide au diagnostic clinique.

CHAPITRE 1 :
L'appareil manducateur : études anatomique, clinique et cinématique

L'appareil manducateur est par définition l'ensemble des organes servant à manger. Il est composé du crâne et de la mandibule, liés entre eux par les articulations temporo-mandibulaires, des dents et de leurs tissus de soutien, et des muscles de la face, l'ensemble étant coordonné par le système neurosensoriel. L'appareil manducateur est un appareil essentiel aux fonctions humaines, en contribuant non seulement à l'alimentation (boire et manger) mais également à la fonction sociale (parler). Ce chapitre décrit tout d'abord l'anatomie de l'appareil manducateur, puis les études cliniques menées pour comprendre les dysfonctions qu'il peut présenter et leur diagnostic. Enfin, nous nous intéressons aux études fonctionnelles qui ont été réalisées, et plus particulièrement à celles qui analysent la cinématique mandibulaire.

1. Anatomie descriptive de l'appareil manducateur

Les trois plans de référence utilisés en anatomie sont décrits de la manière suivante (Figure 1) : le plan frontal de normale X postéro-antérieure (d'arrière en avant), le plan sagittal de normale Z médiale-latérale (de l'intérieur vers l'extérieur du corps) et enfin le plan transversal de normale Y inféro-supérieure (du bas vers le haut).

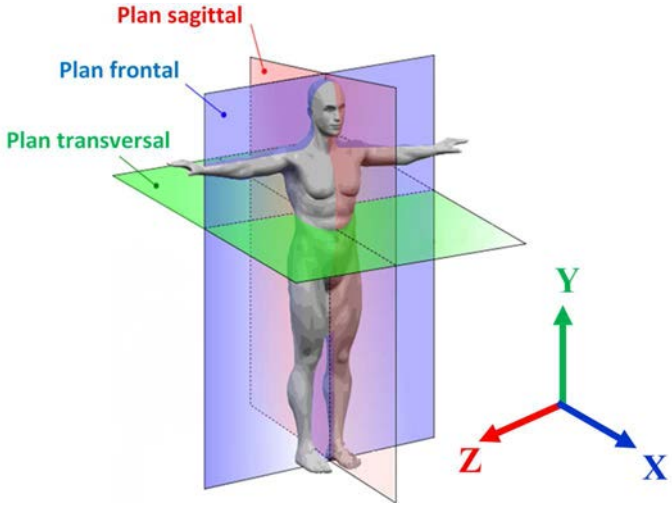


Figure 1 : Plans anatomiques de référence [1]

L'appareil manducateur est composé des structures osseuses crâne et mâchoire inférieure (ou mandibule) reliées par les deux articulations temporo-mandibulaires, de différents tissus mous (ligaments, muscles, nerfs, vaisseaux sanguins…) et des dents.

Les structures osseuses qui composent les articulations temporo-mandibulaires (ATM) sont l'os temporal et la mandibule (Figure 2).

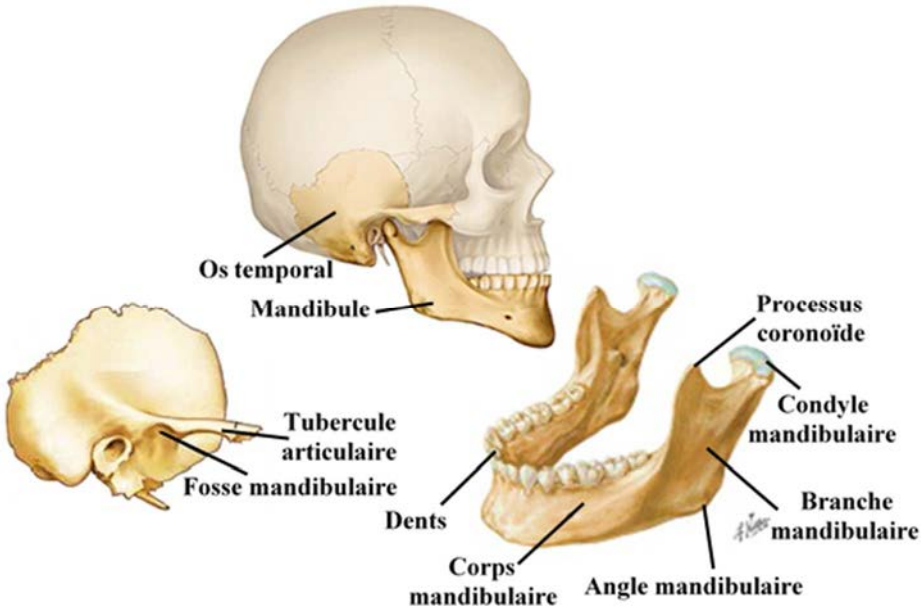


Figure 2 : Os temporal [2] **et mandibule** [3]

L'os temporal est l'os le plus volumineux du crâne, situé dans la région de la tempe sur la partie latérale du crâne. La mandibule est le seul os mobile de la face. Elle est constituée d'un corps qui supporte les dents et de deux branches montant vers le crâne (Figure 2). La jonction de ces deux parties forme l'angle mandibulaire [4]. Chaque branche est pourvue d'un processus coronoïde sur sa partie avant, permettant l'insertion de muscles, et d'un condyle sur sa partie supérieure. Pour l'os temporal, la surface articulaire est composée de la fosse mandibulaire concave, suivie en avant du tubercule articulaire convexe. Pour la mandibule, la surface articulaire est le condyle mandibulaire qui présente une géométrie proche d'un ellipsoïde [5].

L'articulation temporo-mandibulaire (ATM) se distingue des autres articulations du corps par l'action simultanée de l'ATM droite et de l'ATM gauche pour chaque mouvement de la bouche. C'est la seule articulation de la face permettant une large mobilité relative des structures osseuses avec six degrés de liberté autorisés [6, 7]. Enfin, l'ATM a la particularité d'inclure un disque articulaire, coiffant le condyle mandibulaire, qui est mobile à la fois par rapport à la fosse temporale mais aussi par rapport au condyle (Figure 3).

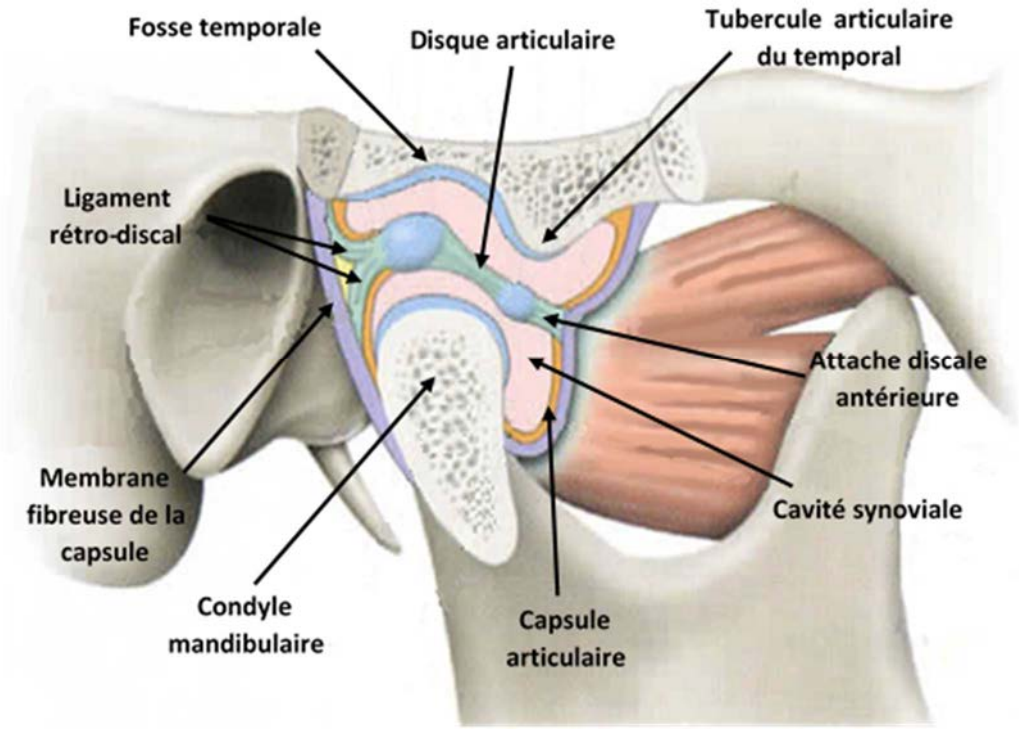


Figure 3 : Anatomie descriptive de l'articulation temporo-mandibulaire : vue sagittale [8]

Le disque articulaire est un fibrocartilage de forme biconcave positionné entre la fosse temporale et le condyle mandibulaire [9], créant ainsi deux parties dans l'articulation : une partie basse appelée compartiment condylo-discal et une partie supérieure appelée compartiment temporo-discal.

Ce disque est par ailleurs relié aux structures osseuses par différentes attaches. Avec le condyle mandibulaire, il a des attaches médiales-latérales qui empêchent le glissement du disque sur le condyle et des attaches antérieures plus lâches. Les mobilités postéro-antérieures du disque sont limitées par le ligament rétro-discal, qui relie le disque à l'os temporal et qui agit comme un ressort de rappel du disque. De plus, ces mobilités sont également limitées par l'attache discale antérieure, liée au tendon du faisceau supérieur du muscle ptérygoïdien latéral [10].

Les deux compartiments de l'articulation sont tapissés d'une membrane synoviale composée de tissu conjonctif fortement vascularisé permettant la lubrification de l'articulation.
L'ensemble de ces composants est englobé par une capsule articulaire fibreuse, renforcée par la présence de ligaments et jouant le rôle de protection contre les contraintes extérieures [11].
Les composants mobiles de cette articulation (mandibule et disque) sont mis en mouvement sous l'action de nombreux muscles de la face [5]. Le plus sollicité est le muscle ptérygoidien latéral activé pendant tous les mouvements mandibulaires (élévation, abaissement, propulsion,…) (Figure 4). Les autres muscles sont classés en deux familles distinctes : les muscles élévateurs de la mandibule (muscle temporal, muscle masseter et muscle ptérygoïdien médial) et les muscles abaisseurs de la mandibule (muscle mylo-hyoïdien, muscle génio-hyoïdien et muscle digastrique).

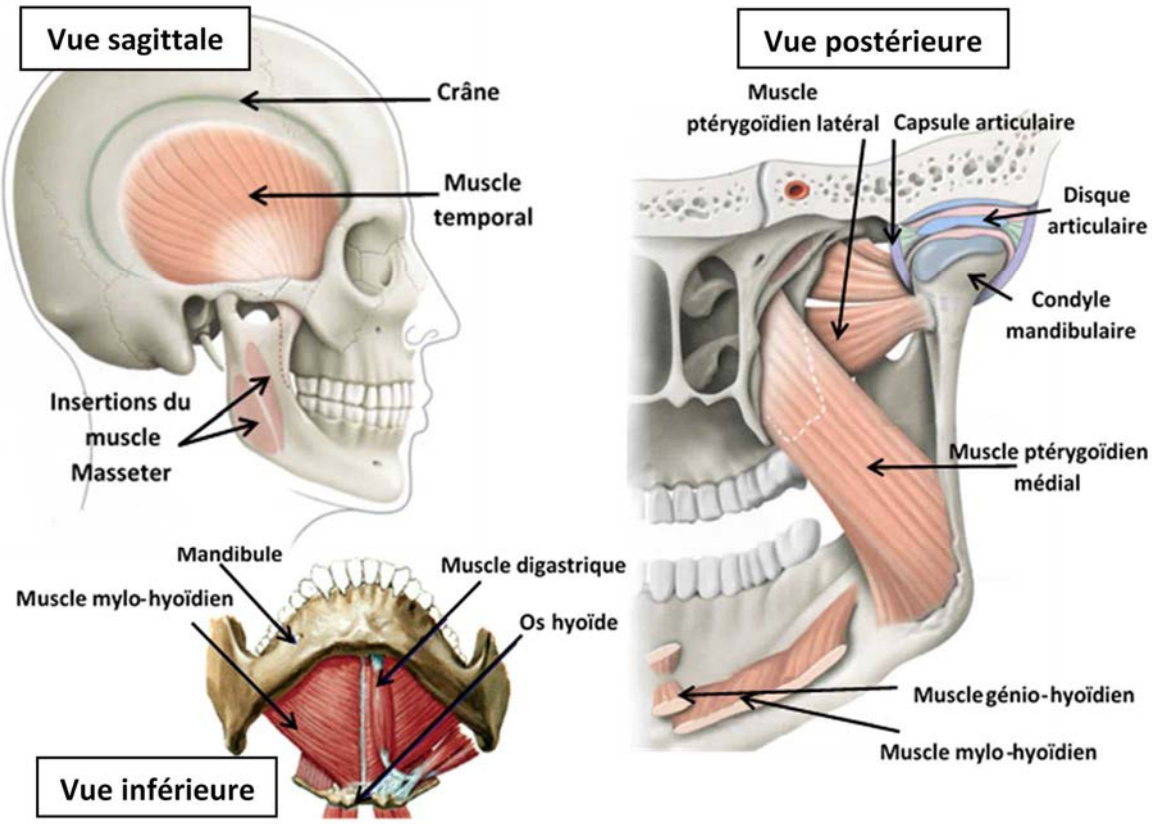


Figure 4 : Muscles de l'appareil manducateur, vue sagittale & postérieure [8]**, vue inférieure** [3]

Enfin, les dents jouent également un rôle essentiel dans le comportement global de l'appareil manducateur. Elles permettent la création du bol alimentaire mais elles ont également une influence dans la prononciation des sons et l'esthétique du visage. Une dentition adulte est composée de 32 dents. Chaque arcade dentaire (maxillaire et mandibulaire) est composée de 16 dents : 4 incisives, 2 canines, 4 prémolaires et 6 molaires. Les dents sont numérotées de façon précise pour permettre une bonne communication entre praticiens. La numérotation s'effectue selon quatre quadrants (Figure 5). La dernière molaire de chaque quadrant est une dent de sagesse. Les incisives servent à couper les aliments, les canines à déchiqueter, alors que les prémolaires et les molaires servent à broyer.

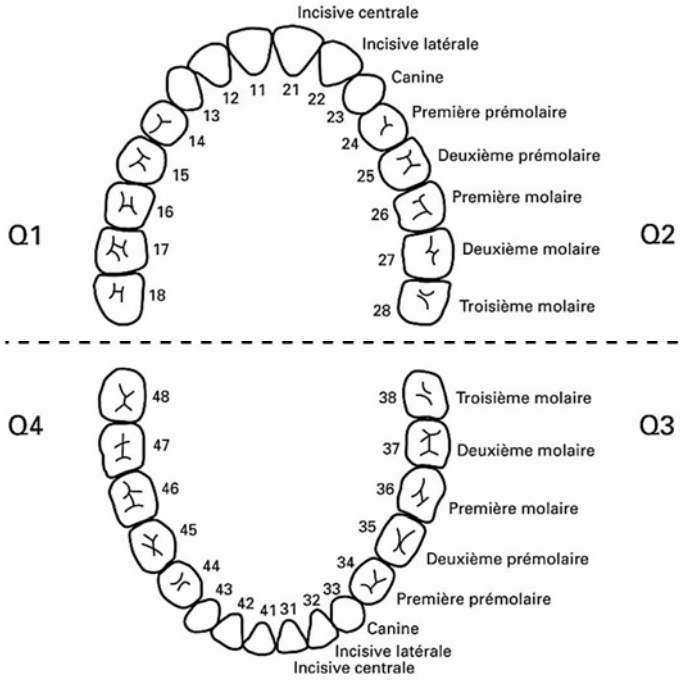


Figure 5 : Numérotation des dents adultes[12]

Le contact entre les dents du maxillaire et les dents de la mandibule est appelé occlusion dentaire. Il existe trois classes d'occlusion, déterminées par la position de la première molaire supérieure par rapport à la première molaire inférieure et de la canine supérieure par rapport à la canine inférieure (Figure 6 & Figure 7). Les classes d'occlusion sont définies indépendamment à gauche et à droite. Ainsi, une même personne peut avoir deux classes d'occlusion différentes.

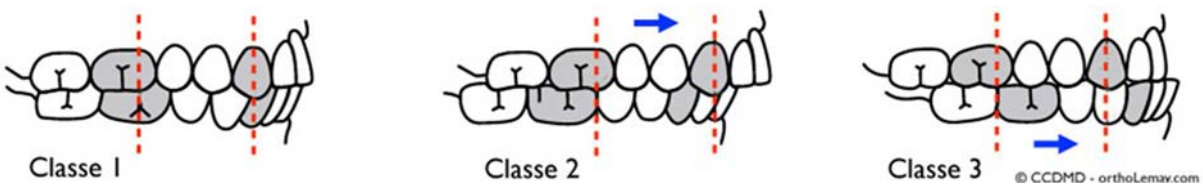


Figure 6 : Classes d'occlusion : aspect théorique[13]

Figure 7 : Classes d'occlusion : aspect pratique, photographies prises sur les sujets lors de notre protocole d'essai

Si la position dite « naturelle » de la mandibule dans la fosse temporale est entièrement définie par son occlusion dentaire [14–16], il existe par ailleurs d'autres positions du condyle dans la fosse [11, 14, 17, 18] du fait de la non congruence des surfaces articulaires, et de l'élasticité du disque articulaire (voir Figure 8) :

- La relation centrée. C'est la position la plus haute, la plus reculée, symétrique et non forcée des condyles mandibulaires au fond des fosses temporales. Selon le Collège National d'Occlusodontologie, elle est obtenue par « guidage mais non forcé » du praticien. Certains la considèrent comme une position idéale du condyle dans la fosse car elle est totalement indépendante de l'occlusion [7, 19].
- la position d'intercuspidie maximale (OIM) correspondant à la position de la mandibule pour obtenir un maximum de contacts entre les dents du maxillaire et de la mandibule [20]. C'est la position retrouvée pour la déglutition [21]. Elle correspond chez l'adulte à la position « naturelle » mais elle peut être différente en cas de dysfonction.
- La position dite « thérapeutique ». C'est le praticien qui la définit afin de soulager les dysfonctions lorsqu'elles existent [22].

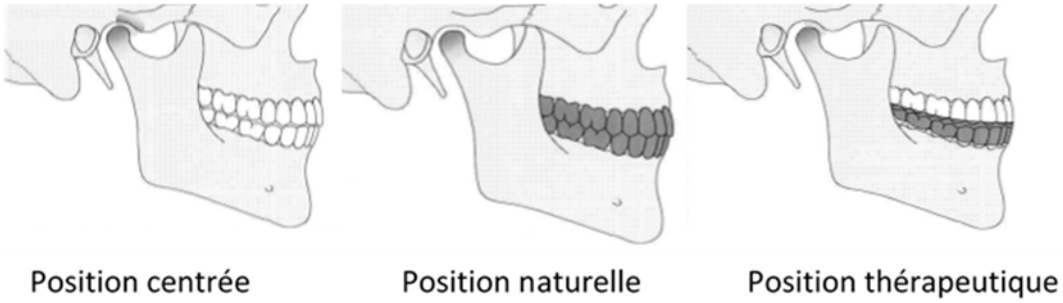


Figure 8 : Les positions du condyle dans la fosse [19]

Tous les acteurs de l'appareil manducateur agissent donc en simultané et s'auto-influencent. Il apparaît donc évident qu'un dysfonctionnement de l'un de ses éléments puisse perturber considérablement le fonctionnement global de l'ensemble. Le paragraphe suivant traite des dysfonctions de l'appareil manducateur et leur classification, et expose les moyens actuels de diagnostic.

2. Les dysfonctions de l'appareil manducateur et leur diagnostic

Le NIDCR (National Institute of Dental and Craniofacial Research) estime qu'entre 5 et 12% de la population mondiale présente au moins une dysfonction de l'appareil manducateur (DAM) [23], avec une proportion plus importante pour les femmes (environ 2 femmes pour 1 homme) et pour la tranche d'âge 15-45 ans [14, 24–27]. La diversité des DAM peut expliquer cette prévalence dans la population.

Selon l'American Academy of Occlusal Pain (AAOP)[26], les DAM sont séparées en deux familles : les dysfonctions musculaires et les dysfonctions articulaires (Tableau 1).

Tableau 1 : Classification des DAM selon l'AAOP

DYSFONCTIONNEMENTS ARTICULAIRES	DYSFONCTIONNEMENTS MUSCULAIRES
ARTICULATION DOULOUREUSE	**DOULEUR MUSCULAIRE LIMITEE A LA REGION OROFACIALE**
☞ Arthralgie ☞ Arthrite	☞ Myalgie • Myalgie locale • Douleurs myofaciales avec irradiations • Douleurs myofaciales référées ☞ Tendinites ☞ Spasmes (aigu) ☞ Myosite • Non infectieuse • Infectieuse
TROUBLES ARTICULAIRES	**CONTRACTURE (AIGÜE)**
☞ Trouble du complexe condylo-discal • REDUCTIBLE (partielle ou totale) • IRREDUCTIBLE (avec ou sans limitation de l'ouverture buccale) ☞ Autres causes d'hypomobilité : • Adhésions / Adhérences • Ankylose fibreuses • Ankyloses osseuses ☞ hypermobilité : • Subluxations • Luxations (fermée, récidivante ou hyperlaxité ligamentaire)	**HYPERTROPHIE**
	NEOPLASIE
PATHOLOGIES ARTICULAIRES	☞ Des maxillaires : Malin/Bénin ☞ Des tissus mous de la tête et du cou : Malin/Bénin
☞ Pathologies articulaires dégénératives • Ostéoarthrose • Ostéoarthrite ☞ Résorption condylienne idiopathique ☞ Ostéochondrite disséquante ☞ Ostéonécrose ☞ Arthrite systémique (rhumatoïde) ☞ Néoplasie : Malin/Bénin	**TROUBLES DE LA MOBILITE** ☞ Dyskinésie orofaciale • Mouvements involontaires anormaux • Ataxie non spécifique subaigüe, due aux drogues • Dyskinésie orale tardive ☞ Dystonie oromandibulaire • Aigüe, due aux drogues • Déformante, familiale, idiopathique, dystonie de torsion
FRACTURES	**DOULEUR DES MUSCLES MASTICATEURS DUE A DES DESORDRES SYSTEMIQUES**
☞ Fracture fermée du condyle ☞ Fracture fermée sous-condylienne ☞ Fracture ouverte du condyle ☞ Fracture ouverte sous-condylienne	Fibromyalgie Myalgie d'origine centrale
TROUBLES CONGENITAUX	**CEPHALEE ATTRIBUEES AUX DAM**
☞ Aplasie ☞ Hypoplasie Hyperplasie	**STRUCTURES ASSOCIEES** ☞ Hyperplasie du processus coronoïde

Les dysfonctionnements musculaires sont les plus rencontrés en cliniques. Ils entrainent généralement des douleurs et une perturbation de la cinématique mandibulaire. Nous trouvons notamment dans cette catégorie l'ensemble des inflammations des muscles ou tendons (tendinite), ainsi que les contractures ou les problèmes de croissance (hypertrophie, néoplasie), mais également les troubles de la mobilité (dyskinésie, dystonie). Environ 50% des patients présentent à la fois des dysfonctions musculaires et des dysfonctions articulaires [26].

Les dysfonctions articulaires regroupent les douleurs articulaires de type inflammatoire, les troubles articulaires d'origine discale ou osseuse, les pathologies articulaires dégénératives ou inflammatoires, les traumatismes de l'articulation (fractures) et les malformations congénitales. Parmi les dysfonctionnements articulaires, les troubles du complexe condylo-discal sont les plus fréquents. Ces luxations se décomposent en deux groupes [28] :

- Les luxations avec réduction (Figure 9) : le disque se place en avant du condyle par rapport à sa position habituelle. Cette luxation se réduit automatiquement lors de l'ouverture maximale, entrainant des claquements articulaires à l'ouverture et à la fermeture de la bouche.
- Les luxations sans réduction (Figure 9) : le disque se place également en avant du condyle par rapport à sa position habituelle, mais ne se réduit pas automatiquement lors de l'ouverture maximale, ce qui entraine une limitation plus ou moins importante de l'ouverture. Lorsque que cette limitation atteint les limites des valeurs normales, nous parlons alors de luxation sans réduction avec limitation de l'ouverture.

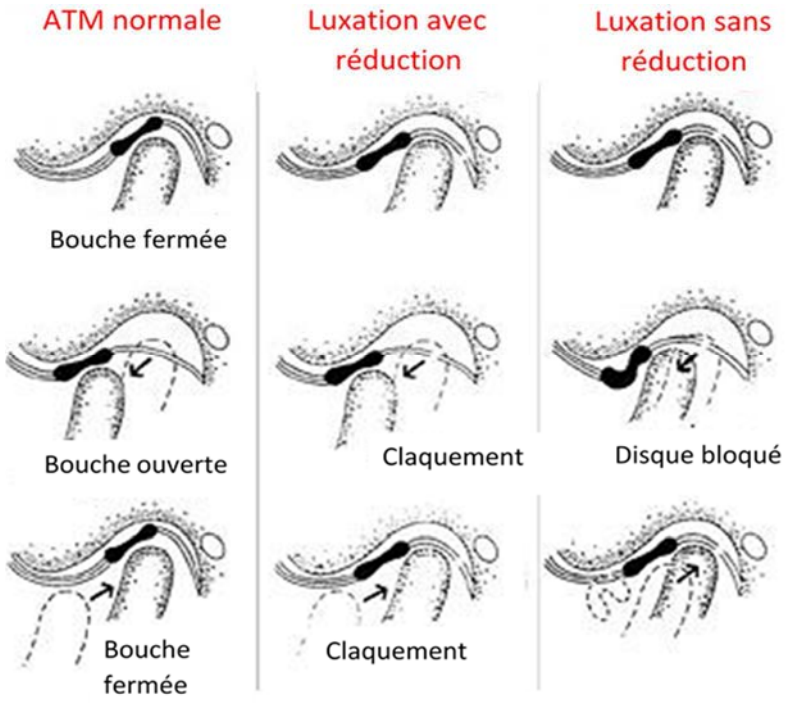


Figure 9 : Luxation condylo-discale, d'après [29]

La prise en charge des DAM n'est effectuée que dans environ 10% des cas [24, 30]. 59% des patients consultent pour des douleurs musculaires, 27% pour des déplacements du disque articulaire (22% réductibles et 5% irréductibles), 17% pour des douleurs articulaires, avec association possible des différents dysfonctionnements [31].

Par ailleurs, l'évolution de la dysfonction n'est pas obligatoirement délétère. En effet, des études ont pu montrer que des dysfonctions constatées pendant l'enfance « disparaissent spontanément » pendant la croissance, certainement la conséquence du changement de dentition [20]. Par ailleurs, certaines dysfonctions, considérées comme mineures, ne montreront pas d'évolution – c'est le cas par exemple de la luxation discale antérieure irréductible pour laquelle, en l'absence de prise en charge, l'évolution se fait spontanément vers une légère amélioration de l'amplitude de l'ouverture buccale – tandis que d'autres mèneront à des dysfonctions majeures, comme la luxation irréductible bilatérale qui évolue fréquemment en arthrose [20, 32].

Bien que la classification des DAM suive une logique liée à leur origine, de nombreuses études cliniques, quelle que soit l'approche utilisée, ont permis de remettre en question la responsabilité d'un facteur unique dans l'apparition de ces dysfonctions [24, 27, 33]. La théorie actuelle est multifactorielle, elle implique trois dimensions [34], une dimension biologique, une dimension structurelle et une dimension psychosociale. C'est la raison pour laquelle le diagnostic a évolué d'une évaluation purement fonctionnelle aux questionnaires de qualité de vie englobant les trois aspects.

Dans la littérature, plusieurs index d'évaluation des dysfonctions temporo-mandibulaires ont été proposés. L'index craniomandibulaire [35], l'index d'occlusion [36] ou encore l'index temporo-mandibulaire [37] permettent de repérer les signes de dysfonctions par l'intermédiaire de palpations et d'observations des mouvements de la bouche. L'index d'Helkimo prend en compte ces mêmes aspects fonctionnels, mais y ajoute des informations cliniques anamnestiques [38] pour avoir une vision plus globale des dysfonctions et de leurs effets [39]. L'évolution de ces index s'est effectuée en parallèle de la découverte des DAM. La diversité de ces dysfonctions entraine une diversité des méthodes de diagnostic. Parmi elles, nous retrouvons les différents index dont l'utilité a été prouvée dans la compréhension des dysfonctions et du diagnostic [40–42]. Cependant, certains aspects de ces index peuvent être discutés, par exemple, les « études d'amplitudes de mouvement » qui fixent des limites ne tenant pas compte du genre, ou de la morphologie du sujet. Or d'après les données de la littérature, ces paramètres influencent les amplitudes de mouvements de la bouche. En effet,

Kataoka et al.[43] indiquent que la morphologie faciale (taille, forme ou position de la mandibule…) influence ces amplitudes maximales. De même, pour Lewis et al.[44], il existe des différences significatives entre les hommes et les femmes pour les déplacements du point interincisif en ouverture.

Plus récemment, des questionnaires de qualité de vie ont été proposés pour tenir compte des effets des éventuelles limitations fonctionnelles sur le quotidien des patients. Malgré l'absence de normalisation pour le protocole de diagnostic, les différentes procédures suivent généralement une même ligne directrice. La méthode la plus reconnue, à l'heure actuelle sur le plan international, est le RDC/TMD pour Research Diagnostic Criteria for TemporoMandibular Disorders. Cet outil a été élaboré en 1992 par une communauté de chercheurs : the International RDC/TMD Consortium [23]. La dernière version de l'outil date de 2014 [30]. Dans l'attente de la version française définitive, certains auteurs donnent les étapes à suivre en se basant sur la version anglaise originale [31]. Afin de diagnostiquer convenablement les dysfonctions, un questionnaire est posé au patient. Constitué de 31 questions, la partie anamnestique est la plus importante afin de rechercher l'origine de la dysfonction. Viennent ensuite les examens cliniques avec une partie palpation et une partie d'observation de la cinématique mandibulaire. A partir de toutes ces données, deux axes sont étudiés :

- Axe I : diagnostic des dysfonctions temporo-mandibulaires
- Axe II : incapacité reliée à la douleur et au statut psychosocial

L'axe I repose sur des critères identifiant les anomalies structurelles et fonctionnelles, musculaires et articulaires. L'axe II a pour objectif d'en évaluer la sévérité, notamment par une quantification de la douleur, et l'impact sur le quotidien du patient, d'un point de vue physique et psychologique. Les résultats sont ensuite traités à partir d'organigrammes (arbres de décision) afin de donner le diagnostic le plus adapté au DAM détecté.

Des examens dits « complémentaires », tels que l'imagerie médicale peuvent compléter cette approche. La radiographie et tomographie permettent de visualiser les structures osseuses afin de dépister les malformations, ainsi que les traumatismes, ou encore les anomalies de croissance ou de dégénérescence. L'observation des tissus mous (disques, ligaments, muscles) est obtenue par IRM afin de dépister les inflammations ou les destructions des tissus. Son utilité est particulièrement prouvée dans le cas de luxation discale [45]. Cependant, le recours à l'imagerie n'est pas systématique compte tenu de l'irradiation subie pour la radiographie ou tomographie, ou des coûts et de la difficulté d'accès pour l'IRM. D'un point de vue fonctionnel, les

acquisitions sont effectuées en position allongée et en statique (ou quasi-statique), ce qui ne correspond pas obligatoirement à une situation représentative de la dysfonction du patient.
Afin d'évaluer les atteintes fonctionnelles en continu et en situation courante, une analyse de la cinématique mandibulaire peut être un complément pertinent pour quantifier la sévérité de la dysfonction, voire contribuer à son identification. Le paragraphe suivant présente la cinématique mandibulaire et les moyens qui ont été proposés pour la mesurer.

3. Cinématique mandibulaire

Posselt, dans les années 50, fut le premier à travailler sur l'enregistrement des mouvements de la mandibule [46]. Depuis cette date, nombre d'études ont été réalisées afin de donner une description générale des mouvements mandibulaires, particulièrement durant la mastication [47–60].
En effet, la compréhension du fonctionnement de l'appareil manducateur pendant la mastication présente un intérêt majeur pour la détection de dysfonctionnement, car la plupart des dysfonctions, même légères, sont amplifiées durant cet exercice [60]. Son analyse permet, de plus, d'apprécier l'état des muscles et des articulations. Cependant, à cause du caractère individu-dépendant des schémas de mastication, de la densité d'informations recueillies pour un seul mouvement, et des nombreux acteurs impliqués dans le mouvement, l'interprétation des résultats fournis par son analyse reste encore aujourd'hui très difficile [50, 55].
C'est pourquoi, beaucoup d'études se sont, dans un premier temps, focalisées sur des mouvements plus élémentaires : l'ouverture-fermeture, la propulsion et les mouvements latéraux, qui sont par ailleurs observés, seuls ou combinés, pendant la mastication.

De nombreux travaux effectués sur l'analyse cinématique mandibulaire lors de ces mouvements élémentaires sont des analyses 1D ou 2D. Elles se font principalement par l'étude des amplitudes maximales de mouvement et des trajectoires planes de points caractéristiques de la mandibule.

3.1. Etudes unidimensionnelles : amplitudes de mouvements

Les amplitudes maximales correspondent généralement à la distance séparant le point interincisif dans sa position initiale de sa position au moment où le mouvement est à son maximum. Elles donnent une appréciation de la capacité de mouvement de chaque personne. Le Tableau 2 présente les résultats des amplitudes maximales des mouvements élémentaires pour différentes études.

Tableau 2 : Etudes d'amplitudes : référence, pays des mesures, population asymptomatique étudiée, mouvement étudié et amplitude maximales (moyenne ±1écart-type)

Référence	Pays	Population (moy d'âge)	Mouvement étudié	Résultats (mm)
Reicheneder et al.[61]	Allemagne	31 sujets de 18 à 44 ans (32.5)	Ouverture	56.9±4.3
Coutant et al.[62]	France	32 sujets	Ouverture	43.17±8.55
Celic et al.[63]	Croatie	90 sujets (21.3)	Ouverture	49.89±5.27
			Propulsion	6.16±1.90
			Latéralité à droite	8.36±2.46
			Latéralité à gauche	8.34±2.49
Reicheneder et al.[64]	Allemagne	67 sujets de 18 à 44ans (29.2)	Latéralité à droite	12.2±1.7
			Latéralité à gauche	11.7±2.08
Voiner et al.[65]	USA	13 sujets de 34 à 46ans (38)	Ouverture	49.6±5.3
			Propulsion	6.7±2.1
			Latéralité à droite	8.9±2.6
			Latéralité à gauche	8.1±2.4
Mazzeto et al.[66]	Brésil	30 sujets	Ouverture	52.63±6.29
			Propulsion	7.46±1.07
			Latéralité à droite	8.19±2.67
			Latéralité à gauche	8.09±2.52
Talwar et al.[67]	USA	22 sujets de 18 à 42ans (28.4)	Ouverture	35.4±3.3
			Propulsion	7.9±1.3
			Latéralité à droite	10.5±2.6
			Latéralité à gauche	9.8±3.9
Best et al.[68]	Allemagne	30 sujets (15 hommes et 15 femmes) entre 19 et 45ans (28.1)	Ouverture	47.20±6.04
			Propulsion	5.93±1.66
			Latéralité à droite	10.43±2.33
			Latéralité à gauche	9.53±2.21

Les populations étudiées pour les différents mouvements sont très diversifiées, que ce soit par la nationalité : USA [65, 67] …, Brésil [66], Europe [61–64, 68]…, que par l'âge des sujets avec des moyennes allant de 21.3 ans [63] à 38 ans [65]. Le mouvement d'ouverture est le mouvement le plus étudié. En effet c'est le mouvement le plus simple à mettre en œuvre alors que les mouvements de propulsion et de latéralité sont des mouvements moins naturels.

Pour ce mouvement d'ouverture, les résultats varient de 35.4±3.3mm [67] pour une étude sur 22 sujets avec une moyenne d'âge de 28.4 ans, à 56.9±4.3mm [61] pour une étude sur 31 sujets avec une moyenne d'âge de 32.5 ans. La majorité des autres études montrent des résultats autour de 50mm pour l'amplitude maximale d'ouverture : 49.89±5.27mm [63], 49.6±5.3mm [65],

52.63±6.29mm [66]. Concernant la propulsion, les valeurs maximales d'amplitude se situent autour de 7.5mm (6.7±2.1mm[65], 7.46±1.07mm [66]).
Pour les études des mouvements latéraux, les valeurs entre les deux côtés sont semblables. Certaines études montrent des valeurs autour de 10mm [67, 68] alors que d'autres présentent des résultats autour de 8mm[63, 65, 66] ou proches de 12mm [64].

La diversité des résultats présentés dans ce tableau s'explique donc en partie par les différences de population étudiées (nombre de sujets, âges, …) mais également par les différents systèmes et méthodes de calcul utilisés. En effet les résultats présentés ici sont, soit issus de mesures directes sur patient par des systèmes simples tels que la règle ou le pied à coulisse [63, 68], soit issus d'acquisition par des systèmes de mesure plus élaborés permettant des mesures de trajectoires 2D [67] ou 3D [61, 62]... Les valeurs communiquées sont alors le résultat de l'observation des variations de position du point étudié soit par l'étude de l'évolution d'une coordonnée, soit par le calcul de norme, qui ne donne alors pas les mêmes résultats.

L'ensemble de ces études d'amplitude permet donc une première approche des mouvements mandibulaires. Cependant, leur caractère unidimensionnel et statique ne permet pas la compréhension des mécanismes complexes intervenant dans ces mouvements élémentaires. C'est pourquoi d'autres paramètres sont étudiés : les trajectoires de points caractéristiques de la mandibule : points condyliens et point interincisif.

3.2. Etudes bidimensionnelles : trajectoires de points mandibulaires

Les trajectoires du point interincisif ont initialement été étudiées par l'intermédiaire du diagramme de Posselt. C'est en 1952, que Posselt a décrit une méthode graphique enveloppant tous les mouvements limites de la mandibule par visualisation des tracés du point interincisif dans le plan sagittal [33, 69]. L'enveloppe est créée à partir des déplacements extrêmes du point interincisif [70] (Figure 10).

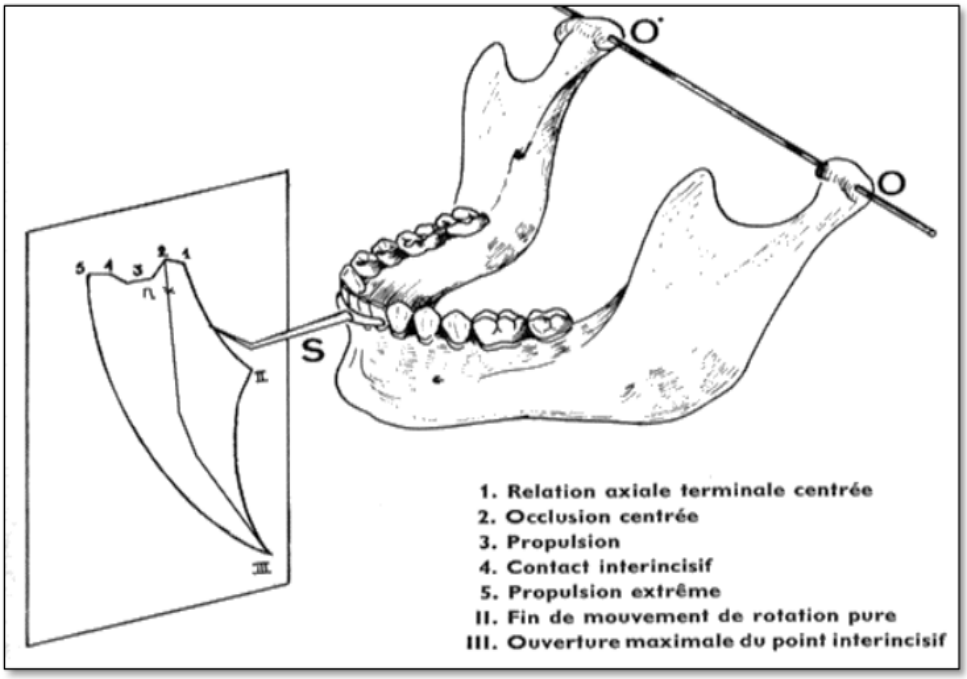


Figure 10 : Diagramme de Posselt et description des mouvements limites [71]

Les mouvements limites du point interincisif sont utilisés pour apprécier le fonctionnement mandibulaire.

Afin d'observer les trajectoires de points plus proches de l'articulation temporo-mandibulaire, le principe précédent a été complété : c'est l'axiographie. Proposé comme examen complémentaire aux index présentés précédemment, elle permet d'évaluer les atteintes fonctionnelles en continu et en situation courante. Dans le cas de l'axiographie mécanique, la technique consiste à rendre solidaire de la mandibule un dispositif rigide muni d'un stylet au niveau de points condyliens (Figure 11) puis à tracer la trajectoire de ces points sur du papier millimétré aligné selon un plan sagittal pendant des mouvements élémentaires de la bouche.

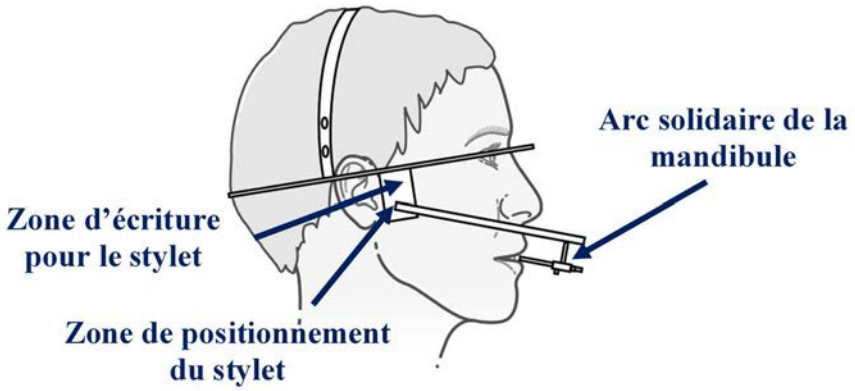


Figure 11 : Principe de l'axiographie [20] **: tracé des trajectoires condyliennes lors de mouvements mandibulaires**

Les premiers axiographes mécaniques permettent l'acquisition des trajectoires condyliennes dans le plan sagittal pour le mouvement d'ouverture ou de propulsion. Les axiographes électroniques, plus récents, permettent quant à eux l'acquisition des trajectoires dans les trois plans anatomiques, et donc l'étude des différents mouvements élémentaires [72]. Les données issues de ces mesures, sont essentiellement utilisées pour la détection des dysfonctionnements temporo-mandibulaires. [60, 73, 74]. En effet, des tracés de référence ont été définis pour chaque mouvement élémentaire de la mandibule [20] et n'importe quelle irrégularité de ces tracés axiographiques peut révéler un dysfonctionnement [75, 76].

Les études utilisant l'axiographie, mécanique ou électronique, sont nombreuses. L'objectif le plus courant de ces études est la comparaison de tracés de sujets asymptomatiques à des tracés de sujets à dysfonctions [36, 77, 78]. Certaines études tentent de comprendre le lien entre l'occlusion, qui guide les mouvement enregistrés pendant l'axiographie, et les mouvements condyliens [79]. De plus, ces tracés sont également utilisés pour étudier le positionnement des points condyliens (et leur répétabilité) et celui de l'axe de rotation mandibulaire dit « axe charnière » [80–83].

Les principaux paramètres cinématiques quantifiés dans ces études de trajectoires des points condyliens ou interincisif sont les longueurs curvilignes ou linéaires des trajectoires. Les études s'effectuant par plan anatomique, les longueurs linéaires de trajectoire du point interincisif sont en fait représentatives des amplitudes maximales présentées précédemment.

Nous regroupons dans le tableau suivant les études effectuées sur des sujets asymptomatiques. La plupart des études quantifient à la fois les amplitudes maximales de mouvements présentées précédemment et les études des trajectoires de points caractéristiques de la mandibule. Certaines études donnent également des résultats sur l'analyse 3D que nous décrirons plus tard dans ce chapitre.

Tableau 3 : Récapitulatif des études cinématiques sur sujets asymptomatiques

Réf	Objectifs de l'étude	Population	Mouvement	Paramètres cinématiques et résultats significatifs	Conclusion
Reicheneder et al[84]	Décrire les mouvements asymptomatiques et vérifier les liens avec le genre, le poids et le faciès	20 hommes et 20 femmes de 18 à 34.7ans 48 garçons et 44 filles de 7.2 à 10.6ans Allemagne	Ouverture	Amplitude maximale (mm) : Garçons : 47.72±6.4 / Filles : 45.65±6.9 Hommes : 52.15±7.5 / Femmes : 54.91±6.1	Les enfants présentent des valeurs inférieures aux adultes. Pas de relations significatives entre cinématiques des condyles et genre, poids ou faciès. Faibles associations entre latéralité à droite et le genre.
			Latéralité gauche	Amplitude maximale (mm) : Garçons : 9.62± 2.01 / Filles : 9.68± 2.5 Hommes : 9.31±2.4 / Femmes : 8.93±2.7	
			Latéralité droite	Amplitude maximale (mm) : Garçons : 9.36±2.48 / Filles : 9.91± 2.0 Hommes : 9.74± 2.3 / Femmes : 8.11±2.27	
			Posselt dans le plan sagittal	Angles d'inclinaison des condyles (°)	
Ferrario et al. [85]	Quantifier la part de rotation pour une ouverture maximale	12 hommes et 15 femmes de 19 à 30 ans Italie	Ouverture	Amplitude maximale du point interincisif (mm) : (En norme) Hommes : 55.68±5.39 / Femmes : 45.60±7.03 (En déplacement dans la direction inféro-supérieure) : Hommes : 50.93±5.39 / Femmes : 43.28±5.70 Angle d'ouverture (°) de la mandibule : Hommes : 34.46±1.13 / Femmes : 31.55±0.85 Pourcentage de Rotation (%) : Hommes : 76.86±4.20 / Femmes : 77.28±3.08	Les hommes présentent des amplitudes de mouvements du point interincisif plus importantes que les femmes. Le déplacement du point IP est corrélé à la rotation de la mandibule. La rotation est prédominante au cours du mouvement d'ouverture de la bouche.
Saitoh et al. [86]	Quantifier la relation entre la trajectoire du point incisif et celle des condyles chez les enfants lors de la propulsion	20 enfants d'âge moyen 5.5ans 25 femmes d'âge moyen 20.4ans Japon	Propulsion	Distance curviligne (mm) : Enfants : 9.61±0.36 (IP)/8.96±0.38(CD)/9.12±0.42(CG) Adultes : 10.46±0.45(IP)/10.34±0.42(CD)/10.25±0.53(CG) Distance linéaire (mm) : Enfants :6.99±0.25(IP)/6.85±0.25(CD)/6.97±0.26(CG) Adultes : 7.61±0.3(IP)/7.66±0.29(CD)/7.44±0.31(CG)	Corrélation significative entre les distances linéaires du point interincisif et des condyles et le déplacement postéro-antérieur de ces points. Les enfants montrent des déplacements inféro-supérieur des points condyliens et interincisif plus petits que les adultes.
Lewis et al. [44]	Etudier l'influence du genre sur la cinématique mandibulaire	29 hommes de 23 à 39ans 27 femmes de 23 à 35ans USA	Ouverture	Angle d'ouverture (°) : Hommes : 37.53±1.56 / Femmes :31.44±1.14 Distance curviligne (mm) : Point interincisif : Hommes : 54.75±1.25 / Femmes : 48.07±1.13 Condyle droit : Hommes : 20.70±1.58 / Femmes : 16.16±1.38 Condyle gauche : Hommes : 20.54±1.71 / Femmes : 17.92±1.55	Différences significatives entre hommes et femmes.
Mapelli et al.[87]	Quantifier la part de rotation pour une ouverture maximale et l'influence du genre	12 hommes et 14 femmes de 19 à 30 ans Italie	Ouverture	Amplitude maximale : déplacement point interincisif (mm) Hommes : 54.4±4.3 / Femmes :45.5±6.9 Angle d'ouverture (°) : Hommes : 35.8±3.4 / Femmes : 31.6±5.6 Déplacement condylien (mm) : Ouverture : Hommes : 20.1±2.8 / Femmes : 14.4±2.9 Fermeture : Hommes : 20.5±6.1 / Femmes : 15.1±3.4	Amplitudes et angles d'ouverture plus grand chez les hommes, car liés à la taille de la mandibule. Translation en ouverture et fermeture sont égales entre elles mais différentes entre hommes et femmes.

Réf	Objectifs de l'étude	Population	Mouvement	Paramètres cinématiques et résultats significatifs	Conclusion
Naeije [88]	Etudier la corrélation entre amplitude d'ouverture et morphologie	17 hommes et 18 femmes de 18 à 31 ans (moy 23ans) Pays-Bas	Ouverture	Amplitude maximale : 51.3±7.1mm Angle d'ouverture : 34.7±5.7° Déplacement condylien : 19.0±3.5 mm	Amplitude maximale corrélée à la taille de la mandibule et à l'angle d'ouverture. Angle de rotation corrélé au déplacement condylien
Muto et al. [89]	Etudier la corrélation entre amplitude d'ouverture et morphologie	29 hommes et 31 femmes de 20 à 30ans Japon	Ouverture	Amplitude maximale (mm) : Hommes : 54.1±6.1 / Femmes : 46.9±4.4	Corrélations significatives entre amplitude maximale d'ouverture et genre, masse du sujet, longueur et angle mandibulaire.
Baqaien et al. [90]	Quantifier les changements liés à la croissance sur les pentes condyliennes	Groupe1 : 32enfants, 7.1ans Groupe2 : 42enfants, 8.0ans Groupe3 : 37enfants, 9.0ans Groupe4 : 35enfants, 10.0ans Groupe5 :26enfants, 11.4ans 41 adultes de 21 à 45ans Allemagne	Propulsion	Pentes condyliennes (°) Adultes : 59.27±4.33(CD)/58.20±3.64(CG) Groupe1 : 44.08±4.70(CD)/43.21±4.07(CG) Groupe2 : 45.41±3.88(CD)/44.59±4.29(CG) Groupe3 : 46.49±3.62(CD) /46.41±3.16(CG) Groupe4 : 47.90±4.12(CD)/46.82±3.98(CG) Groupe5 : 48.99±4.34(CD)/48.34±4.16(CG)	L'angle d'inclinaison de la mandibule augmente avec l'âge. Pas de différence gauche-droite.
Bushang et al. [54, 91]	Description des trajectoires 3D des condyles (CD et CG) et du point interincisif (IP)	27 femmes de 23 à 35ans USA	Propulsion	Distances curvilignes (mm) : 11.99±0.48(IP)/11.91±0.81(CD)/12.87±1.05(CG) Distances linéaires (mm) : 9.32±0.28(IP)/9.18±0.28(CD)/9.58±0.29(CG) Déplacement postéro-antérieur, latéral, vertical des points	La propulsion et la latéralité du point IP donne des indications sur le déplacement des condyles modérément fiables. La distance linéaire du point IP en latéralité donne la meilleure indication du déplacement du condyle. Déplacements plus grands pour condyle gauche que condyle droit en propulsion. Surement lié à l'asymétrie morphologique.
			Latéralité gauche	Distances curvilignes (mm) : 12.30±0.51(IP)/11.62±0.54(CD)/5.76±0.75(CG) Distances linéaires (mm) : 10.98±0.43(IP)/9.49±0.35 (CD)/2.34±0.22(CG) Déplacement postéro-antérieur, latéral, vertical des points	
			Latéralité droite	Distances curvilignes (mm) : 13.04±0.49(IP)/6.81±0.75(CD)/14.1±0.81(CG) Distances linéaires (mm) : 11.45±0.40(IP)/2.53±0.21(CD)/10.16±0.35(CG) Déplacement postéro-antérieur, latéral, vertical des points	
			Ouverture	Distances curvilignes (mm) : 48.6±1.03(IP)/13.95±0.8(CD)/14.5±0.53(CG) Distances linéaires (mm) : 46.6±0.91(IP)/11.93±0.66(CD)/12.26±0.39(CG) Déplacement postéro-antérieur, latéral, vertical des points Angle d'ouverture (°) : 32.5±0.90	L'amplitude d'ouverture maximale n'est pas corrélée avec le déplacement condylien. Amplitude d'ouverture maximale corrélée faiblement avec l'angle d'ouverture de la mandibule.
Fukui et al.[92]	Etudier la corrélation entre mouvement d'ouverture et morphologie	21 femmes de 20 à 24ans (moy 22ans) Japon	Ouverture	Amplitude maximale (mm) : Point interincisif : 41.1±3.5 Condyles : 12.8±2.8	La morphologie de la face joue un rôle dans les amplitudes maximales de mouvement.

Les études présentées dans le Tableau 3 concernent uniquement les sujets asymptomatiques. Le mouvement d'ouverture est le mouvement le plus étudié. Les résultats présentés dans ce tableau varient, comme précédemment, en fonction de la population étudiée (genre, âge, nationalité…). Plusieurs populations sont régulièrement comparées : enfants/adultes [84, 86, 90] et hommes/femmes [44, 85, 87–89].

Pour les études présentées ici, les enfants montrent toujours des valeurs de grandeurs mesurées inférieures aux adultes, quel que soit le mouvement étudié ou le paramètre quantifié.

La comparaison hommes/femmes donne des résultats plus diversifiés. Les hommes présentent des distances curvilignes plus importantes que les femmes pour les deux études [44, 85] en ouverture. La diversité des résultats est également présente pour la comparaison des amplitudes maximales pour le mouvement d'ouverture (résumée sous forme de graphe dans la Figure 12).

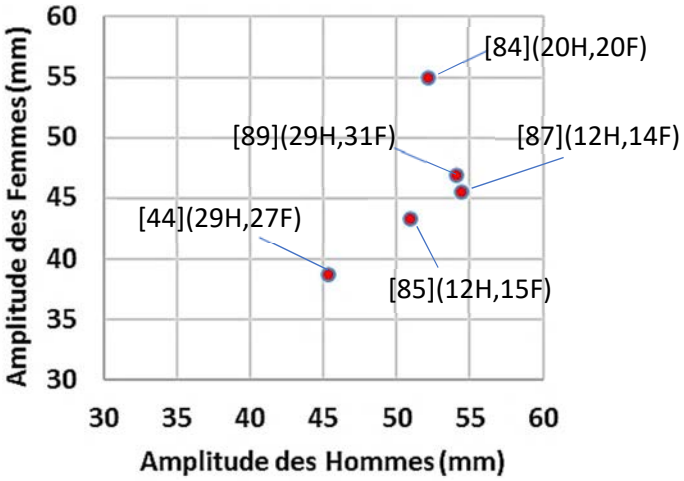


Figure 12 : Comparaison hommes/femmes pour les valeurs moyennes d'amplitudes maximales d'ouverture de la bouche : résultats de différentes études avec leur nombre de sujets entre parenthèses (H=hommes et F=femmes)

Excepté pour l'étude de Reicheneder et al.[84], présentant des valeurs de 54.91±6.1mm pour les femmes et 52.15±7.5mm pour les hommes, pour la majorité des études, les hommes présentent des amplitudes d'ouverture plus importantes que les femmes. Néanmoins les écarts entre ces deux groupes varient d'une étude à l'autre, entre environ 6.5mm (45.32±0.96mm pour les hommes et 38.75±0.91mm pour les femmes [44]) et 9mm (54.4±4.3mm pour les hommes et 45.5±6.9mm pour les femmes[87]), sans être obligatoirement significatif d'un point de vue statistique. En effet, seulement deux de ces études montrent des différences significatives pour cette comparaison entre hommes et femmes pour le mouvement d'ouverture. Lewis et al. [44], sur une étude de 29 hommes (de 23 à 39 ans) et 27 femmes (de 23 à 35 ans), montrent une différence statistiquement significative entre les hommes et les femmes pour cette amplitude

maximale d'ouverture, pouvant être expliquée par la différence de la taille de la mandibule entre ces deux groupes : les hommes présentent des mandibules plus grandes, permettant des mouvements plus amples. De manière similaire, Ferrario et al. [85], dans leur étude des mobilités mandibulaires, se sont également attardés sur l'amplitude maximale en ouverture pour 12 hommes et 15 femmes de 19 à 30 ans. Les résultats montrent une différence entre les hommes et les femmes, avec respectivement des valeurs moyennes de 50.93±5.51mm et 43.27±5.70mm en ouverture maximale.

Concernant les autres résultats, les quantifications des différents paramètres liés aux condyles (distances linéaire, curviligne, angles d'inclinaison) montrent des résultats identiques entre la gauche et la droite pour deux études en propulsion [86, 90]. A l'inverse, pour Buschang et al. [91] le condyle gauche présente des déplacements plus grands que le condyle droit en propulsion et en latéralité à droite, ce qui peut être corrélée avec les influences morphologiques (asymétrie faciale). Cette étude permet également de voir que, lors des mouvements latéraux, le condyle du côté du mouvement effectue des déplacements moins importants que le condyle opposé au mouvement.

Dans ces différentes études, il est également souvent mentionné que la morphologie corporelle (taille, masse) ou faciale (taille de la mandibule, angle mandibulaire…) montre une corrélation avec les paramètres cinématiques et notamment en ouverture [87–89, 92] et en latéralité [84].

Une autre comparaison souvent effectuée dans les études cinématiques de la mandibule est la comparaison de sujets asymptomatiques et de sujets à dysfonctions. Le Tableau 4 récapitule les études majeures effectuant cette comparaison.

Tableau 4 : Comparaison entre sujets asymptomatiques (=asympt) et sujets avec dysfonction (=dysf). Etude bibliographique

Réf	Objectifs	Population	Mouvement	Paramètres	Conclusion
Celic et al. [93]	Evaluer et comparer la cinématique mandibulaire de sujets asymptomatiques et de sujets avec dysfonctions de l'ATM	180 hommes d'âge moyen 21.3ans : 60 patients avec dysfonctions musculaire 60 patients avec luxations réductibles 60 patients avec luxations réductible et dysfonctions musculaires 60 hommes asymptomatiques d'âge moyen 21.4ans, Croatie	Ouverture Latéralité droite Latéralité gauche Propulsion	Amplitude maximale	Différences statistiquement significatives entre les groupes. Cependant les valeurs sont toutes contenues dans les intervalles référencés cliniquement.
De félicio et al. [94]		10 sujets asymptomatiques : 5hommes&5femmes, âge moy31.9ans 10 sujets avec dysfonctions de l'ATM : 3hommes et 7femmes, âge moy27.3ans, Italie	Ouverture	Amplitude maximale Angle d'ouverture Déplacement condylien	Pas de différence pour les amplitudes, mais angle d'ouverture plus faible pour les sujets avec dysfs. Importance d'étudier le système manducateur en dynamique
Gselmann et al.[36]		30 sujets asymptomatiques : 10hommes (33.7ans) et 20F (30.3ans) 70 sujets avec dysfonctions : Luxation réductible : 13hommes (29.5ans) et 29femmes (32.5ans) Luxation irréductible : 17hommes (27.4ans) et 11femmes (27.6ans) Autriche	Propulsion Ouverture	Distances curvilignes des points condyliens	Différence statistique entre les volontaires et les patients. Volontaires et patients avec luxation irréductibles montrent des valeurs normales. Patients avec luxation réductibles montrent des valeurs plus basses.
Ishigaki et al.[95]		120sujets asymptomatiques : 95hommes et 25femmes de 22 à 27ans 130 sujets à dysfonctions de 17 à 70ans : Bruits articulaires : 49hommes et 18femmes Douleur musculaire : 8hommes et 4femmes Bruxisme : 20hommes et 2femmes Bruits + douleurs : 17hommes et 12femmes, Japon	Ouverture	Amplitude maximale Observation des trajectoires du point IP Déviation mandibulaire	Déviation mandibulaire souvent présente pour les sujets avec bruits articulaires et les sujets avec douleurs
Kraljevic et al.[76]		43 sujets asymptomatiques :20hommes et 23femmes de 21 à 63ans 51 sujets à dysfonctions : 11hommes et 40femmes de 15 à 73ans Croatie	Ouverture	Amplitude maximale des condyles Angle d'ouverture	Pas de différences entre sujets asymptomatiques et sujets à dysfonctions
Mapelli et al.[96]		20 patients :18femmes et 2hommes de 18 à 34ans 20 sujets asymptomatiques : 17femmes et 3hommes de 20 à 31ans Brésil	Ouverture Propulsion Latéralité gauche Latéralité droite	Amplitudes maximales Mobilités mandibulaires (rotations et translation) Vitesse du point IP	Patients atteignent même amplitude que sujets asymptomatiques mais de manière différente (déviation, asynchronie des condyles…) : Adaptation
Mazzeto et al.[66]		30 sujets asymptomatiques & 30 sujets avec dysfonctions (Race, genre et âge similaires) Brésil	Ouverture Propulsion Latéralité gauche Latéralité droite	Amplitudes maximales	Pas de différence
Throckmorton et al.[97]	Evaluer la réhabilitation du mouvement après traitement de fracture	111hommes et 25femmes avec fracture unilatérale, différentes prises en charge 26hommes et 26femmes asymptomatiques d'âge moyen 26.1ans USA	Ouverture Propulsion Latéralité gauche Latéralité droite	Amplitudes maximales Déviation latérale …	En général, les mobilités condyliennes reviennent aux valeurs asymptomatiques 3ans après la prise en charge de la fracture quel que soit le traitement. Cependant les patients avec chirurgie montrent une réhabilitation généralement plus rapide

Les études présentées ici ne sont qu'une partie de ce qui existe dans la littérature pour comparer les sujets asymptomatiques et les sujets avec dysfonctions. La grande variété des dysfonctions explique ce nombre important d'études cherchant à en comprendre les particularités. En effet, la majorité des études vise à quantifier et/ou expliquer les différences sur la cinématique provoquées, ou non, par les dysfonctions. Le but recherché est l'amélioration du diagnostic et de la réhabilitation du mouvement. En effet, par exemple, Throckmorton et al. [97] évaluent l'influence du traitement sur la capacité de mouvement de 136 sujets avec fractures et notamment le temps mis avant une réhabilitation totale du mouvement, s'élevant dans ce cas à environ trois ans. Gsellmann et al. [36] ont montré que cette réhabilitation de mouvement normal dépend de la dysfonction concernée. En effet, certains cas pathologiques ne sont pas touchés par les différences de réalisation des mouvements. C'est le cas, par exemple, pour les études de Mazzeto et al.[66] et Kraljevic et al.[76], dans lesquelles il n'existe pas de différence entre les sujets asymptomatiques et les sujets à dysfonctions. Mapelli et al. [96] ont par ailleurs pu montrer que les patients peuvent atteindre les mêmes amplitudes de mouvements que les sujets asymptomatiques, en passant cependant par une adaptation des trajectoires condyliennes pour permettre ce mouvement.

Nous avons montré la diversité des études mais aussi des résultats, que ce soit pour les valeurs d'amplitudes maximales, de quantification des trajectoires, des comparaisons de populations asymptomatiques (hommes-femmes, enfants-adultes) ou de populations asymptomatiques avec celles à dysfonctions.

Malgré cette diversité importante, ces études d'amplitudes et de trajectoires constituent un premier élément de quantification de l'enveloppe des mouvements mandibulaires et de comparaison entre sujets. Cependant ces paramètres ne suffisent pas pour expliquer en détails le fonctionnement des mouvements mandibulaires.

C'est pourquoi des études tridimensionnelles ont été mises en œuvre afin de comprendre le fonctionnement plus détaillé et précis du système manducateur, par la quantification de ses mobilités 3D.

3.3.Etudes tridimensionnelles : mobilités mandibulaires

Les premières descriptions anatomiques des mobilités de la mandibule ont été présentées pour les différents mouvements élémentaires.

La première description anatomique du mouvement d'ouverture de la bouche suit trois étapes. Il est dit tout d'abord que le condyle mandibulaire subit une rotation autour de son axe médial-latéral, et roule sous le disque par l'action des muscles abaisseurs [98]. Puis l'ensemble condyle-disque subit une translation le long de la fosse temporale et du tubercule articulaire : l'ensemble condyle-disque glisse vers l'avant et vers le bas. Cette translation s'actionne par les muscles abaisseurs. S'ajoute à cela, une dernière phase de rotation qui entraine le passage du condyle mandibulaire en avant du tubercule articulaire afin de permettre l'ouverture maximale de la bouche (Figure 13) [5, 87]. La fermeture correspond à l'élévation de la mandibule, en suivant le mouvement inverse de celui d'ouverture [98].

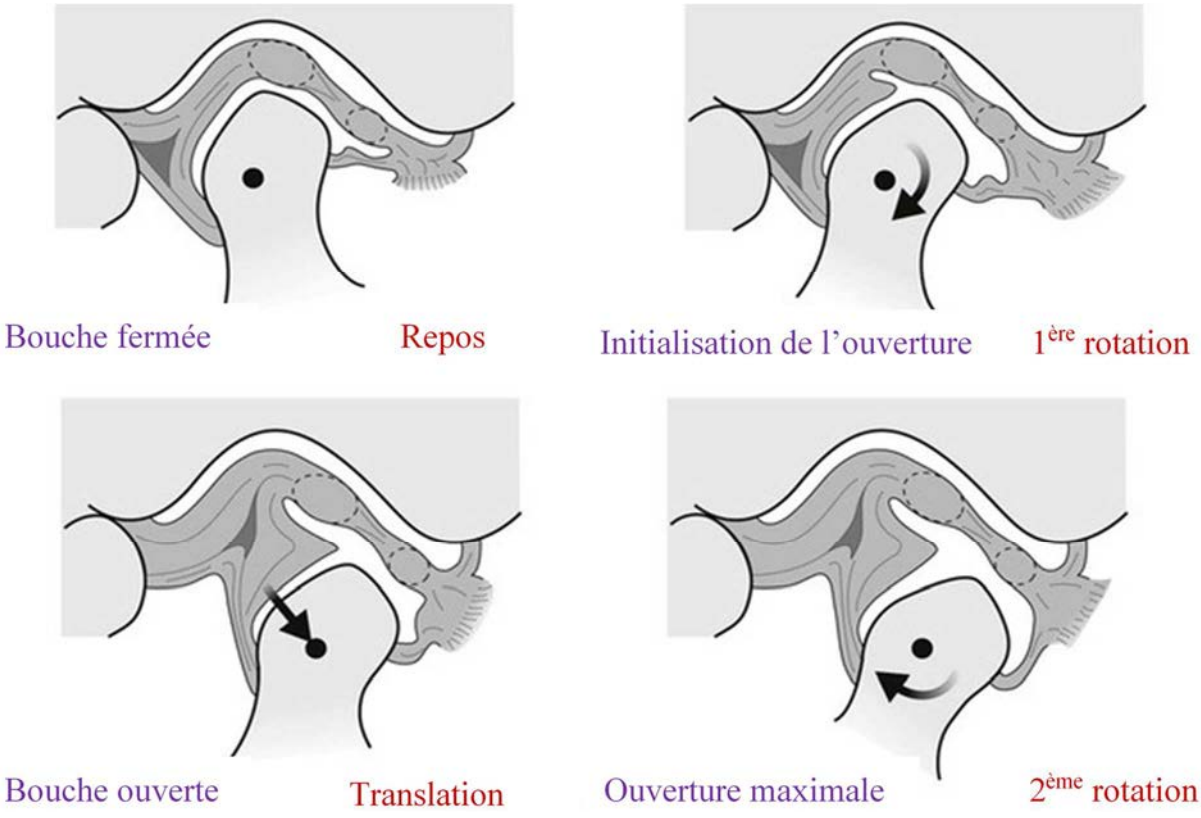


Figure 13 : Fonctionnement de l'ATM lors de l'ouverture de la bouche [99]

Les mouvements latéraux correspondent à un déplacement à gauche ou à droite de l'avant de la mandibule. Ces mouvements latéraux, effectués sans guidage dentaire, doivent être distingués des mouvements de diduction pour lesquels un glissement latéral des dents mandibulaires sur les dents du maxillaire s'effectue[20]. Lors des mouvements latéraux chaque condyle va jouer un rôle différent (Figure 14). Le condyle situé du côté du mouvement s'appelle le condyle travaillant. Le condyle opposé au mouvement s'appelle le condyle non travaillant. Le condyle non travaillant va effectuer une translation en avant, en dedans et en bas par contraction du muscle ptérygoïdien latéral. Pendant ce temps, le mouvement du condyle travaillant est décrit comme une légère translation arrière et externe suivie d'une phase de rotation pure autour d'un axe vertical, sous l'effet d'une contraction du muscle temporal [10, 100, 101]. Le mouvement latéral est limité par l'action des ligaments et la mise sous tension des muscles.

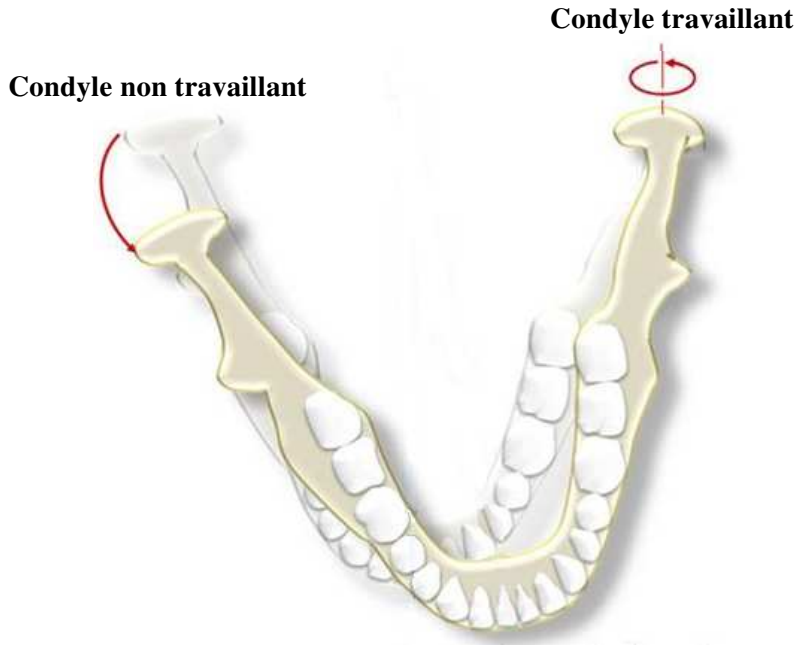


Figure 14 : Mouvement latéral vers la gauche de la mandibule : faible translation arrière et externe et rotation du condyle gauche (condyle travaillant) autour d'un axe vertical et déplacement vers le bas, l'avant et la gauche du condyle droit (condyle non travaillant) [102]

Le mouvement de propulsion est le mouvement vers l'avant et vers le bas de la mandibule (Figure 15). A l'instar des mouvements latéraux et de la diduction, la propulsion doit être dissociée de la protrusion qui s'effectue avec guidage dentaire : les incisives inférieures glissent sur les incisives supérieures[20].

Les condyles effectuent un déplacement similaire dans leur forme et leur amplitude [4]. La propulsion nécessite en général une légère ouverture buccale afin de permettre un avancement de la mandibule sans blocage par les dents, reflétant une faible rotation de la mandibule. Les mobilités de la mandibule pendant la propulsion sont décrites comme une translation de l'ensemble disque-condyle sous la surface temporale [10], c'est-à-dire une translation vers l'avant et vers le bas [103]. La rétropulsion s'effectue par la translation arrière de l'ensemble disque-condyle. Ce mouvement est limité par la fosse temporale [7].

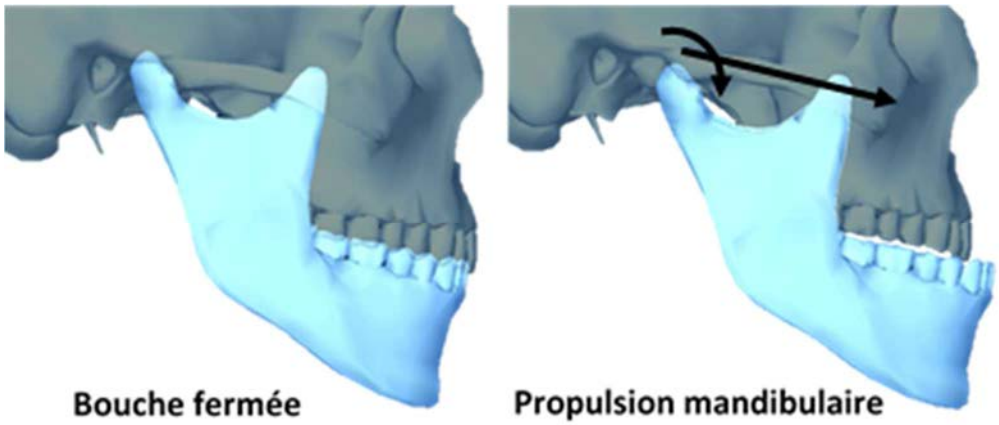


Figure 15 : Mouvement de propulsion, vue sagittale. Images issues du logiciel WinJaw. Faible rotation mandibulaire pour effectuer une légère ouverture puis translation vers le bas et l'avant du complexe disque-mandibule

Plus récemment, des auteurs ont mis en avant la simultanéité des mobilités en rotation et en translation pour l'ensemble des mouvements. Nous parlons alors de « rototranslation » pour expliquer les trajectoires du condyle mandibulaire [9, 11]. Le rapport de rotation/translation évolue au cours du mouvement [16], selon la vitesse de réalisation et le mouvement considéré.

Ces premières descriptions continuent donc d'évoluer avec les nouvelles études cinématiques. Pour cela, des systèmes plus complexes et plus précis, permettant alors l'étude des 6 degrés de liberté de l'articulation ont été mis au point. Ils permettent de mesurer en continu les mouvements articulaires et de quantifier d'une manière précise les aspects anatomiques en prenant en compte les caractéristiques physiques propres à chaque sujet (taille de la mandibule

et positionnement des condyles). Il existe différents systèmes de mesures en 3D. Les systèmes optoélectroniques tels que OKAS-3D [104] ou JAWS-3D [105] utilisent des diodes positionnées sur la peau ou les dents du sujet. Les systèmes optiques tels que Optotrak 3020 [106] font appel à des caméras qui filment les différents mouvements. Les systèmes électromagnétiques: miniBIRD500 [107] utilisent des capteurs électromagnétiques placés sur le crâne et la mandibule. Enfin les systèmes à ultrasons : Arcus DIGMA [100] analysent les ondes envoyées entre un émetteur et un récepteur placés sur le crâne et la mandibule du sujet. Les inconvénients majeurs de ces différents systèmes sont liés aux artefacts de tissus mous [108], les différents dispositifs ne permettant pas l'accès direct aux structures osseuses. De plus, la grande variété des dispositifs, de leur fonctionnement et donc de leur méthodologie rend complexe la comparaison entre études.

Les études cinématiques 3D plus précises ont donc commencé à émerger pour les calculs des rotations et translations de la mandibule.

Le mouvement le plus souvent étudié est le mouvement d'ouverture. La mobilité principale étudiée pour ce mouvement est la rotation intercondylienne évaluée le plus souvent par un angle d'ouverture dans le plan sagittal. Les valeurs répertoriées pour les sujets asymptomatiques sont assez semblables d'une équipe à l'autre : 30.12±5.81° pour 32 sujets [62], 32.05±0.90° pour une étude sur 27 femmes [54], 34.7±5.7° sur 35 sujets [88]…

Les comparaisons hommes/femmes donnent peu de différences entre ces deux groupes : 31.6±5.6° pour 14 femmes et 35.8±3.4° pour 12 hommes [87], 39.5±3.6° pour 96 filles et 38.2±3.7° pour 97 garçons [109]...qui peuvent cependant être significatives d'un point de vue statistique. C'est le cas de l'étude de Ferrario et al. [85] avec un angle moyen de 31.55±0.85° pour 15 femmes et de 34.46±1.13° pour 12 hommes, mais également de Lewis et al.[44] avec 6° de différence entre les hommes et les femmes pour cet angle d'ouverture.

Par ailleurs, certaines études quantifient les différences entre sujets asymptomatiques et sujets avec dysfonctions. Sur 27 sujets asymptomatiques [94], l'angle d'ouverture vaut 32.8±1.17° alors que la valeur moyenne pour les 9 patients avec fracture est 25.94±3.96°. De même, par exemple, pour Mapelli et al. [110] qui comparent 13 femmes asymptomatiques et 13 femmes sujettes aux dysfonctions temporo-mandibulaires, les valeurs sont respectivement de 34.3±3.5° et 24.9±10.4°, permettant alors de parler de mobilités limitées dans le cas de dysfonctions.

Les données pour les autres mobilités sont peu présentes dans la littérature. La translation postéro-antérieure a été étudiée par Coutant et al. [62]. Les valeurs obtenues pour 32 sujets asymptomatiques sont en moyenne de 15.5±4.1mm. Plus récemment, Mapelli et al. ont étudié

l'ensemble des mobilités en ouverture sur une population de 20 sujets asymptomatiques [96] en quantifiant les valeurs des mobilités aux positions extrêmes de la mandibule, sans montrer de courbe décrivant l'évolution des mobilités au cours du mouvement. Par ailleurs, Chen et al. [111] ont quantifié les mobilités 3D de la mandibule en ouverture maximale en utilisant la fluoroscopie, qui a l'avantage de visualiser les structures osseuses directement, mais l'étude reste cependant limitée à un seul sujet.
Les études des mobilités pour les autres mouvements élémentaires ne sont, à notre connaissance, pas encore exploitées.

La littérature s'enrichit donc progressivement de ces analyses cinématiques 3D, qui restent cependant limitées au mouvement d'ouverture. Une autre limitation de ces études concerne la normalisation de la méthode d'analyse cinématique. En effet, à l'inverse des autres articulations du corps humain pour lesquelles l'ISB (International Society of Biomechanics) a défini des normes d'étude [112–114], il n'existe pas à ce jour de méthode standardisée pour l'analyse cinématique de l'ATM. Ceci entraine donc des difficultés à comparer les résultats de chaque équipe. Cette comparaison est principalement rendue difficile par l'absence de normalisation pour la création des repères anatomiques associés au crâne et à la mandibule, nécessaires à l'analyse cinématique.

Pour le repère du crâne, peu nombreuses sont les équipes donnant leur méthode de création. Pour les équipes expliquant leur démarche, les repères se distinguent par l'utilisation de différents plans anatomiques de référence : le plan de Francfort, le plan de Camper, ou encore le plan d'occlusion [86, 115]. Le plan de Francfort est le plan classiquement utilisé en anatomie, créé à partir d'un point sous orbital (situé sur le plancher de l'orbite de l'œil) et des points supérieurs des méats acoustiques (canal auditif). Dans la plupart des études, n'utilisant pas l'imagerie pour localiser les points du canal auditif, ces points sont remplacés par des points du tragus supérieur, plus facilement localisables et accessibles. Ce plan est une référence en anatomie descriptive et fonctionnelle, et permet de définir l'horizontalité du crâne [11]. Le plan de Camper est créé à partir des points centraux des deux conduits auditifs et du point sous-nasal. Ce plan est généralement parallèle au plan d'occlusion dentaire [116] (Figure 16).

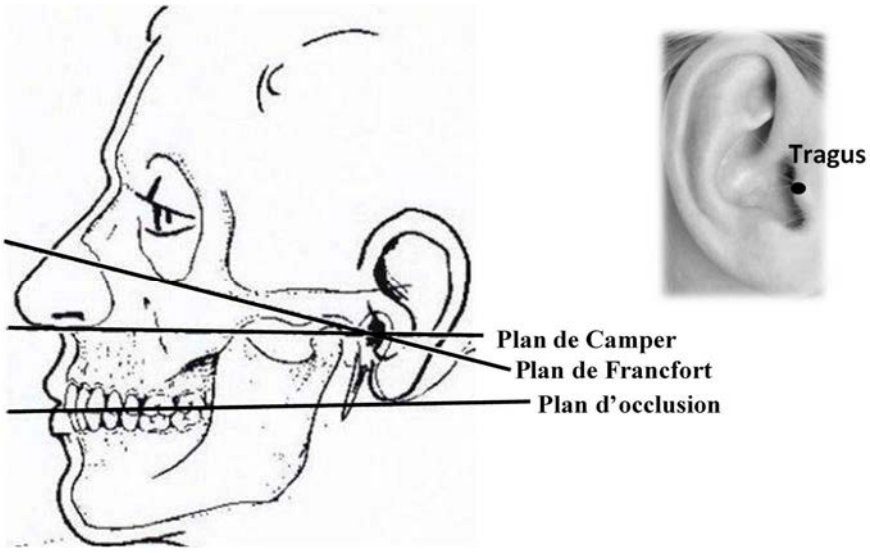


Figure 16 : Plans du crâne et point tragus

Kim et al. [117] créent un repère crâne à partir du plan de Francfort. Le centre du repère est le porion droit (point du crâne situé au-dessus du canal auditif). L'axe X relie les deux porions, dirigé vers la gauche. L'axe Y, dirigé vers l'avant, associé à l'axe X, forme le plan de Francfort. L'axe Z est construit de manière à obtenir un repère orthonormé direct.
Coutant et al. [62] utilisent le plan de Camper, l'axe X relie les deux centres condyliens, l'axe Y est la normale au plan formé par les condyles et le point sous nasal (plan de Camper), dirigé vers le haut et Z est le produit vectoriel de X et Y, dirigé vers l'avant.
Pour Baeyens et al. [107], le repère est créé à partir d'un axe unitaire reliant les deux tragi et dirigé vers la gauche, d'un axe unitaire normal au plan formé par les tragi et point infra orbital, dirigé vers le bas et enfin d'un axe unitaire résultant du produit vectoriel des deux précédents.

Pour le repère mandibule, les méthodes de création sont nombreuses. La variation se fait ici exclusivement sur la méthode de sélection des points de référence du repère. La méthode par palpation est la plus utilisée [86, 111, 118]. Si elle a l'avantage d'être liée à l'anatomie des structures osseuses (condyles mandibulaires), sa principale limite reste la variabilité qui peut exister dans la définition des points à identifier. En effet, l'identification de points anatomiques par palpation reste un exercice peu répétable dans le temps et peu reproductible entre opérateurs[119]. Pour pallier cette limite, des méthodes fonctionnelles ont été proposées.
La première méthode fonctionnelle est la méthode de l'axe charnière [85]. L'axe charnière est une ligne imaginaire autour de laquelle la mandibule effectue une rotation pure dans le plan sagittal. Les auteurs ne sont pas tous en accord sur la position de cet axe et sur la méthode de localisation. Cependant il est habituellement déterminé comme l'axe de rotation pour de petits

mouvements d'ouverture avec la tête inclinée en arrière. La méthode fonctionnelle de l'axe charnière est utilisée le plus souvent pour la réplication des mouvements sur les articulateurs dentaires capables de reproduire des mobilités en rotation, mais cette hypothèse de rotation pure de la mandibule rend difficile son utilisation pour l'étude cinématique des mouvements mandibulaires amples[6].

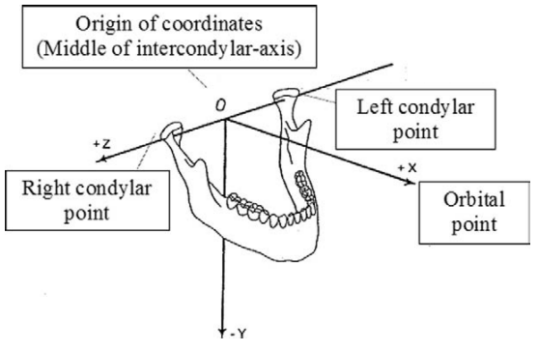
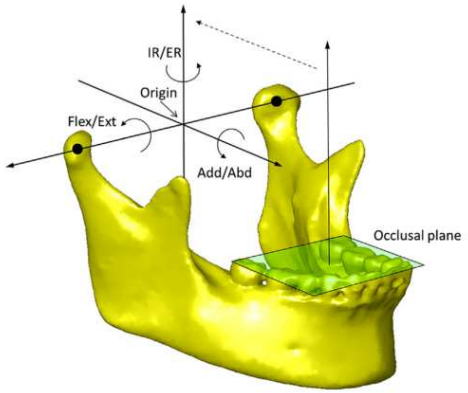
La deuxième méthode est la méthode de l'axe cinématique. Cet axe est la ligne reliant les centres cinématiques gauche et droit. Selon Yatabe et al. [6], le centre cinématique est le point de référence du condyle, situé mathématiquement dans le centre de la surface du complexe condyle-disque supposée circulaire. Cette surface simulée suit l'éminence articulaire de l'os temporal au cours des mouvements d'ouverture et de propulsion de la bouche. Les trajectoires du centre cinématique pendant ces deux mouvements doivent donc coïncider. En observant les trajectoires en ouverture et en propulsion, cette coïncidence est alors utilisée pour déterminer l'emplacement du centre cinématique. Cependant, les trajectoires de ce centre cinématique ne sont pas liés à l'anatomie de l'ATM car elles ne représentent ni le mouvement du condyle dans son ensemble ni le mouvement des points en surface [120]. Cet axe est notamment utilisé dans l'étude de Baqaien et al. [121] comme base pour le repère mandibule.

La méthode de l'axe hélicoïdal consiste en l'utilisation d'un axe instantané de rotation, créé tel que le mouvement de la mandibule soit représenté comme une rotation autour de cet axe et une translation le long de cet axe. Cette méthode a l'avantage de décrire de façon unique le mouvement mandibulaire mais montre des limitations pour des petits mouvements ou des mouvements de translation pure [80]. De plus cet axe n'est pas lié à l'anatomie, ce qui rend difficile l'interprétation clinique des mobilités calculées [122].

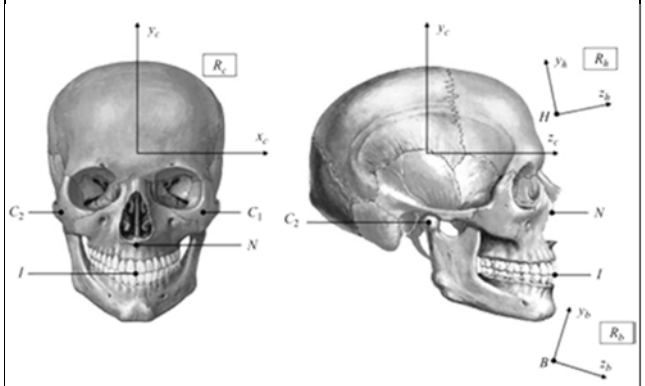
L'ensemble de ces méthodes offrent donc la possibilité d'obtenir des points plus caractéristiques des mobilités (sur l'axe de rotation de la mandibule par exemple). Cependant, pour toutes ces méthodes, les points de référence du repère ainsi obtenus ne reflètent pas l'anatomie, car ils sont généralement localisés en dehors du condyle mandibulaire.

Le tableau suivant (Tableau 5) récapitule les études qui fournissent leur méthodologie de création de repères anatomiques.

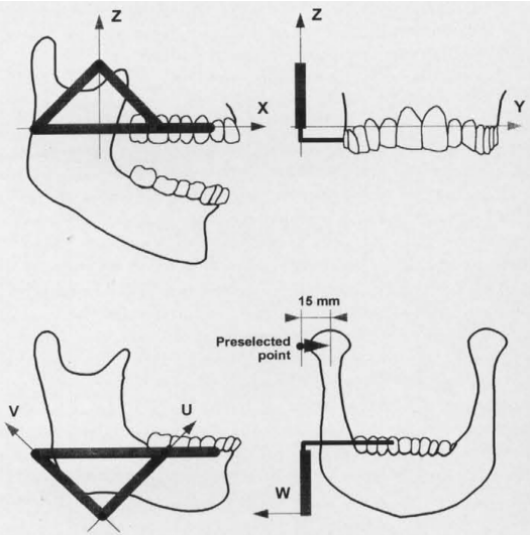
Tableau 5 : Création des repères anatomiques : étude bibliographique

<table>
<tr>
<td>Baqaien et al.[121]
Création d'un plan horizontal passant par les points condyliens droit et gauche déterminés par la méthode de l'axe cinématique, et le point sous-orbital gauche.
L'axe X est l'axe postéro-antérieur dans le plan horizontal
L'axe Z est l'axe gauche-droite reliant les deux points condyliens
L'axe Y est supéro- inférieur (normal au plan horizontal)
L'origine du repère est le milieu de l'axe intercondylien
 
</td>
<td>Chen et al. [111]
Repère MANDIBULE : Epicondyles mandibulaires droit et gauche et point interincisif mandibulaire.
L'origine du repère est le milieu de la distance entre les deux épicondyles.
L'axe Z relie les deux épicondyles, dirigé vers la droite.
L'axe Y est la normale au plan formé par les épicondyles et point interincisif, dirigé vers le haut.
L'axe X est le produit vectoriel de Y et Z et dirigé vers l'avant
ETUDE : effectuée dans un repère maxillaire créé de manière à être coïncident avec le repère mandibule lors du repos.
Séquence d'axe pour la décomposition des rotations : angles de Cardan
(axe latéral, axe antérieur, axe inféro-supérieur)
 
</td>
<td>Coutant et al.[62, 123, 124]
Repère MAXILLAIRE : à partir de 3 points sur les dents du maxillaire : création d'un plan, utilisation du barycentre des 3 points pour l'origine du repère, L'axe Y est la normale au plan dentaire, dirigé vers le haut, Z est dirigé vers l'avant et X latéralement.

Repère MANDIBULE : en utilisant la même méthode sur 3 points dentaires de la mandibule

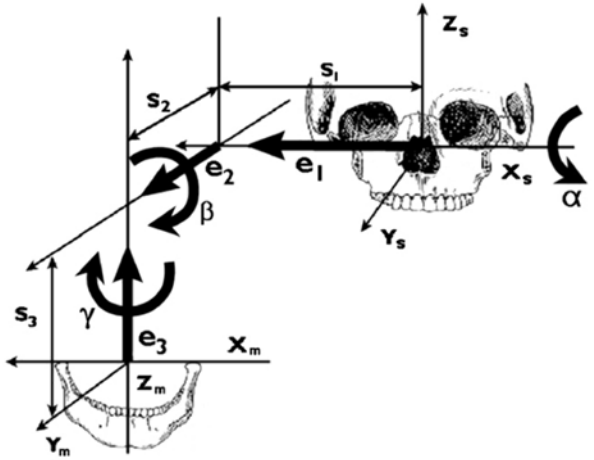
ETUDE : des mobilités exprimées dans le repère de Camper, formé des deux centres condyliens et du point sous nasal. L'axe X relie les deux centres condyliens, l'axe Y est la normale au plan formé par les condyles et le point sous-nasal et Z est le produit vectoriel de X et Y.
  </td>
</tr>
<tr>
<td colspan="3">Baeyens et al.[107]
Repère CRANE : Création d'un axe unitaire reliant les 2 tragi et dirigé vers la gauche. Création d'un axe unitaire normal au plan formé par les tragi et le point sous-orbital, dirigé vers le bas. Création d'un vecteur unitaire résultant du produit scalaire des deux précédents.
Calcul des rotations de la mandibule en fonction du repère crâne en utilisant l'axe hélicoïdal</td>
</tr>
</table>

Gallo et al.[122]
Repère CRANE : création à partir d'une plaque solidaire des dents du maxillaire
Repère MANDIBULE : à partir d'une plaque solidaire des dents de la mandibule.
Chaque plaque présente ces propres axes caractéristiques utilisés en tant que repères maxillaire et mandibulaire



Tokutomi et al.[86]
Repère MANDIBULE : utilisation des points condyliens gauche et droit et du point interincisif mandibulaire

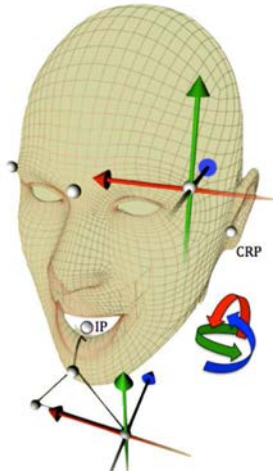
Leader et al.[118]
Repère CRANE et MANDIBULE (coïncident au point initial) : utilisation des points condyliens.
L'axe X relie les deux condyles, dirigé vers la droite.
L'origine du repère et le milieu de la distance intercondylienne.
Création du plan X-Y, parallèle au plan axial issu d'une étude par IRM.
L'axe Z est perpendiculaire au plan X-Y, dirigé vers le haut.
L'axe Y est le produit vectoriel de Z et X, dirigé vers l'avant
Repère ARTICULAIRE (non orthogonal) : e1= axe X du crâne, e3=axe Z de la mandibule, e2=axe flottant



Mapelli et al. [96]
Repère CRANE : créé à partir des tragi et de la glabelle (point situé en haut du nez entre les yeux)

Repère MANDIBULE : repère du dispositif lié à la mandibule, par l'intermédiaire d'un dispositif solidaire de la gencive

ETUDE : mouvement relatif du repère mandibule par rapport au repère crâne ; Hypothèse des solides rigides ; séquence d'axe pour les rotations : axes de Cardan (axe postéro-antérieur, axe latéral (médial-distal), axe vertical)



Kim et al.[117]
Repère MANDIBULE : points porion droit et gauche (points supérieurs du canal auditif) et point sous-orbital gauche. L'origine du repère est le point porion droit.
L'axe X relie les 2 porions, dirigé vers la gauche. Le plan X-Y est défini comme le plan de Frankfort horizontal contenant les deux porions et le point sous-orbital gauche.
L'axe Y est perpendiculaire à l'axe X, dirigé vers l'avant. L'axe Z : est construit de manière à avoir un repère orthonormé direct, dirigé vers le haut

Ferrario et al.[85]
Repère CRANE : condyles gauche et droit et glabelle (point frontal centré entre les sourcils).
L'étude des mouvements mandibulaire se fait par l'observation de l'axe charnière formé à partir des deux condyles. Le point interincisif sert de support à une plaque servant de repère externe représentatif du repère occlusal

La diversité de ces méthodes d'analyse cinématique ne facilite pas la discussion entre biomécaniciens et praticiens, alors que le lien entre problématique scientifique et problématique clinique est indispensable, pour une meilleure prise en charge des patients. La question d'une méthode d'analyse cinématique standardisée pour l'étude de l'appareil manducateur se pose donc.

Dans ce contexte, le premier objectif de ce travail de thèse est de proposer une méthode d'analyse cinématique 3D de la mandibule et de quantifier sa robustesse. La signification clinique et la répétabilité des repères et des paramètres cinématiques proposés seront les critères de choix pour cette méthode.
Le deuxième objectif de la thèse est de quantifier la cinématique mandibulaire pour une population asymptomatique la plus large possible afin de comprendre son comportement pour des mouvements simples de la bouche.
Le dernier objectif de ce travail est de comparer la cinématique mandibulaire observée pour des sujets présentant des dysfonctions mineures à la base de données de sujets asymptomatiques. Cette dernière partie a pour but de discuter de la création d'outils d'identification de la dysfonction.

4. Conclusion

Ce chapitre bibliographique a permis de présenter les composants de l'appareil manducateur ainsi que son fonctionnement. Il a également montré la diversité des dysfonctions qu'il pouvait présenter en les décomposant en dysfonctions musculaires et articulaires. Les méthodes de diagnostic de ces dysfonctions, basées sur un questionnaire permettant de prendre en compte l'historique du trouble et sur des examens cliniques accompagnés de manière non systématique par de l'axiographie et/ou de l'imagerie ont été exposées. Enfin, un état de l'art de l'analyse cinématique de la mandibule a été réalisé. Il a notamment mis en avant la variété de dispositifs et de méthodologies utilisés ainsi que l'absence de normalisation pour l'analyse cinématique de cette zone anatomique. Il a ainsi démontré la nécessité de mise en place d'une méthode robuste d'analyse cinématique 3D de la mandibule avant de pouvoir procéder à une quantification de cette cinématique sur des sujets asymptomatiques et des sujets présentant des dysfonctions.

CHAPITRE 2 :
Précision du dispositif de mesure et répétabilité du protocole

La première partie du travail de thèse est consacrée à la mise en place d'un protocole de mesures cinématiques. Ce protocole utilise le dispositif Zebris CMS-20 JMA (Zebris Medical, GmbH, Isny, Allemagne), basé sur la mesure du temps de vol d'impulsions ultrasonores qui se propagent entre l'unité émettrice solidaire de la mandibule et l'unité réceptrice positionnée sur le crâne. C'est un système de mesure qui a l'avantage d'être spécifique à l'analyse cinématique de l'appareil manducateur. La seule donnée du constructeur concernant la précision du système est l'erreur maximale de mesure de la position de l'unité émettrice. Néanmoins, aucune donnée n'est fournie quant à sa précision en mouvement et notamment pour les différentes mobilités en rotation et en translation représentatives du mouvement mandibulaire. La première partie de ce chapitre traitera donc de la description de ce système de mesure et de l'évaluation de sa précision.

L'analyse cinématique requiert la création de repères associés aux structures osseuses étudiées (crâne et mandibule), appelés « repères anatomiques ». Ces repères sont créés à partir de points caractéristiques de l'anatomie des structures osseuses, identifiables au travers des tissus mous, et appelés par la suite « points anatomiques ». La deuxième partie de ce chapitre sera consacrée à l'étude de la répétabilité du pointage des points anatomiques de la mandibule.

Enfin, nous étudierons si le collage de l'empreinte instrumentée sur les dents mandibulaires modifie ou non l'occlusion dentaire et le positionnement de la mandibule.

1. Zebris CMS20 Jaw Motion Analyser

Dans le cadre de l'étude biomécanique sur l'analyse de l'ATM, le dispositif utilisé est le CMS-20-JMA (Jaw-Motion-Analysis). Ce système est un dispositif portatif, permettant une mesure de la position tridimensionnelle de la mandibule par rapport au crâne. L'appareil est constitué de deux unités.

L'unité réceptrice est composée de huit récepteurs à ultrasons : quatre positionnés sur la partie gauche et quatre autres à droite. Cette unité se pose sur le nasion (extrémité supérieure du nez) et est maintenue sur l'arrière et le dessus de la tête par l'intermédiaire d'élastiques (Figure 17). Les parties gauche et droite de l'unité réceptrice s'écartent ou se rapprochent pour s'adapter à la largeur de la tête du sujet. Bien que ceci engendre une variation de position relative entre les récepteurs gauches et droits, aucune calibration du système n'est demandée avant de réaliser une mesure. Pour valider ce point, l'influence de l'écartement et de la calibration sera étudiée.

L'unité émettrice est composée de quatre émetteurs à ultrasons. Elle est rendue solidaire de la mandibule grâce à une attache dentaire. Cette dernière est fixée d'un côté sur l'unité émettrice par un système aimanté, et collée de l'autre côté sur les dents de la mandibule par l'intermédiaire d'une empreinte dentaire en silicone (Figure 17).

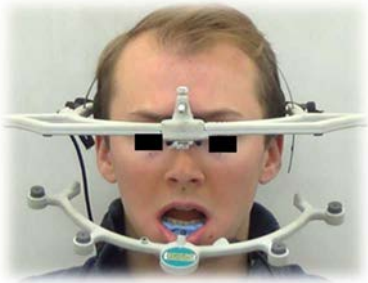
A)  B)

Figure 17 : Dispositif CMS-20-JMA (Jaw-Motion-Analysis) pour l'analyse cinématique de la mandibule. A) Mise en place des unités réceptrice et émettrice sur le sujet. B) Positionnement de l'attache dentaire sur les dents mandibulaires par collage de l'empreinte dentaire en silicone (en bleu). L'empreinte dentaire est réalisée en bouche fermée et ne doit pas gêner les contacts dentaires entre les mâchoires supérieure et inférieure.

L'identification des points anatomiques est réalisée par palpation. L'enregistrement de la position tridimensionnelle de chaque point anatomique est effectué à l'aide d'un pointeur rigide muni d'une extrémité sphérique de diamètre 1.5mm. Le pointeur est positionnable à plusieurs endroits de l'unité émettrice afin de permettre aux deux unités d'être en vis-à-vis lors de l'enregistrement, quel que soit le point considéré (Figure 18).

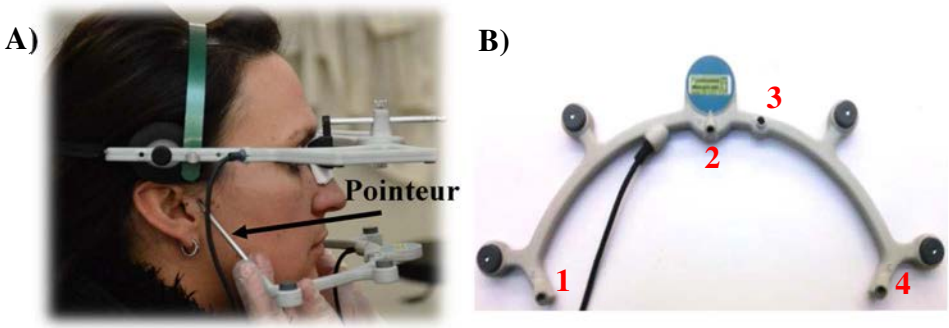


Figure 18 : A) Enregistrement des coordonnées tridimensionnelles des points anatomiques à l'aide du dispositif CMS-20-JMA muni du pointeur. B) Quatre emplacements possibles du pointeur sur l'unité émettrice du système JMA.

En mesurant le temps de vol des pulses ultrasonores émis alternativement par chaque émetteur, l'appareil évalue la position de l'unité émettrice mobile par rapport à l'unité réceptrice fixe, à une fréquence d'échantillonnage de 75 Hz. Les données de sortie sont les coordonnées 3D des points palpés (points sélectionnés par le pointeur), à chaque instant, dans un repère lié au crâne défini par défaut dans le logiciel d'acquisition (WinJaw 10.6.xx pour Windows) avec une résolution de 0.01mm.

2. Etude de la précision système Zebris

Le constructeur annonce la précision du dispositif par une erreur maximale de position de l'unité émettrice de 2.5‰ de la distance absolue entre l'unité réceptrice et l'unité émettrice. Ces données ne suffisent pas pour évaluer la précision sur l'évaluation des mobilités en rotation et en translation, c'est pourquoi le premier objectif de cette partie est de quantifier la précision sur l'évaluation de ces mobilités.

Le dispositif servant de référence pour cette étude est constitué d'une table micrométrique pour les translations et d'une platine goniométrique pour les rotations. La platine goniométrique est graduée tous les degrés et la table micrométrique tous les 0.02mm. La table micrométrique est fixée à un socle métallique de grandes dimensions, assurant ainsi une stabilité pendant les enregistrements (Figure 19). Le support de l'unité émettrice est l'attache dentaire décrite précédemment qui est vissée sur la platine goniométrique, elle-même vissée à la table micrométrique. L'ensemble support-unité émettrice bouge uniquement selon les translations de la table micrométrique ou les rotations de la platine. L'unité réceptrice est positionnée sur un support qui est lui-même vissé dans le socle pour garantir un positionnement constant durant

les essais. Les unités sont placées sur leur support de telle sorte qu'elles soient en vis-à-vis et à la verticale. Une distance de 60mm sépare les deux unités reflétant la distance moyenne séparant le nasion et les dents [125]. Cette position verticale des unités correspond à la position couchée du sujet. Nous avons vérifié que ce changement d'orientation n'influence pas la mesure. Afin d'éviter toute réflexion des ultrasons, les parties métalliques du dispositif sont recouvertes de tissus (non inclus sur la Figure 19)

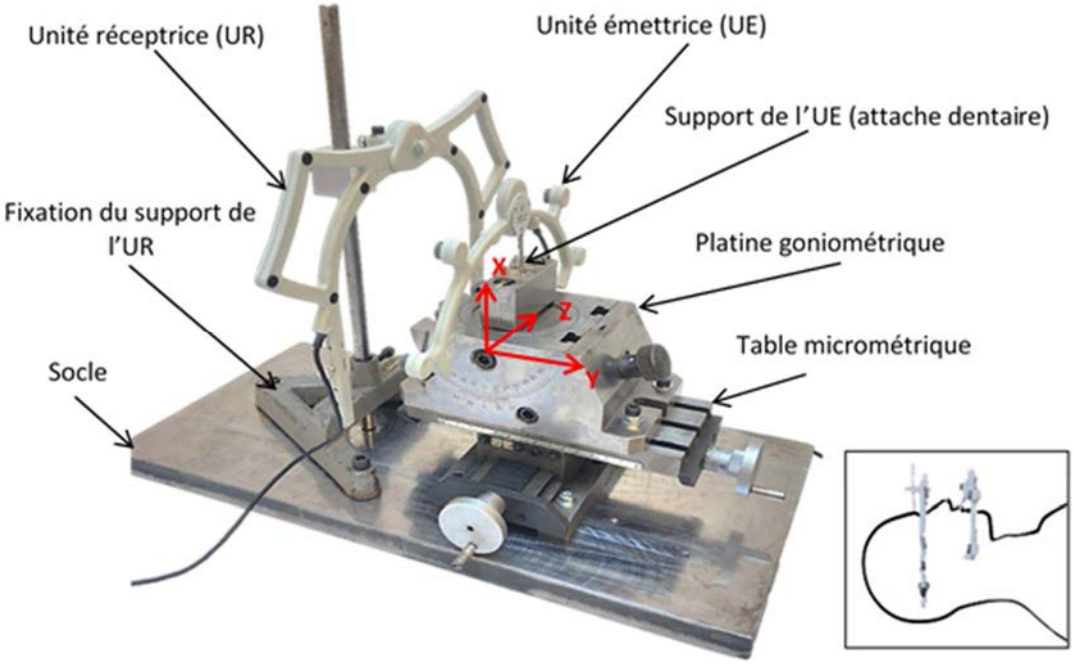


Figure 19 : Dispositif de référence pour l'évaluation de la précision du dispositif CMS20-JMA de Zebris Medical. Les valeurs de translation ou de rotation calculées à partir des données du dispositif sont comparées à celles imposées à l'aide de la table micrométrique ou de la platine goniométrique.

Pour créer les repères associés à la partie fixe et à la partie mobile du dispositif JMA, le logiciel d'acquisition impose de sélectionner quatre points non alignés (deux de ces points servant à la création des deux repères). Dans le cas présent, nous avons choisi des points qui couvrent une grande partie du volume de mesure formé lorsque les unités sont en vis-à-vis : il s'agit des quatre points correspondant à l'extrémité du pointeur positionné dans chacun des quatre emplacements de l'unité émettrice (les points extrêmes à gauche et à droite étant les deux points communs pour la création des repères associés aux parties fixes et mobiles – voir Figure 18). Le repère de travail est un repère associé au dispositif de référence et dont les axes correspondent aux mobilités imposées (Figure 19). Nous considérerons deux translations (le long des axes Y et Z du repère de travail) correspondant à la translation inféro-supérieure et la translation médiale-latérale de la mandibule par rapport au crâne lors de mesures sur l'humain,

et deux rotations (autour des axes X et Z du repère de travail) représentant respectivement l'inclinaison et la rotation intercondylienne.
Dans la suite de l'étude, nous nommerons ces différentes mobilités Ty, Tz, Rx et Rz. La précision du dispositif de référence est de ±0.1mm en translation, de ±0.5° pour Rz et ±1° pour Rx.

2.1. Conditions de réalisation de la mesure

Le dispositif JMA a l'avantage d'être léger et portatif ce qui permet d'envisager une utilisation dans différentes salles d'examen. Les conditions préconisées pour son utilisation sont une humidité relative de 30% au minimum et une température entre 10°C et 35°C. Par ailleurs, le dispositif doit être éloigné des surfaces pouvant réfléchir les ultrasons (verre, métal poli, carrelage, parquet, …) et des sources de chaleur ou de flux d'air (climatisation, radiateurs, ventilateurs).
Chateau et coll. [126] ont montré qu'une variation de température de 12°C à 28°C entraine des écarts relatifs de 3% selon la direction longitudinale à 10% selon la direction verticale sur les distances estimées entre émetteurs et récepteurs, dus à la variation de célérité des ultrasons dans l'air, pour un volume de mesure de 3m de long, 2m de large et 3m de haut. A notre connaissance, aucune étude n'a été effectuée pour tester l'influence de l'hygrométrie sur la mesure par les dispositifs Zebris utilisant une technologie ultrasonore.
Dans le cas présent, le volume de mesure est restreint (180mm de large et de long et 270mm de haut) et le temps d'acquisition est court (inférieur à 10 secondes). Nous supposerons donc qu'il n'y a pas de différences de température ou de taux d'hygrométrie dans le volume de mesure pendant la durée de l'acquisition. En revanche, nous pourrions nous attendre à des variations similaires à celles observées par Chateau et coll. [126] dans le cas de mesures répétées dans le temps sur un même sujet.

Château et coll. [126] ont également montré qu'un vent axial ou transversal entraîne une variation maximale de 30% sur la mesure de la position de l'émetteur à ultrason (composante verticale avec un vent axial). C'est pourquoi, nous souhaitons étudier l'influence de la respiration, qui provoque des flux d'air non constants et non uniformes dans le volume de mesure, sur la mesure du positionnement de l'unité émettrice. La respiration humaine génère un flux d'air se propageant à une vitesse variant de 0.5 à 2m/s [127]. Nous avons donc simulé

une respiration à débit constant à l'aide d'un ventilateur générant un flux d'air avec trois configurations d'étude (Figure 20) et trois vitesses (0.5m/s, 1m/s et 2m/s mesurées avec un anémomètre) :

- Test sur l'inspiration du sujet : souffle **D**ans la direction de propagation des ultrasons (D)
- Test sur l'expiration du sujet : souffle **C**ontre la direction de propagation des ultrasons (C)
- Test sur la respiration de l'opérateur qui est proche du sujet lors de mesures : souffle **P**erpendiculairement à la direction de propagation des ultrasons (P).

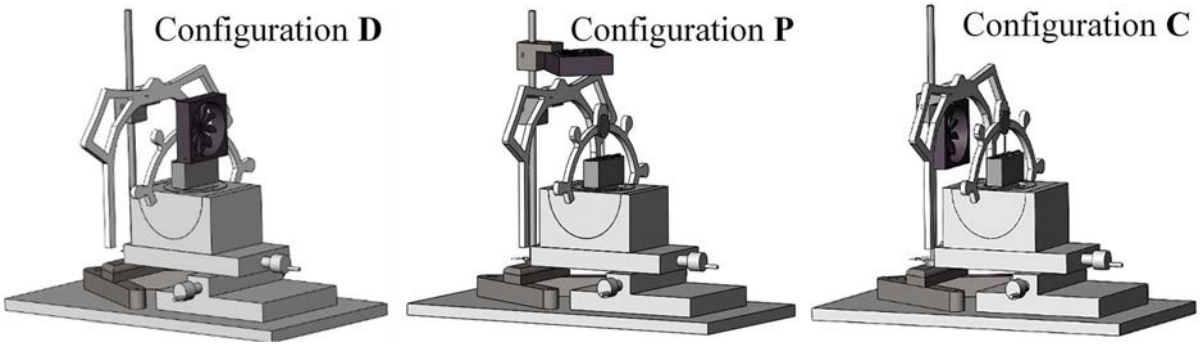


Figure 20 : Positionnement du ventilateur pour l'étude de la respiration sur le dispositif de référence

Trois essais sont effectués pour chaque vitesse et chaque configuration. Chaque essai consiste en l'enregistrement du signal pendant 60 secondes sans souffle, suivi par l'activation du ventilateur pendant 30 secondes. Pour chaque essai, nous observons la variation de position du repère associé à la partie mobile du dispositif JMA en calculant la distance entre son origine à l'instant considéré et l'origine au début de l'acquisition. Nous observons ensuite les résultats pour la valeur moyenne sur les 3 essais réalisés pour chaque configuration (Figure 21).

L'influence du souffle sur le signal est différente selon la configuration et la vitesse considérée. Pour les configurations P et C, il n'y a pas d'influence de l'activation du souffle sur le signal. Pour la configuration D, plus la vitesse de souffle est importante, plus le signal sera perturbé. Un souffle dans la direction de propagation des ultrasons, en accélérant l'impulsion ultrasonore, entraîne une surestimation de la distance entre émetteurs et récepteurs. Un écart absolu maximal de 0.12 mm est obtenu pour cette configuration à 2 m/s par rapport à la réponse du système avant mise en route du ventilateur.

Cependant, toutes ces valeurs restent dans la précision annoncée par le constructeur : l'écartement entre les deux unités pour l'ensemble étant de 60 mm, l'erreur attendue sur la distance estimée entre l'unité émettrice et l'unité réceptrice est de 0.15 mm (2.5‰ de la distance physique). De plus, la vitesse de souffle de 2m/s correspond à une respiration forcée, qui n'est

pas observée pendant les mesures sur les sujets. Ainsi, nous ne chercherons pas à appliquer de correction du signal liée à la respiration des sujets.

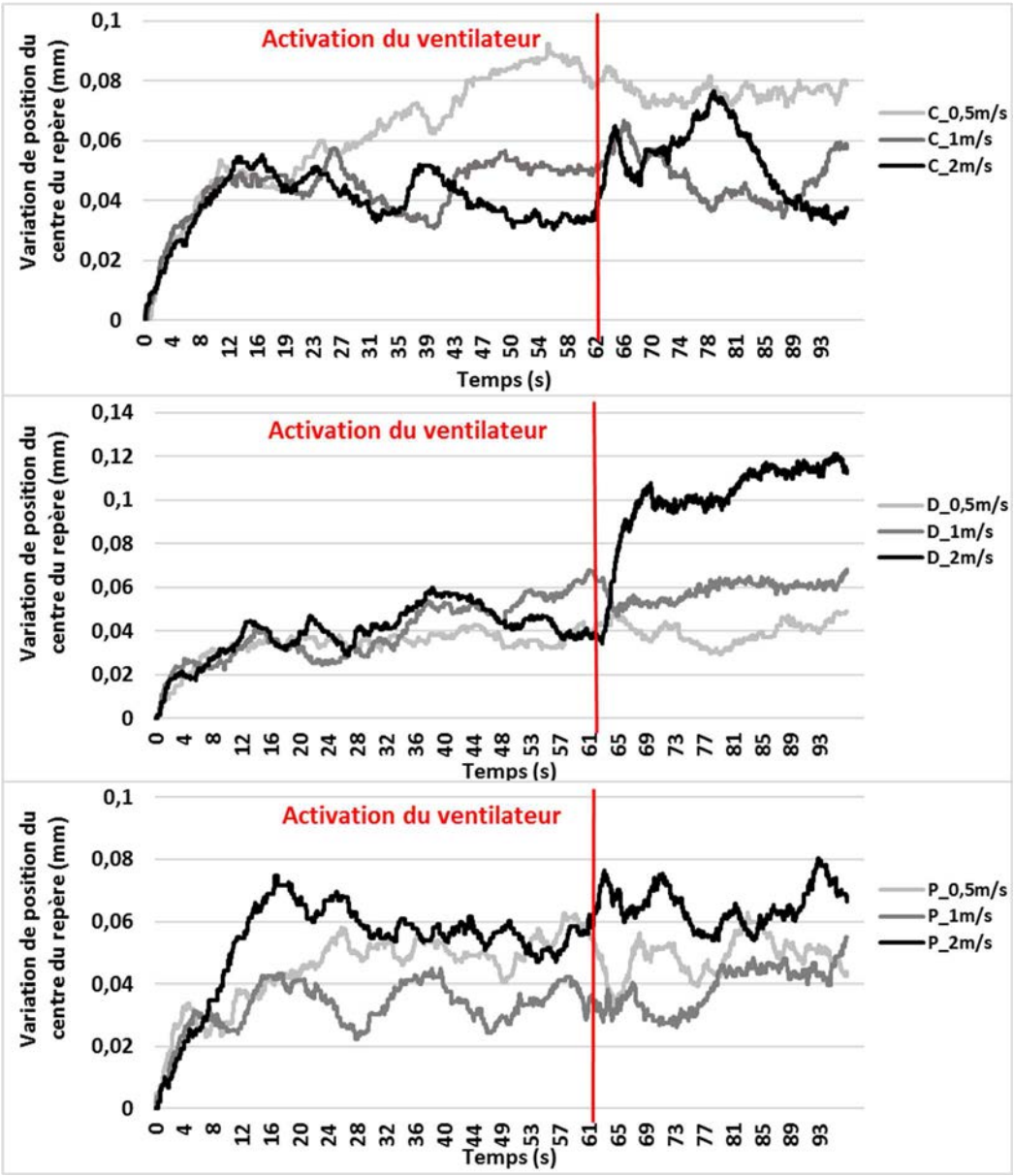


Figure 21 : Evolution de la distance moyenne (sur les trois essais de chaque configuration) du centre du repère de l'unité émettrice entre l'instant considéré et l'instant initial de l'acquisition, en fonction du temps d'enregistrement pour différentes configurations de souffle étudiées et vitesses associées. Configuration C : contre la propagation des ultrasons ; Configuration D : dans la direction de propagation des ultrasons ; Configuration P : perpendiculairement à la direction de propagation des ultrasons

Comme indiqué précédemment, les branches gauche et droite de l'unité réceptrice peuvent s'écarter ou se rapprocher pour s'adapter à la largeur de tête du sujet. Ceci a pour conséquence de modifier la position relative des récepteurs et donc le repère d'acquisition du dispositif.

Cependant, aucune calibration n'est explicitement requise avant les mesures. Nous avons donc étudié l'influence de l'écartement des branches de l'unité réceptrice sur les variations de positions de l'unité émettrice, en considérant trois écartements :

- Un écartement minimal correspondant à une largeur de tête d'environ 112mm.
- Un écartement intermédiaire, c'est-à-dire avec branches parallèles, qui correspond à une largeur de tête de 157mm. C'est la position choisie comme référence.
- Un écartement maximal correspondant à une largeur de tête de 187mm.

Les distances, entre la position initiale de l'unité émettrice (quantifiée par la position du centre du repère) et sa position à un instant donné, évaluées pour l'écartement maximal sont significativement différentes de celles obtenues dans les autres configurations (tests de comparaison multiples Kruskal-Wallis, $p<0.005$). Par ailleurs, nous avons observé qu'une calibration ne permet pas de corriger ces différences.

De plus, il est important de noter que l'utilisation de l'écartement maximal est rare, les largeurs de têtes relevées sur une quarantaine de sujets étant égales en moyenne à 157±13.1mm. Ces premiers résultats semblent donc justifier dans une certaine mesure de ne pas calibrer le dispositif de façon systématique avant chaque mesure cinématique.

Cette première partie a permis de quantifier l'effet de paramètres extérieurs, tels que la température, l'hygrométrie, la respiration, la variation de position relative des récepteurs et la calibration du système, sur la mesure de la position de l'unité émettrice par rapport à l'unité réceptrice. Compte-tenu de ces résultats, les mesures de précision ont été réalisées sur une même journée pour limiter l'impact de la variation de température et d'hygrométrie, avec un écartement intermédiaire des branches de l'unité réceptrice.

2.2.Précision dans le volume de mesure

La précision de chaque mobilité (Tx, Ty, Rx et Rz) est quantifiée individuellement en comparant la valeur calculée à partir des coordonnées de points fournies par le dispositif Zebris, à celle imposée par la table micrométrique ou la platine goniométrique.

Plus précisément, trois points sont identifiés à l'aide du pointeur positionné alternativement à gauche, à droite et au centre de l'unité émettrice (positions 4, 1 et 2 de la Figure 18 respectivement). Ces trois points suivent l'unité émettrice dans son mouvement. A chaque instant, un repère orthonormé R_{mobile} (O_{mobile}, $\mathbf{X_{mobile}}$, $\mathbf{Y_{mobile}}$, $\mathbf{Z_{mobile}}$) est créé à partir des

coordonnées de ces points. Les axes de ce repère ne sont pas coïncidents avec ceux du dispositif de référence. Par conséquent, les translations sont calculées comme le déplacement de l'origine du repère mobile entre deux instants : $\left\|\overrightarrow{O_{mobile}\,(t_i)O_{mobile}(t_{i+1})}\right\|$. Il est bien vérifié par ailleurs que les axes du repère mobile ne changent pas d'orientation pendant la translation. Les angles de rotation sont calculés à partir des trajectoires tridimensionnelles de l'origine du repère mobile obtenues à l'issue des rotations Rx et Rz. Une interpolation des moindres carrés est effectuée pour calculer les coordonnées du centre de la sphère ($O_{sphère}$) passant au plus près de l'ensemble des points (Figure 22).

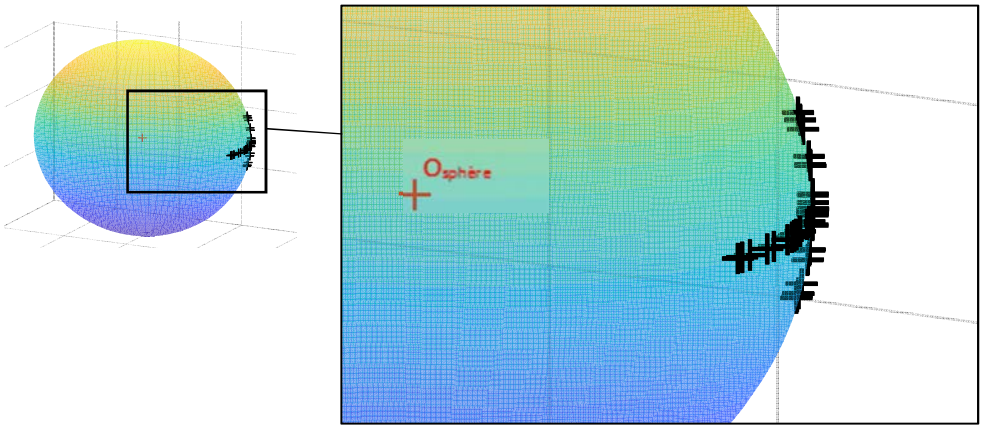


Figure 22 : Sphère englobant l'ensemble des points (en noir) issus des acquisitions de mouvements de rotation de l'unité émettrice. Calcul du centre de la sphère (en rouge) : $O_{sphère}$

Les angles sont ensuite calculés à partir du produit scalaire des positions linéaires successives de l'origine du repère mobile (Figure 23) :

$$angle\ (0) = 0\ et\ angle(t_{i+1}) = \frac{\cos^{-1}(\overrightarrow{O_{sphère}O_{mobile}(t_i)} \cdot \overrightarrow{O_{sphère}O_{mobile}(t_{i+1})})}{\left\|\overrightarrow{O_{sphère}O_{mobile}(t_i)}\right\| * \left\|\overrightarrow{O_{sphère}O_{mobile}(t_{i+1})}\right\|}$$

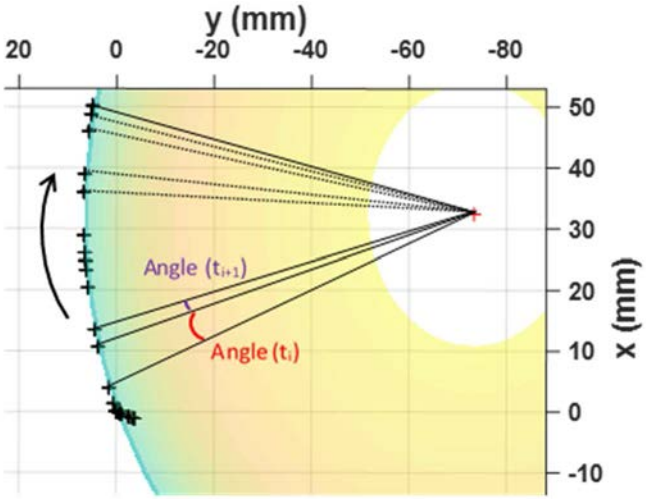


Figure 23 : Visualisation des angles de rotation calculés à partir du produit scalaire des positions linéaires successives de l'origine du repère mobiles (points noirs)

Pour quantifier l'effet de la position dans le volume de mesure sur la précision obtenue, des incréments de translation de 1mm, 2mm, 5mm et 10mm (ou de rotation de 1°, 2°, 5°et 10°) sont imposés quatre fois à quatre positions différentes dans la direction étudiée, et dans les deux sens (« aller » et « retour »). Ainsi, quatre incréments de déplacement (ou de rotation) sont imposés, chacun à quatre positions différentes du volume de mesure. Trois acquisitions sont réalisées pour chaque type de mouvement.
Finalement, la précision du dispositif JMA a été évaluée en calculant la moyenne des écarts entre les valeurs d'incréments obtenus et les valeurs d'incréments attendus des trois acquisitions réalisées, pour chacune des 30 positions en translation (16 dans la direction longitudinale et 14 dans la direction transversale) et des 32 positions en rotation.
L'effet de la position dans le volume de mesure sur la précision du dispositif a été testé en comparant les valeurs moyennes par un test de Spearman avec un niveau de significativité de 5%. La précision globale a été quantifiée en calculant l'intervalle de confiance à 95% des écarts absolus.

Dans la direction de propagation des ultrasons (translation longitudinale Ty), les écarts par rapport à la valeur vraie attendue varient de +0.06mm à -0.25mm (Figure 24). Nous observons une tendance à la sous-estimation des translations imposées ainsi qu'une augmentation de l'erreur nominale avec l'augmentation de l'incrément de translation imposé, à partir de 2mm. Proportionnellement à la taille de l'incrément, ce sont les petits incréments qui montrent les écarts les plus grands (-1.5% en moyenne pour les incréments de 1mm). Cependant, ces différences ne sont pas significatives (test de corrélation de Spearman, ρ=0.16, p=0.56). Concernant l'effet de la position dans le volume de mesure, nous observons des erreurs plus importantes pour des distances intermédiaires (entre 5mm et 30mm de la position de référence) par rapport à des configurations proches de celle de référence (entre 0 et 5mm de distance) ou au contraire très éloignées (>30mm). Bien que le porte-à-faux ait été limité au maximum, il est possible qu'il demeure une déformation du système pour les positions proches ou très éloignées, ce qui pourrait expliquer ces écarts. Cependant, ces différences dans l'espace ne sont pas significatives (test de corrélation Spearman, ρ=0.37, p=0.15). Par ailleurs, il n'y a pas de différence entre les incréments lors du mouvement aller et du mouvement retour.

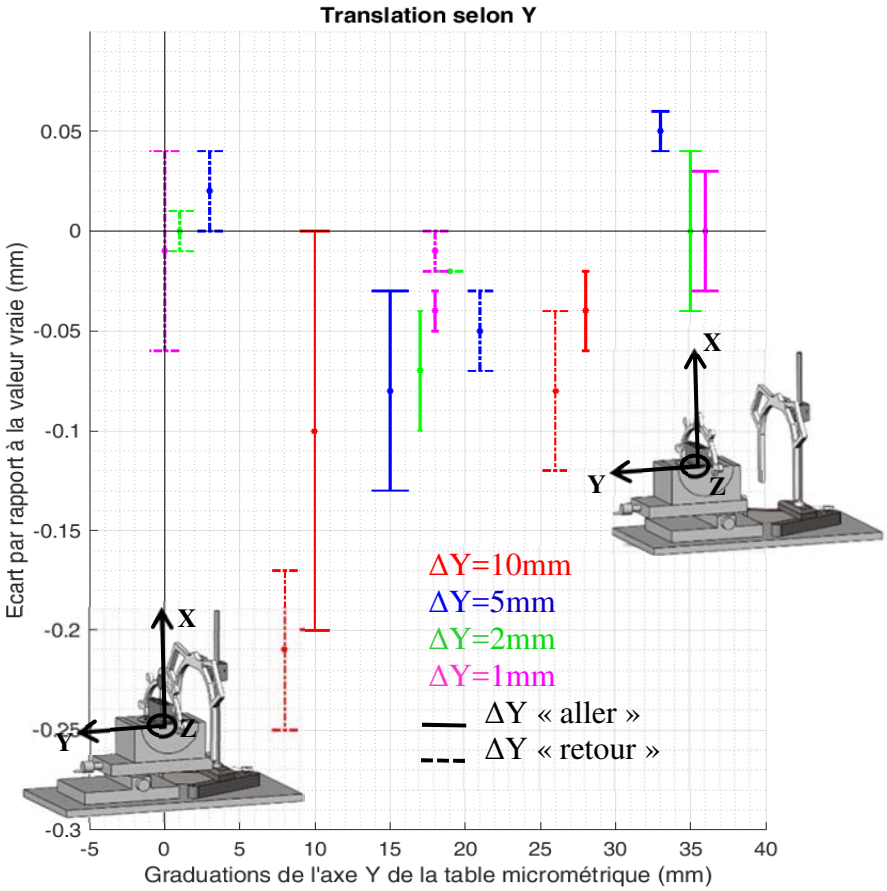


Figure 24 : Précision du dispositif CMS20-JMA lorsqu'on éloigne les deux unités du dispositif, dans la direction de propagation des ultrasons (translation longitudinale Ty). Visualisation des écarts (moyenne ± 1 écart-type) entre les déplacements fournis par le système CMS20-JMA et les translations imposées avec le dispositif de référence pour trois mesures successives. Quatre incréments ΔY sont imposés (1mm, 2mm, 5mm et 10mm) à différentes positions du volume de mesure le long de l'axe de translation, en éloignant les unités (« aller ») puis en les approchant de nouveau (« retour »).

Dans la direction perpendiculaire à la propagation des ultrasons (translation transversale Tz) (Figure 25), les écarts par rapport à la valeur vraie attendue varient de -0.18mm (pour le mouvement vers la droite) à 0.18mm pour le mouvement vers la gauche. La tendance globale observée dans cette direction est la surestimation des translations imposées. Les incréments les plus grands montrent des valeurs plus importantes (0.07±0.1mm pour ΔZ=10mm, 0.06±0.06mm pour ΔZ=5mm, 0.02±0.04mm pour ΔZ=2mm et 0±0.04mm pour ΔZ=1mm). Cependant relativement à la taille de l'incrément ces différences ne sont pas significatives (test de corrélation de Spearman, ρ=-0.18, p=0.53). Concernant l'effet de la position dans le volume de mesure, nous observons des erreurs plus importantes pour des distances intermédiaires (entre 5 et 20mm). Nous pouvons également remarquer que pour les incréments de 10mm et 5mm, les écarts ont tendance à être plus importants lors du mouvement « retour » sans pour autant être significatifs d'un point de vue statistique.

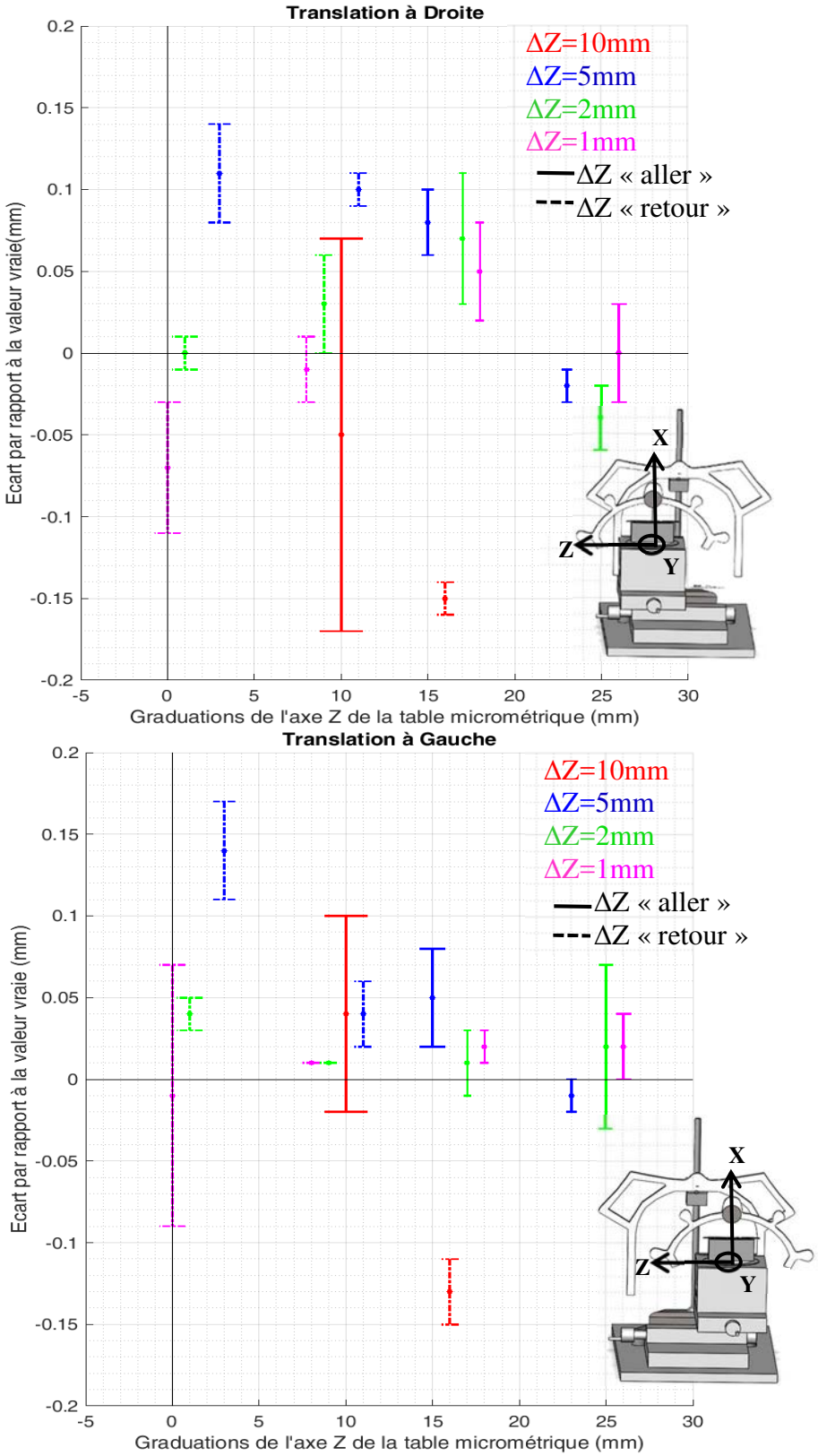


Figure 25 : Précision du dispositif CMS20-JMA lorsqu'on éloigne les deux unités du dispositif, perpendiculairement à la direction de propagation des ultrasons (translation transversale Tz). Visualisation des écarts (moyenne ± 1 écart-type) entre les déplacements fournis par le système CMS20-JMA et les translations imposées avec le dispositif de référence pour trois mesures successives. Quatre incréments ΔZ sont imposés (1mm, 2mm, 5mm et 10mm) à différentes positions du volume de mesure le long de l'axe de translation, en décalant les unités (« aller ») puis en les réalignant de nouveau (« retour »).

Concernant les rotations (Figure 26), autour de l'axe inféro-supérieur (RotationX) et autour de l'axe transversal (RotationZ), les écarts par rapport à la valeur vraie attendue sont respectivement de ±0.85° et ±0.35°. Nous observons une tendance à la sous-estimation des angles imposés pour Rx et à la surestimation pour Rz. Pour cette rotation Z, nous remarquons également que les incréments les plus grands (10°) montrent les écarts les plus importants (0.21°±0.06°), qui sont par ailleurs les plus grands lors du sens « retour ». Pour la rotation autour de l'axe X, ce sont également les grands incréments de 10° qui présentent les écarts les plus important par rapport à la valeur attendue, sans différenciation pour le sens du mouvement (aller ou retour). Relativement à la taille de l'incrément, c'est l'incrément de 2° qui montre les écarts les plus grands pour Rx alors que pour Rz c'est l'incrément de 1°. Cependant, ces différences ne sont pas significatives (test de corrélation de Spearman, ρ=0.06 pour Rx et -0.08 pour Rz, p=0.82 et 0.75). Il n'y a par ailleurs aucun effet de la position dans le volume de mesure.

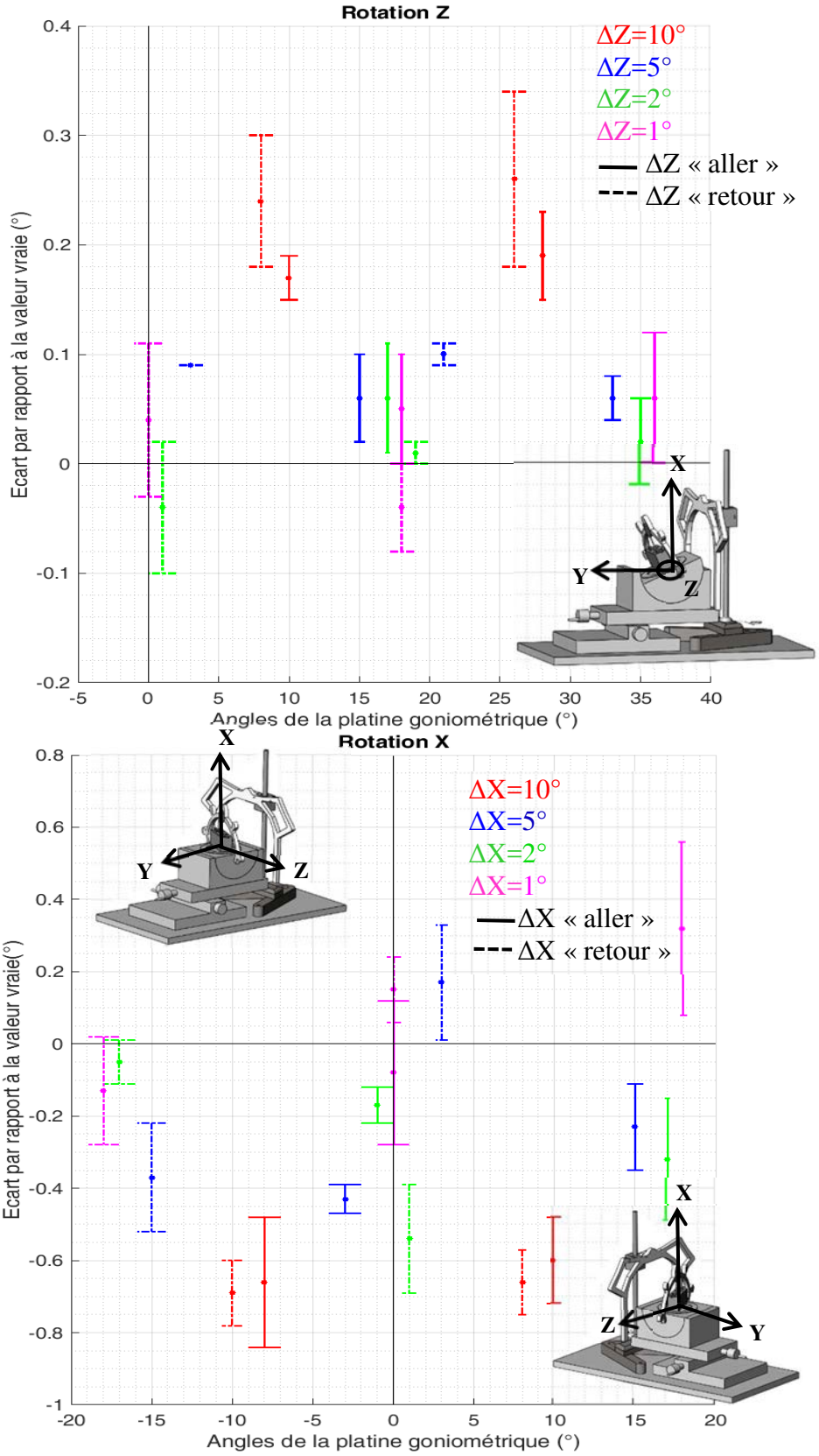


Figure 26 : Précision du dispositif CMS20-JMA lorsque l'on effectue une rotation de l'UE autour de l'axe transversal (Rotation Z) et de l'axe inféro-supérieur (Rotation X). Visualisation des écarts (moyenne ± 1 écart-type) entre les angles calculés à partir des données fournies par le système CMS20-JMA et les rotations imposées avec le dispositif de référence pour trois mesures successives. Quatre incréments ΔR sont imposés (1°, 2°, 5° et 10°) à différentes positions du volume de mesure autour de l'axe de rotation, dans deux sens différents (aller et retour)

Pour l'ensemble des mobilités, il n'existe pas de différences significatives entre incréments relativement à la taille de l'incrément. Par ailleurs, les différences observées dans le volume de mesure ne sont pas significatives. Nous pouvons donc combiner l'ensemble des valeurs obtenues, tous incréments confondus pour calculer la précision moyenne en translation : -0.04±0.07mm pour Ty, 0.01±0.07mm pour Tz et en rotation de -0.3±0.3° pour Rx et de 0.1±0.1° pour Rz (Tableau 6). De plus, après avoir vérifié la normalité des données nous avons calculé les intervalles de confiance à 95%.

Tableau 6 : Précision moyenne et intervalles de confiance du système CMS-20-JMA pour la mesure des mobilités en translation longitudinale (Ty) et latérale (Tz) et en rotation intercondylienne (Rz) et inclinaison (Rx).

	Moyenne	*Écart-type*	*Intervalle de confiance IC95%*
Ty (mm)	-0.04	0.07	[-0.054 ; -0.018]
Tz (mm)	0.01	0.07	[0.000 ; 0.028]
Rx (°)	-0.3	0.3	[-0.342 ; -0.161]
Rz (°)	0.1	0.1	[0.054 ; 0.104]

La moyenne des écarts absolus dans notre étude est de 0.05±0.05mm pour Ty, 0.05±0.04mm pour Tz, 0.33±0.25° pour Rx et 0.09±0.08° pour Rz.

La précision moyenne en translation est très proche des valeurs trouvées par Hugger et coll. [128], qui rapportent, pour notre système Zebris JMA, une précision de 104±14µm dans la direction transversale (Tz dans notre étude) et 166±13µm dans la direction longitudinale (Ty pour notre étude). La comparaison avec d'autres dispositifs permet de situer l'utilisation du système Zebris lors de l'étude de l'ATM. En effet, celle-ci peut être effectuée par différents systèmes : optoélectroniques avec une précision calculée entre 0.15° et 0.7° en rotation [105] et 0.27mm en translation [104]; électromagnétiques [129, 130] avec une précision de 0.8mm en translation et 0.15° en rotation. D'autres systèmes, comme les systèmes optiques présentent une précision de 0.07mm en translation [7, 118].

En conclusion, le système Zebris montre une précision acceptable pour la mesure des mobilités en translation et rotation, en comparaison avec les autres dispositifs, pour l'étude de la cinématique de l'articulation temporo-mandibulaire.

Dans un contexte d'utilisation du dispositif pour du suivi de patients, nous allons à présent nous intéresser à la répétabilité du protocole d'analyse cinématique, et en particulier à la répétabilité de l'enregistrement des « points anatomiques » caractéristiques de la morphologie du crâne et de la mandibule du sujet, et servant de base à la construction des repères de travail.

3. Répétabilité du pointage des « points anatomiques »

Les repères anatomiques associés au crâne et à la mandibule sont construits à partir des points anatomiques caractéristiques de l'anatomie de ces structures osseuses. Ces points sont identifiés par palpation à travers l'épaisseur de tissus mous. Une marque est faite sur la peau à la localisation choisie de chaque point à l'aide d'un crayon à maquillage, puis, leur position est enregistrée à l'aide du pointeur calibré, positionné sur le dispositif CMS20-JMA. C'est la phase dite « de pointage ». Le pointeur étant rigide, il peut être difficile d'être répétitif sur la pression exercée sur la peau avec la pointe du stylet. C'est pourquoi nous évaluons dans un premier temps la répétabilité et la reproductibilité intra-opérateur et inter-opérateur de la phase de pointage sur une tête rigide en polystyrène. La répétabilité et reproductibilité intra-opérateur de pointage sur l'humain est évaluée dans un second temps selon un protocole similaire. L'ensemble des calculs effectués ci-après sont issus de la norme ISO 5725.

3.1. Etude sur mannequin

Les mesures sur la tête en polystyrène ont été réalisées par deux étudiants lors de leur stage de Master 2 (DEFOSSEZ, K. & ZAPATA J. 2011). L'exploitation de ces mesures a été reprise pendant la thèse. C'est cette deuxième analyse qui est présentée ici.

Cinq points, similaires aux points anatomiques identifiés sur la tête de sujets humains, ont été marqués sur le mannequin (tête rigide en polystyrène). Pour évaluer la répétabilité à court terme d'un opérateur, chaque point est sélectionné plusieurs fois dans une acquisition, et plusieurs acquisitions sont réalisées le même jour (Figure 27). Pour évaluer la reproductibilité à long terme d'un opérateur, les mesures sont répétées le lendemain et 14 jours plus tard (Figure 27). L'ensemble de la procédure est réalisé par deux opérateurs différents pour évaluer la reproductibilité inter-opérateur.

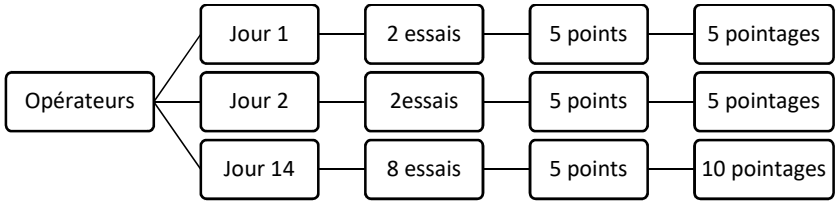


Figure 27 : Protocole de mesure de répétabilité sur le mannequin calibré, 2 opérateurs effectuent sur 3 jours différents un certain nombre d'essais composés d'un nombre de pointage des points sur le mannequin. L'étude des 2 opérateurs permet de quantifier la reproductibilité inter-opérateur, sur le jour 14 nous quantifions la reproductibilité intra-opérateur sur un temps court et enfin pour l'ensemble des essais nous calculons la reproductibilité intra-opérateur sur un temps long.

La tête en polystyrène est fixée sur la table de mesure par des rubans adhésifs afin de garantir une procédure identique pour tous les essais. Pour chaque essai, 5 « points anatomiques » sont sélectionnés plusieurs fois (« points-sélection ») (Figure 28).

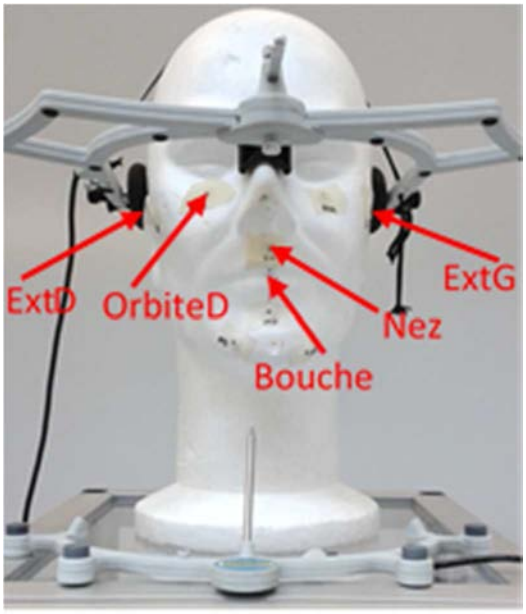


Figure 28 : Cinq « points anatomiques » sélectionnés sur la tête en polystyrène : ExtD et ExtG représentent les points extrêmes droit et gauche, OrbiteD représente la position d'un point sous orbital droit, Nez représente le point sous nasal et Bouche représente un point situé entre les « lèvres » du mannequin.

Pour chaque « point anatomique » nous calculons la distance maximale, notée R, entre le barycentre des points-sélection et les points eux-mêmes. R est considérée comme la variance maximale de pointage pour cet échantillon de données. Pour chaque opérateur la répétabilité de pointage est calculée en considérant l'ensemble des essais réalisés à J14 pour lequel le nombre de données est plus conséquent.

Nous calculons dans un premier temps la répétabilité par point anatomique puis pour tous les points confondus du pointage de chaque opérateur. Cette dernière valeur correspond à la reproductibilité de pointage intra-opérateur sur une journée (temps court). Ensuite nous évaluerons la reproductibilité d'un opérateur sur un temps long en calculant la variance des données obtenues pour tous les points pour un opérateur donné entre J0, J1 et J14. Et enfin nous calculerons la reproductibilité inter-opérateur en calculant la variance des données obtenues pour tous les points, tous les jours, pour les deux opérateurs.

3.1.1. Répétabilité du pointage par point anatomique et reproductibilité intra-opérateur sur un temps court

Pour la première partie de l'étude nous considérons les valeurs de R (R_{ij}) pour chaque essai (indice j) et chaque « point anatomique » (indice i) d'un opérateur donné.

Répétabilité du pointage par point S_i :

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_i}\left(R_{ij} - \bar{R}_i\right)^2}{n_i - 1}}$$

avec i l'indice du point anatomique étudié, n_i représente le nombre d'essais pour le point i (dans notre cas ce nombre vaut 8), et $\bar{R}_i$ représente la valeur moyenne des valeurs de R_{ij} sur l'ensemble des essais pour le point i.

La répétabilité du pointage par point (S_i) varie entre 0.09 et 0.36mm pour l'opérateur 1 et entre 0.10 et 0.31mm pour l'opérateur 2 (Figure 29).

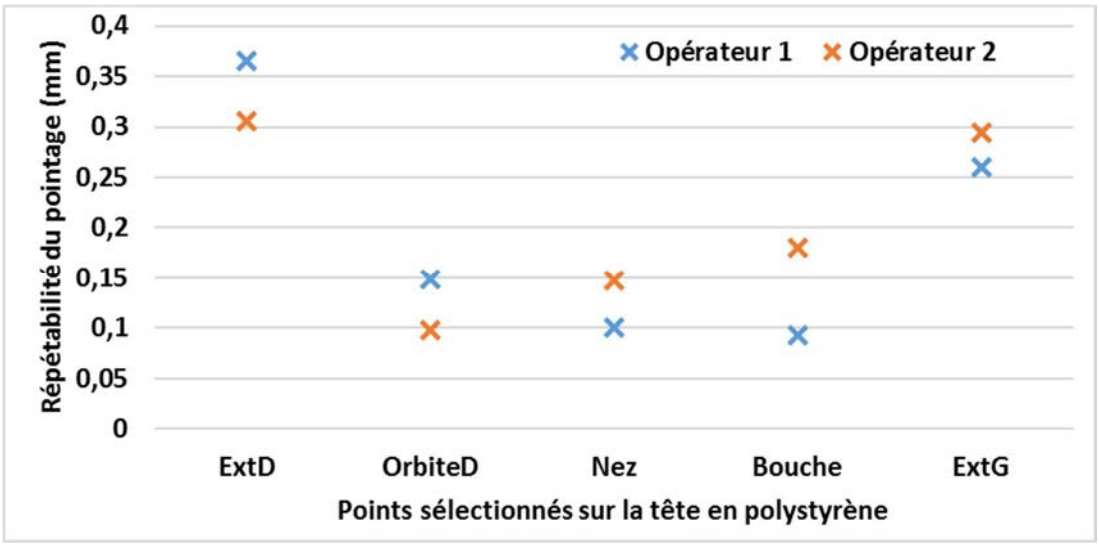


Figure 29 : Répétabilité du pointage par opérateur et par point. Les points sont ici répartis comme leur localisation sur le mannequin de droite à gauche

Pour les deux opérateurs, la répétabilité est la moins bonne pour les points extrêmes droit et gauche (ExtG et ExtD). Ces points correspondent aux points les plus en arrière sur la tête calibrée. Ils ne sont pas visibles directement par l'opérateur situé face à la tête, contrairement aux autres points. Ainsi, l'opérateur doit à la fois s'assurer du bon positionnement de la pointe du pointeur, tout en maintenant les unités en vis-à-vis et parallèles entre elles. Ceci pourrait expliquer la variance de pointage plus grande pour ces points.

La variance du pointage S_r^2 représente la moyenne des variances obtenues pour chaque point :

$$S_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{n_i}(R_{ij} - \bar{R}_i)^2}{p(n_i - 1)}$$, où p est le nombre de points anatomiques

L'écart-type Sr représente alors la reproductibilité d'un opérateur sur un temps court (sur une journée). Ceci n'est valable que si les variances de pointage de chaque point anatomique Si^2 précédemment calculées ne sont pas statistiquement différentes (norme ISO 5725-1). Ceci a été vérifié par le test de Levène au seuil α=0.05 (paramètre W=0.18<4.12 pour l'opérateur 1 et W=0.08<3.63 pour l'opérateur 2).

Sur l'ensemble des données obtenues au jour 14, nous obtenons alors une valeur moyenne des écarts sur l'ensemble des points et des essais du jour considéré ($\overline{\overline{R}}$) de 0.8mm pour l'opérateur 1 et de 0.6mm pour l'opérateur 2. Les deux opérateurs présentent une valeur de reproductibilité (S_r) de 0.22mm.

3.1.2. Reproductibilité intra-opérateur sur un temps long

La deuxième partie de l'étude concerne la reproductibilité dans le temps. Pour cela nous utilisons la moyenne des valeurs obtenues par un opérateur pour chaque point anatomique pour tous les essais réalisés sur une même journée (Rm_{ki}).

Puis nous calculons l'écart-type de reproductibilité. Comme le nombre de points anatomiques est le même pour chaque jour, la reproductibilité intra-opérateur S_R est calculée comme la racine de la somme de la variance par rapport à la moyenne globale et de la variance moyenne des données testées :

$$S_R = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{d}(\overline{Rm_k} - \overline{\overline{Rm}})^2}{d-1} + \frac{\sum_{k=1}^{d}\left(\frac{\sum_{j=1}^{p}(Rm_{ki} - \overline{Rm_k})^2}{p}\right)}{d}}$$

avec d le nombre de jours, p le nombre de points étudiés, $\overline{Rm_k}$ la moyenne des valeurs obtenues pour tous les points pour le jour k, et $\overline{\overline{Rm}}$ la valeur moyenne des écarts sur l'ensemble des points et des jours.

La valeur moyenne $\overline{\overline{Rm}}$ des écarts sur l'ensemble des points et des jours vaut 0.6mm pour l'opérateur 1 et 0.5mm pour l'opérateur 2. De plus, l'opérateur 1 est moins reproductible dans le temps que l'opérateur 2. Les valeurs de reproductibilité intra-opérateur S_R sur un temps long valent respectivement 0.26mm et 0.18mm.

3.1.3. Reproductibilité inter-opérateur

Enfin pour étudier la variabilité inter-opérateur, nous comparons l'ensemble des essais réalisés par les deux opérateurs par l'intermédiaire des valeurs moyennes R des écarts maximaux sur tous leurs essais :

$$S_L^2 = \frac{(o-1)\left(\frac{\sum_{l=1}^{o} p_l * \left(\bar{R}_l - \bar{\bar{R}}\right)^2}{o-1} - S_r^2\right)}{N - \frac{\sum_{l=1}^{o} p_l^2}{N}} \text{ avec } S_r^2 = \frac{\sum_{l=1}^{o}\sum_{i=1}^{p_l}(R_{li} - \bar{R}_l)^2}{N-o}$$

Avec p_l le nombre de points anatomiques pour l'opérateur l, o le nombre d'opérateurs, $\bar{R}_l$ la valeur moyenne des écarts sur l'ensemble des points anatomiques pour l'opérateur l, $\bar{\bar{R}}$ la valeur moyenne sur l'ensemble des opérateurs et des points anatomiques considérés et $N = \sum_{l=1}^{o} p_l$.
Nous obtenons une valeur de 0.04mm pour S_r^2 et un résultat négatif pour S_L^2 (-0.004). Cela signifie que la reproductibilité (S_R) est plus faible que la répétabilité (S_r) car ${S_L}^2 = {S_R}^2 - {S_r}^2$
Il y a donc plus de dispersion intra-opérateur qu'inter-opérateur. Ainsi nous pouvons considérer que le changement d'opérateur n'ajoute pas de variabilité dans le pointage lorsque celui-ci est effectué sur la tête indéformable en polystyrène.

3.1.4. Conclusion

En conclusion, l'écart-type de pointage sur une acquisition varie de 0.09mm à 0.36mm selon le point considéré, les points latéraux étant moins répétables que les points centraux. Ces différences demeurent cependant non significatives. La reproductibilité intra-opérateur sur une journée (temps court) et la reproductibilité intra-opérateur sur un temps long (2 semaines d'intervalle) sont du même ordre de grandeur (0.22mm vs 0.18mm - 0.26mm). Ce résultat est principalement lié au fait que les points sont marqués une seule fois sur la tête en polystyrène ; seule l'opération de pointage est répétée. Chez l'humain, nous pourrions donc nous attendre à une moins bonne reproductibilité sur un temps long dans la mesure où la variance sur le pointage des points anatomiques viendrait s'ajouter à la reproductibilité quantifiée ici. L'ensemble de ces valeurs nous semble en tous cas acceptable au regard de la dimension du rayon de l'extrémité du pointeur utilisé pour l'enregistrement de la position des points (1.5mm). Enfin, le changement d'opérateur n'ajoute pas de variabilité dans l'opération de pointage, dans le cas présent d'une tête rigide avec des points caractéristiques déjà marqués. Ceci montre que les consignes de pointage sont bien compréhensibles par les opérateurs. Il serait intéressant cependant de confirmer ce résultat en incluant davantage d'opérateurs.

3.2.Etude sur l'humain

41 sujets sont étudiés (23 hommes et 18 femmes, de 22 à 64ans, pour une moyenne d'âge de 37.3ans). Pour chaque sujet, nous identifions une fois 14 points anatomiques de la mandibule, nous plaçons une marque sur le sujet à l'emplacement choisi à l'aide d'un crayon à maquillage, et nous enregistrons la position de ces points 3 fois consécutives. Lors de l'enregistrement de la position des points anatomiques avec le dispositif CMS-20-JMA, la consigne est donnée d'appuyer sur la peau avec le pointeur pour s'approcher des surfaces osseuses. Le sujet a pour consigne de garder les dents en contact pendant toute la durée du pointage afin de ne pas changer la position de sa mandibule. Les mesures ont été réalisées par le même opérateur, et à des dates différentes sur une durée totale d'environ 8mois.

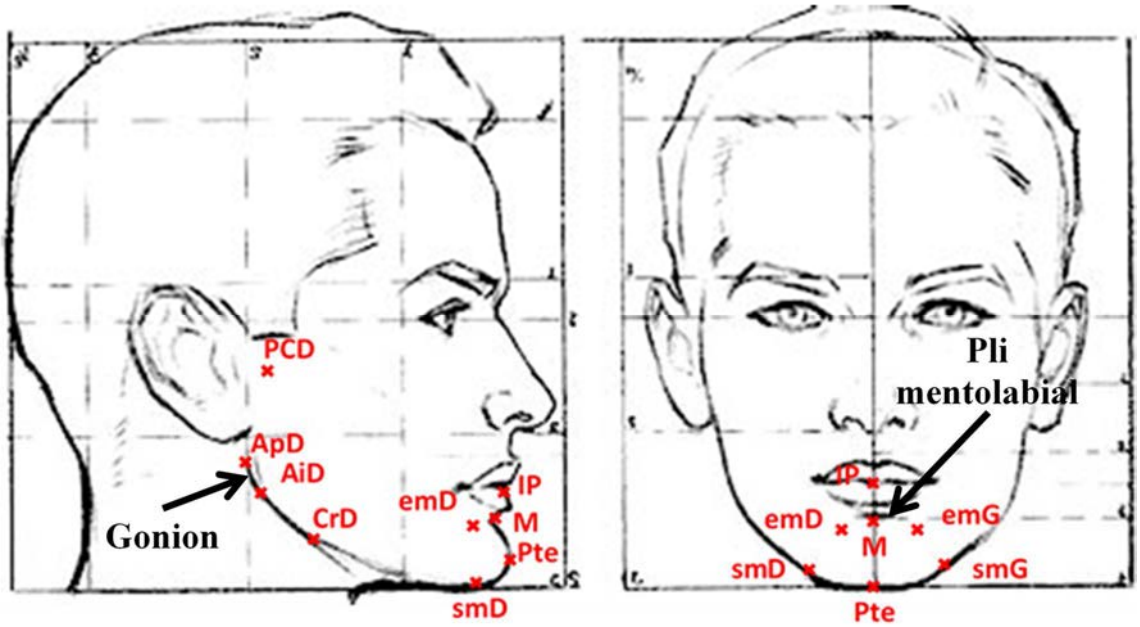


Figure 30 : Points anatomiques de la mandibule utilisés pour le calcul de la répétabilité de de pointage sur 41 sujets, (figure vierge d'après [131])

Les 14 points anatomiques de la mandibule (Figure 30) sont les suivants :

- Les « pôles condyliens » : PCG et PCD. Saillies osseuses palpées pendant des petits mouvements d'ouverture de la bouche du sujet. Le point représente la position du condyle en bouche fermée, c'est le point le plus externe du condyle mandibulaire.
- Les points postérieurs des angles de la mandibule : ApG et ApD. Ces points sont les points les plus postérieurs du gonion (angle mandibulaire)
- Les points inférieurs des angles de la mandibule : AiG et AiD. Ces points sont les points les plus inférieurs du gonion
- Les points situés dans les creux de la mandibule : CrG et CrD

- Le point mentolabial sulscus : M. C'est le point central du pli mentolabial
- Les points emG et emD. Ce sont les extrémités inférieures gauche et droite du pli mentolabial.
- Les points smG et smD. Ce sont les points situés sur le bord inférieur de la mandibule et dans le prolongement du pli mentolabial.
- La pointe du menton : Pte. Anatomiquement, ce point est appelé gnathion. C'est le point le plus en avant du menton.

Pour ces 14 points anatomiques, nous déterminons comme précédemment les coordonnées du barycentre des 3 points-sélections puis la distance maximale R_{mi} (répétabilité du pointage pour chaque sujet m et chaque point anatomique i).

La variance du pointage par sujet correspond à la dispersion calculée pour tous les points d'un même sujet :

$$S_m^2 = \frac{\sum_{i=1}^{p_m}(R_{mi} - \overline{R_m})^2}{p_m - 1}$$

avec p_m le nombre de points anatomiques du sujet m (constants pour chaque sujet et égal à 14) et $\overline{R_m}$ la valeur moyenne des R_{mi} sur l'ensemble des points du sujet m.

L'écart-type du pointage S_m varie selon le sujet entre 0.30 et 0.97mm avec une moyenne de 0.55mm ± 0.13mm (Figure 31). Les différences observées entre sujets ne sont cependant pas significatives (test de Levène avec un paramètre de test W = 0.44 < 1.42).

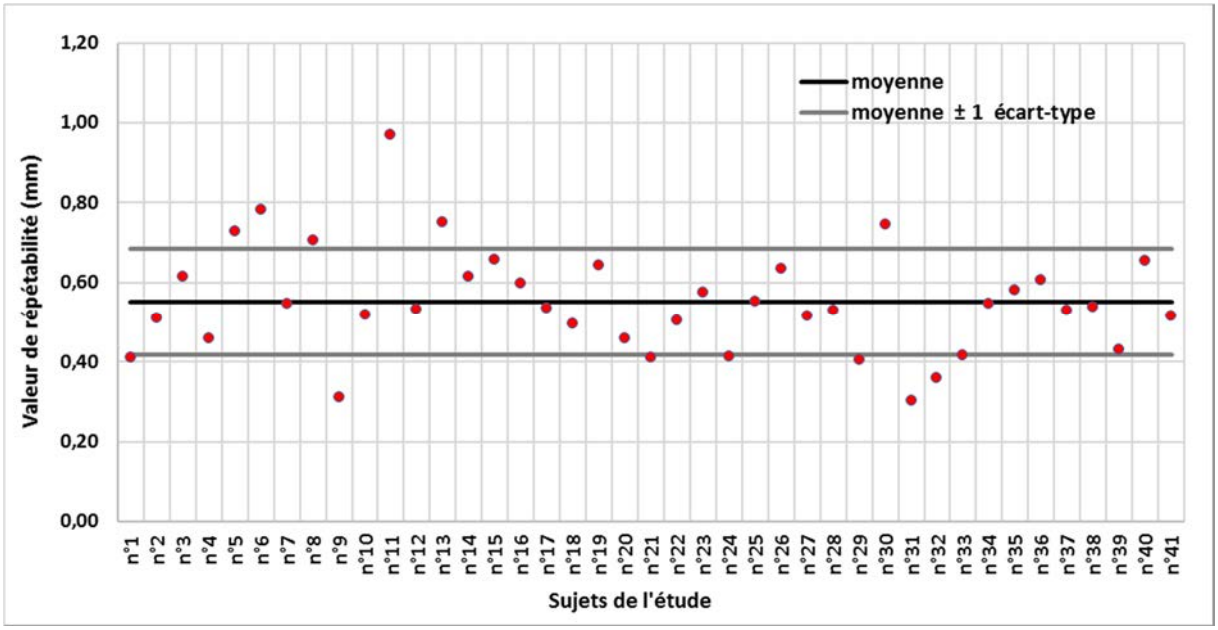


Figure 31 : Répétabilité du pointage par sujet

La variance intra-opérateur du pointage est la valeur moyenne des variances obtenues pour chaque sujet :

$$S_r^2 = \frac{\sum_{m=1}^{s}\sum_{i=1}^{p_m}(R_{mi} - \overline{R_m})^2}{s(pm-1)} \quad \text{avec } s \text{ le nombre de sujets.}$$

L'écart-type de pointage (Sr) obtenu pour cet opérateur est de 0.57mm, pour une valeur moyenne globale des écarts (tous les sujets et tous les points confondus) de 1.44mm.

La variance de la méthode inclut la variabilité pour tous les sujets et tous les points, par rapport à la valeur moyenne globale $\bar{\bar{R}}$ de 1.44mm :

$$S_R = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^{s}(\overline{R_m} - \bar{\bar{R}})^2}{s-1} + \frac{\sum_{m=1}^{s}\sum_{i=1}^{pm}(R_{mi} - \overline{R_m})^2}{s * pm}}$$

L'écart-type S_R représente la reproductibilité intra-opérateur quel que soit le sujet, le point ou le pointage et vaut 0.57mm. Cette valeur est égale à la répétabilité moyenne obtenue pour les sujets (S_r calculée précédemment), ce qui signifie que le changement de sujet n'ajoute pas de variabilité à celle qui existe entre les points anatomiques. Par ailleurs, la reproductibilité intra-opérateur sur sujet humain représente plus du double de celle observée sur le mannequin. Cela montre bien l'influence des tissus mous sur l'étape de pointage.

La dispersion de pointage entre sujets étant faible par rapport à la dispersion du pointage entre points anatomiques, nous étudions les différences de répétabilité de pointage entre ces points anatomiques considérés (Figure 32).

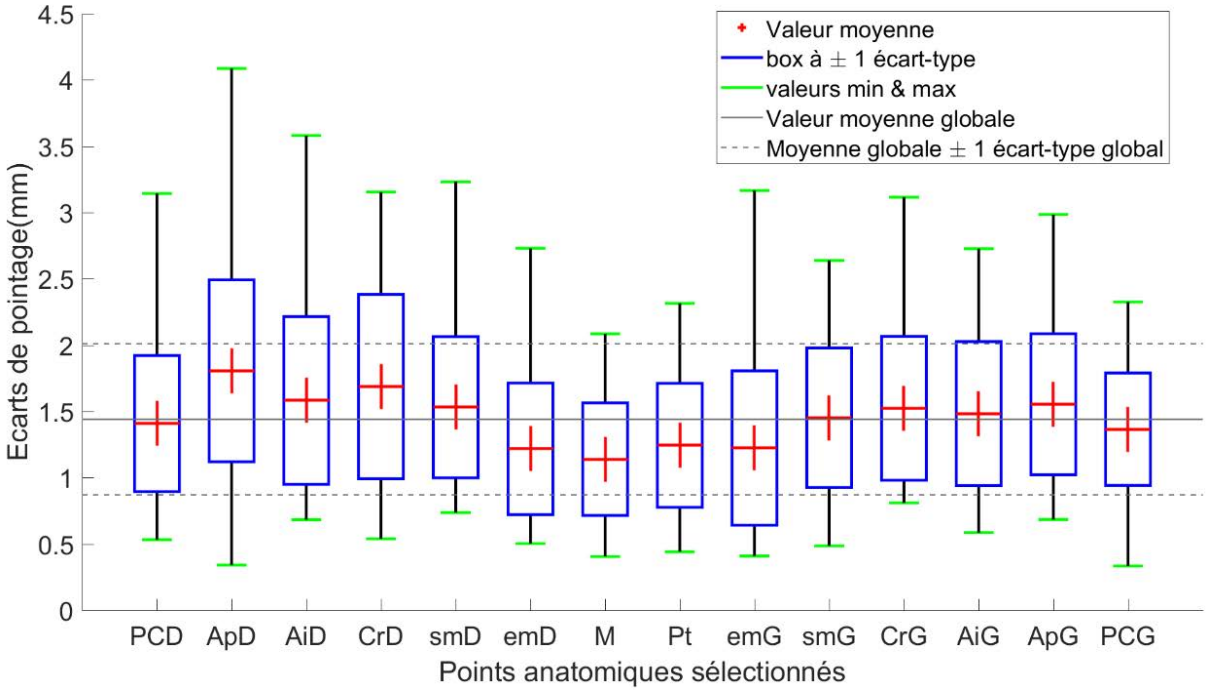


Figure 32 : Répartition des écarts de pointage en fonction des points anatomiques

On retrouve une valeur moyenne globale de 1.44mm ±0.57mm. Ainsi, 95% des points-sélection se situent à une distance inférieure à 2.58mm du point barycentre.
Comme ce que nous avions observé sur le mannequin, les points les plus répétables sont les points centraux : M, Pt, emD et emG. En revanche, contrairement à ce qui avait été observé pour le mannequin, le pointage des pôles condyliens PCD et PCG est réalisé avec une valeur moyenne qui se situe dans la moyenne basse d'écart de pointage pour la majorité des sujets (malgré une valeur maximale importante pour le point PCD). Les points les moins répétables (ApD, ApG, AiD, AiG, CrD, CrG, smD et smG) se situent sur le bord inférieur de la mandibule où l'épaisseur de tissus mous n'est pas négligeable [132]. De plus, nous cherchons à obtenir à ces endroits, un point se situant en fait sur une surface arrondie. Les valeurs maximales sont plus importantes à droite qu'à gauche, ceci pouvant être expliqué par exemple par la main dominante de l'opérateur. Le pointage à droite sur le sujet se fait principalement de la main gauche de l'opérateur. L'opérateur étant droitier, ceci pourrait expliquer cette légère différence entre les deux côtés.

Nous avons pu mettre en évidence les points les plus répétables lors de la phase de pointage qui pourront donc être utilisés pour la création du repère anatomique mandibulaire. Néanmoins il est important de vérifier si ces points sont toujours le meilleur choix dans le cas du pointage avec l'empreinte dentaire.

3.3. Influence de l'empreinte sur le positionnement de la mandibule

Les mesures cinématiques s'effectuent alors que le sujet a une empreinte dentaire collée sur les dents de la mandibule pour tenir l'unité émettrice. Nous tentons toujours d'éviter toute gêne venant de cette empreinte, néanmoins cette dernière pourrait perturber la position d'occlusion dentaire. L'objectif de cette partie est de savoir si l'empreinte dentaire qui est réalisée modifie significativement la position d'occlusion, compte tenu de la répétabilité de pointage quantifiée précédemment.

3.3.1. Répétabilité du pointage lorsque l'empreinte est collée sur les dents

La répétabilité du pointage avec l'empreinte collée sur les dents est quantifiée selon la même méthode que celle présentée précédemment, en considérant les mêmes points identifiés sur les mêmes sujets et visualisée sur la Figure 33. Après avoir vérifié l'homogénéité des variances, nous avons pu calculer la répétabilité globale du pointage dans cette configuration. La valeur de 1.54±(2*0.65)mm ainsi obtenue est plus importante que pour le pointage sans l'empreinte de 1.44±(2*0.57)mm.

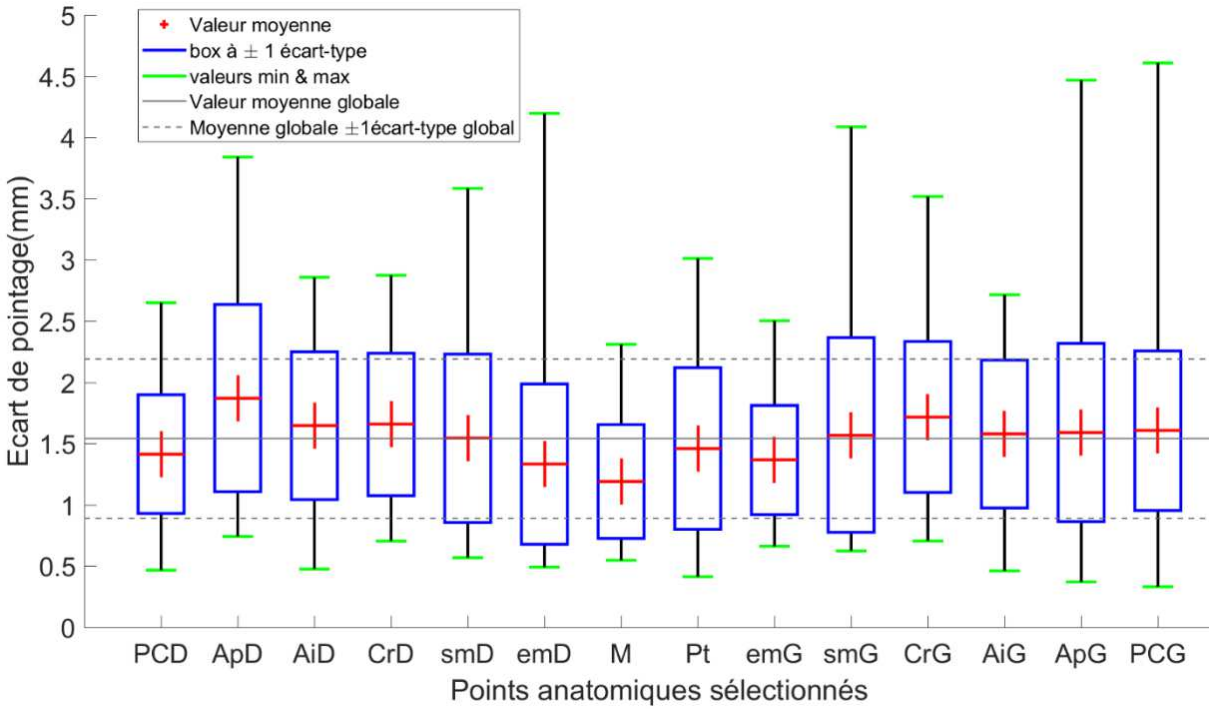


Figure 33 : Répartition des écarts de pointage par point pour le pointage avec empreinte

Comme pour le pointage sans empreinte, le pointage avec empreinte montre des points plus répétables, en particulier PCD, M, Pt. Contrairement à la configuration sans empreinte, le point PCG est plus marqué par la variabilité. En effet, ce point présente les valeurs les plus extrêmes, mais avec une valeur moyenne qui reste dans la variabilité moyenne globale de l'ensemble des points. Bien que les valeurs maximales du pointage avec empreinte soient généralement plus importantes que pour le pointage sans empreinte, la tendance générale des valeurs moyennes des écarts et écarts-types reste du même ordre de grandeur entre les deux pointages (Figure 34).

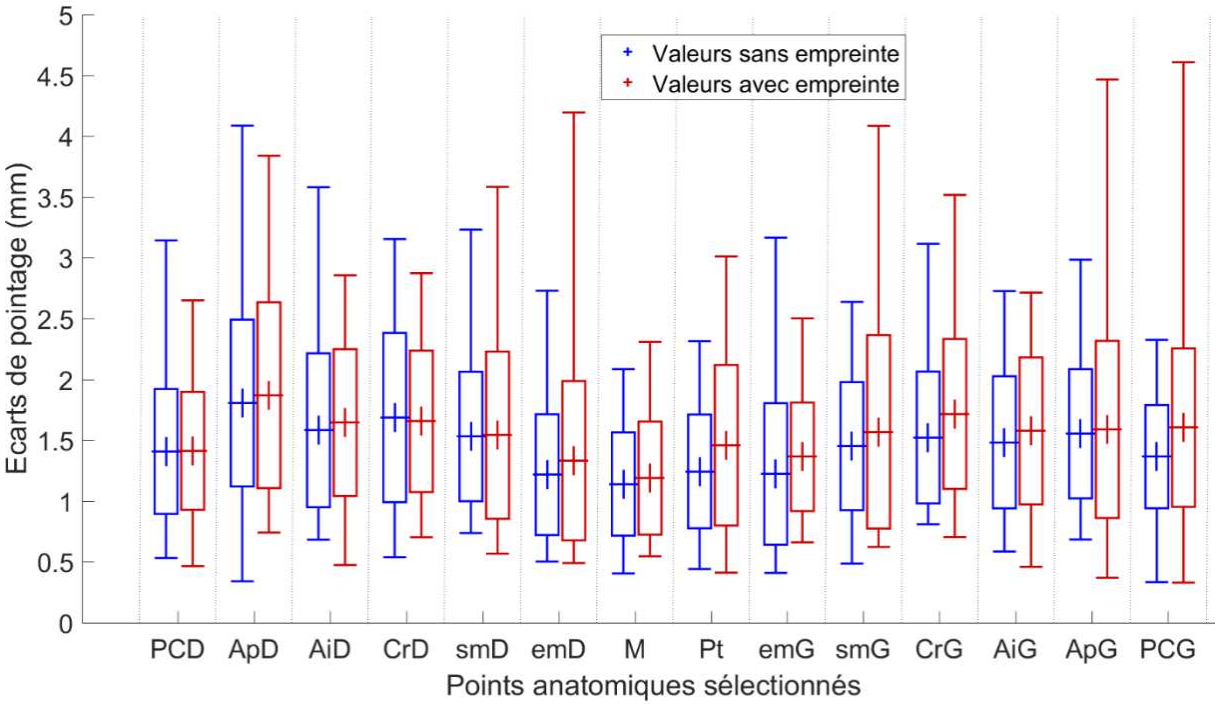


Figure 34 : Etude par point de la variabilité de chaque pointage (en rouge avec l'empreinte, en bleu sans l'empreinte), valeur moyenne plus ou moins 1 écart-type et valeurs extrêmes

3.3.2. Différence de positionnement de la mandibule liée à la mise en place de l'empreinte dans la bouche

La distance entre le barycentre des points pointés avec empreinte et celui des points pointés sans empreinte est en moyenne de 2.0±1.1mm (de 0.1mm à 5.9mm) tous points confondus. Les points les plus touchés sont situés sur le menton (M, emD, emG), le positionnement des chairs étant perturbé par la présence de l'empreinte et de la tige de maintien de l'unité émettrice du dispositif JMA. Nous observons une différence relativement faible sur le positionnement des pôles condyliens lorsque l'empreinte est collée sur les dents par rapport à leur position sans empreinte (Figure 35). Pour tester si la différence de positionnement de la mandibule avec empreinte par rapport à la configuration sans empreinte est significative, nous utilisons la méthode de Bland et Altman basée sur la distribution des deux séries. Pour cela, nous travaillons sur les valeurs moyennes (de l'ensemble des points) d'erreurs maximales pour l'ensemble des sujets [133]. Pour chaque sujet, cette valeur moyenne avec l'empreinte et la valeur moyenne d'erreur maximale sur le pointage sans l'empreinte sont recueillies, puis nous calculons la moyenne et la différence entre ces deux valeurs.

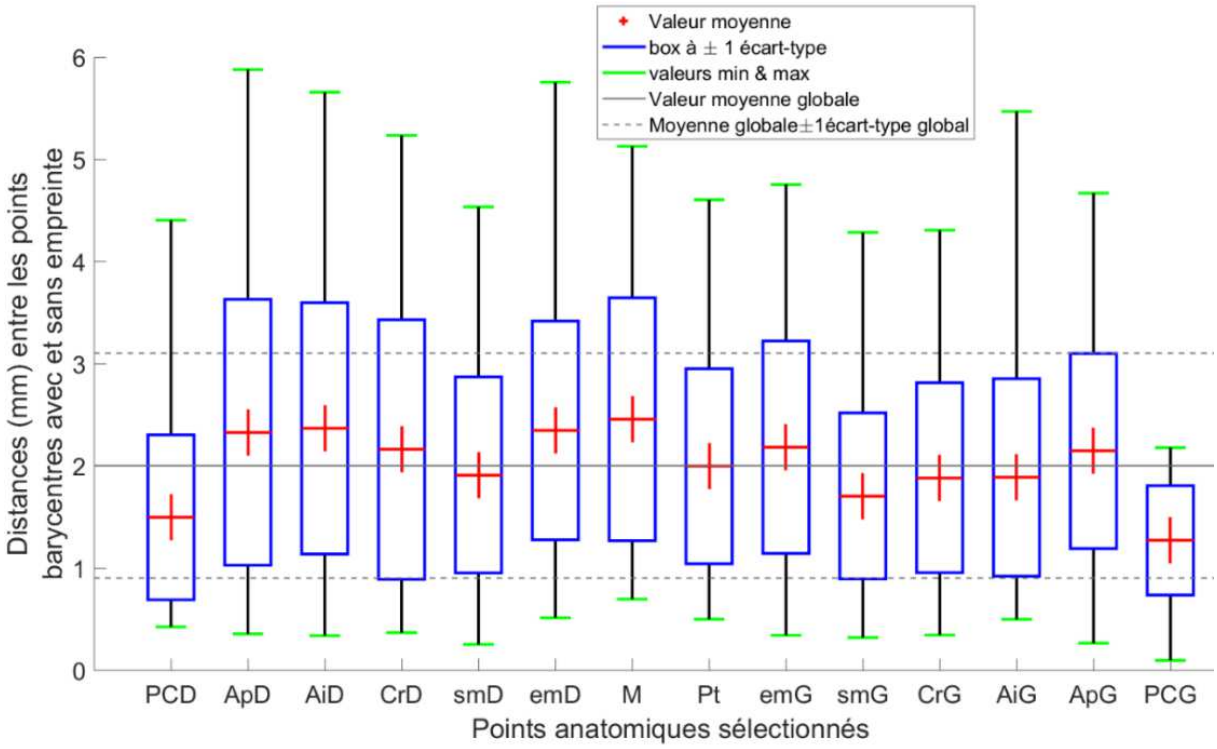


Figure 35 : Répartition par point anatomique de la distance entre le point barycentre obtenu lors d'un pointage sans empreinte dentaire et celui obtenu avec empreinte dentaire

La moyenne des différences obtenues représente le biais et vaut -0.1mm, signifiant que le pointage sans empreinte tend à produire systématiquement des écarts plus faibles que le pointage avec empreinte. L'écart-type des différences représente la variabilité et vaut 0.28mm. La moyenne des valeurs absolues des différences représente la précision. Nous pouvons donc dire que 95% des différences sont comprise entre -0.65 et 0.46mm avec une précision de 0.23mm. De plus, après avoir vérifié la normalité des données (test de Kolmogorov-Smirnov, $p = 0.676>0.05$) un test de comparaison de moyenne pour chaque point anatomique montre que la différence de positionnement de la mandibule avec et sans empreinte n'est pas significative.

En conclusion, nous avons évalué que les pointages avec empreinte et sans empreinte montrent une répétabilité du même ordre de grandeur avec une meilleure répétabilité sans empreinte (1.44±2*0.57mm sans empreinte et 1.54±2*0.65mm avec empreinte). De plus, il existe une différence de position de la mandibule lorsque l'empreinte est en bouche : 2mm en moyenne tous points confondus mais de l'ordre de 1.5mm en moyenne pour les points condyliens. Cette différence de positionnement n'est cependant pas significative compte tenu des valeurs de répétabilité. C'est pourquoi, dans notre exploitation des résultats nous identifierons les points anatomiques caractéristiques sans empreinte dans la bouche car ceci est plus facile à réaliser.

4. Conclusion

Une étude globale du dispositif de mesure CMS20-JMA de Zebris Medical a été effectuée. Cette étude a permis de quantifier la précision du système de mesure et la répétabilité du protocole et en particulier du pointage des points anatomiques permettant de créer les repères pour l'étude cinématique.

L'étude du pointage a permis de quantifier la répétabilité de l'opérateur formé. La répétabilité générale du pointage sur sujet humain est de 1.44±0.57mm tous points considérés. Cependant certains points semblent plus répétables que d'autres : les points centraux du menton, et notamment le point M (répétabilité de 1.14±0.42mm), ainsi que les pôles condyliens (1.41±0.51mm pour PCD et 1.37±0.42mm pour PCG). Ces points ont donc été choisis pour la création du repère mandibulaire.

La suite du travail consiste donc à proposer une méthodologie pour l'analyse de la cinématique mandibulaire et à évaluer l'influence de l'écart de pointage sur l'exploitation cinématique, plus précisément sur la création des repères d'étude.

CHAPITRE 3 :

Mise en place d'une méthode d'analyse de la cinématique mandibulaire

Comme présenté dans le chapitre de bibliographie, il n'existe pas, à ce jour, de méthode normalisée pour étudier la cinématique de la mandibule. Pour effectuer cette analyse, l'utilisation d'un repère crâne et d'un repère mandibule est nécessaire.

Nous décrirons donc tout d'abord les points anatomiques utilisés et la méthode de construction des repères anatomiques. Nous présenterons ensuite la méthode d'analyse 3D des mouvements de la mandibule en décrivant la transformation géométrique utilisée ainsi que les différentes étapes permettant d'effectuer le calcul des six mobilités de la mandibule. Nous présenterons ensuite le protocole de mesures, les mouvements étudiés, ainsi que la méthode de post-traitement de ces acquisitions. Enfin, nous finirons par présenter le travail réalisé pour le choix des paramètres cinématiques.

1. Construction des repères anatomiques

L'objectif de l'analyse cinématique est d'étudier le mouvement de la mandibule par rapport au crâne en déterminant l'évolution de ses six degrés de liberté au cours de mouvements simples de la bouche. La mandibule et le crâne étant des structures osseuses rigides, les outils de la cinématique sont appropriés pour ce type d'analyse.

Un premier travail avait alors consisté à considérer des points sur les dents, aussi bien pour le maxillaire que pour la mandibule, pour créer les repères anatomiques qui soient directement liés à ces structures osseuses. Les points sélectionnés étaient un point entre les premières incisives gauche et droite, un point de la première molaire gauche et un point de la première molaire droite. Les résultats ont montré que ces points sont trop proches les uns des autres pour caractériser correctement la position, et en particulier l'orientation, de la mandibule par rapport au crâne. Le choix s'est alors porté sur l'identification d'autres points caractéristiques des structures osseuses, palpables au travers de la peau. L'enregistrement de la position de ces points dépend alors de l'épaisseur de tissus mous présents, comme nous l'avons montré dans le chapitre précédent : la reproductibilité intra-opérateur est plus que doublée pour les mesures sur humains par rapport aux mesures sur mannequin.

Dans de très nombreuses études, les repères crâniaux utilisés sont basés sur le plan de Francfort [117] ou le plan de Camper [62], avec une utilisation des points tragi à la place des points du méat acoustique. Cependant, comme nous l'avons montré dans le chapitre 1, les repères des différentes études peuvent être créés de diverses façons.

Dans notre étude, pour créer le repère crâne, nous utilisons les points suivants (Figure 36) :

- Le Tragus supérieur droit (TD) et le tragus supérieur gauche (TG) qui sont des points de l'extrémité supérieure du tragus. Les tragi présentent le défaut d'être positionnés sur une structure cartilagineuse donc non osseuse, mais en revanche, ce sont des points facilement localisables et accessibles sur les sujets. De plus, ils permettent de définir des points extrêmes en latéralité.
- Le point sous-orbital droit (SoD). Les points sous-orbitaux sont les points les plus bas de la saillie osseuse sous la paupière inférieure. Le choix du point situé à droite s'effectue de façon arbitraire. Ce point permet, associé aux tragi, de définir un plan horizontal du crâne.
- Le point sous-nasal (SN) qui est un point situé à la base du nez.

- Le point interincisif maxillaire (IPmx) qui est le point le plus bas situé à la jonction entre les 2 incisives du maxillaire.

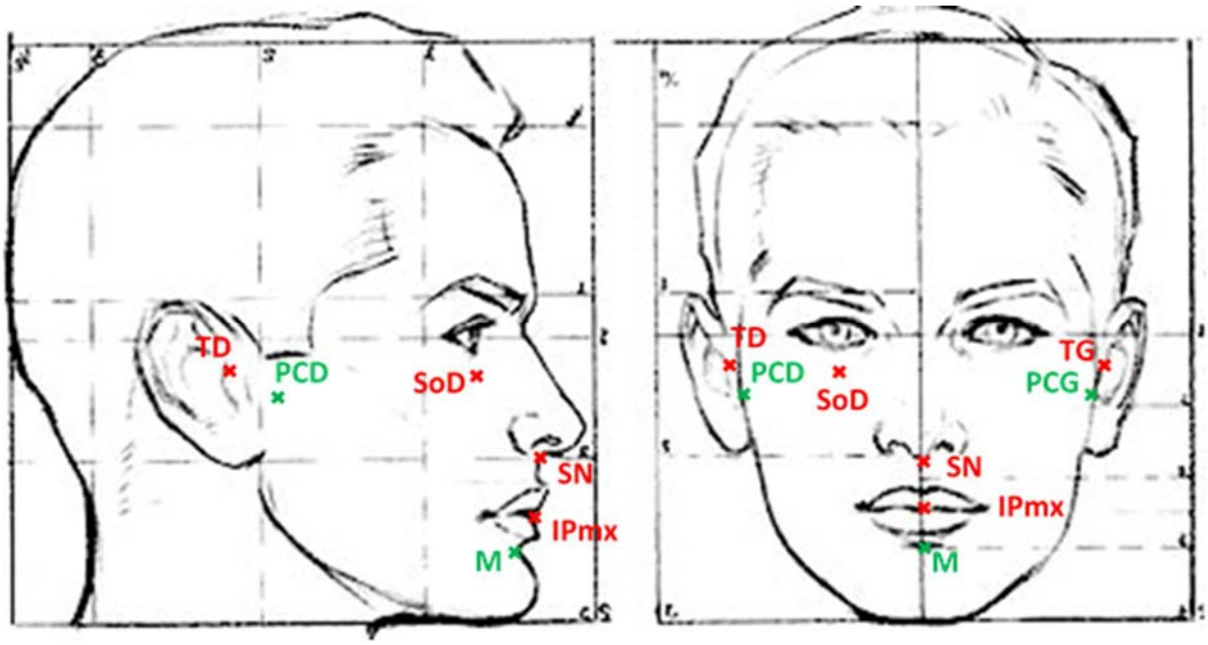


Figure 36 : Points de l'étude, points du crâne en rouge et points de la mandibule en vert ; TG et TD points tragus gauche et droit, SoD point sous-orbital droit, SN point sous nasal, IPmx point interincisif maxillaire, PCD et PCG points condyliens droit et gauche, M point mentolabial sulcus (figure vierge d'après [131])

Nous disposons de trois points formant un plan horizontal du crâne (TG, TD et SoD) représentatif du plan de Francfort modifié utilisé dans la littérature. Nous souhaitons créer un repère représentatif de la géométrie faciale et en particulier d'une ligne médiane permettant de séparer le maxillaire en une partie gauche et une partie droite. Nous utilisons pour cela les points SN et IPmx. Ces deux points, associés au milieu de la distance inter-tragi permet de créer un plan sagittal dit « médian » séparant le crâne en deux parties latérales gauche et droite. Nous avons vérifié par ailleurs que le milieu de la distance entre les points sous-orbitaux gauche et droit est proche du plan sagittal ainsi formé : distance moyenne inférieure à 1.77mm et 80% des valeurs comprises entre 0.03mm et 2.45mm d'éloignement par rapport au plan sagittal, c'est-à-dire dans la répétabilité de pointage de 2.58mm.

A partir de ces deux plans nous créons le repère crâne (Figure 37) noté Rc. Le centre du repère est le milieu de la distance reliant TG et TD. L'axe Yc est la normale au plan horizontal, formé par TG, TD et SoD, dirigé vers le haut. L'axe Xc est l'intersection entre le plan sagittal médian et le plan horizontal, et dirigé vers l'avant. L'axe Zc est issu du produit vectoriel entre les deux

axes Xc et Yc afin d'obtenir un repère orthonormé direct, partant du centre du repère vers le côté droit.

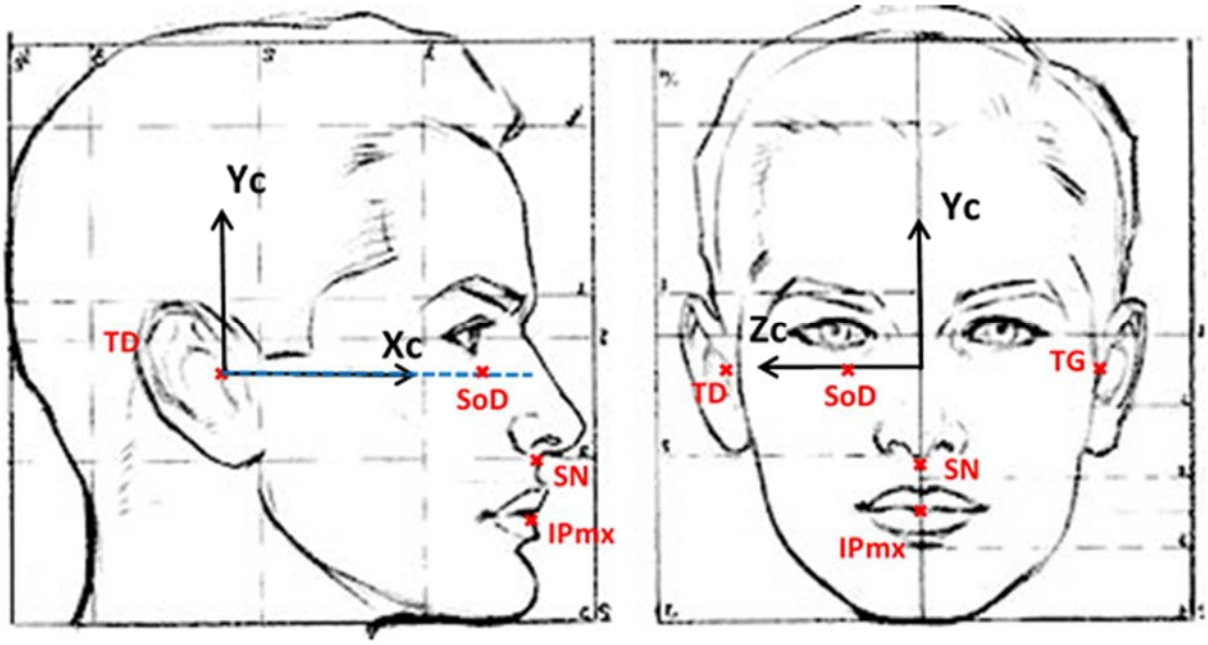


Figure 37 : Repère Crâne : points caractéristiques et axes ; TD et TG : points tragi supérieurs droit et gauche, SoD : point sous orbital droit, SN : point sous nasal, IPmx : point interincisif maxillaire (figure vierge d'après [131])

Le repère que nous utilisons diffère de la littérature non seulement par l'utilisation du plan sagittal médian mais également par l'ordre de création des différents axes constitutifs de ce repère. En effet, dans les repères classiquement utilisés, l'axe principal est l'axe inter-tragi ou l'axe intercondylien, créé en premier, suivi de l'axe inféro-supérieur. L'axe postéro-antérieur, quant à lui, résulte du produit vectoriel des deux autres axes. Cet axe est alors le moins représentatif de l'anatomie crânienne car il n'est pas défini pour répondre à des critères anatomiques mais géométriques (produit vectoriel).

Dans notre cas, l'axe postéro-antérieur Xc correspond à un axe sagittal médian défini à partir des points du crâne et donc répondant directement à des paramètres anatomiques. C'est alors l'axe Z qui est créé à partir des contraintes géométriques et non anatomiques. L'axe latéral Zc n'étant alors pas nécessairement un axe inter-tragi car il est créé par le produit vectoriel de l'axe sagittal médian et de l'axe inféro-supérieur.

Ce choix de notre méthode de création du repère crâne est le fruit d'une réflexion liée notamment à la volonté de quantifier les déviations mandibulaires.

Concernant le repère mandibule, noté Rm, les différents types de repères varient par la méthode choisie pour l'identification des points anatomiques de références du repère. Les méthodes

fonctionnelles (axe charnière, axe cinématique) permettent l'utilisation de points représentatifs des mouvements de petites ouvertures et/ou de propulsion. Cependant les points déterminés par ces méthodes fonctionnelles ne correspondent généralement pas à des points caractéristiques de l'anatomie des structures osseuses. La palpation a l'avantage de définir un point reconnaissable de la structure osseuse au travers de la peau mais ne permet d'accéder qu'à un nombre limité de points. La procédure d'identification de ces points doit par ailleurs être bien définie pour limiter les différences de positionnement entre opérateurs.

Les trois points mandibulaires utilisés pour créer le repère anatomique de la mandibule ont été choisis à partir de l'étude de répétabilité de la phase de sélection des points, présentée dans le chapitre précédent. Les résultats principaux de cette étude montrent une répétabilité générale de 1.44±0.57mm tous points considérés, avec des points plus répétables que d'autres : le point mentonnier M (répétabilité 1.14±0.42mm), ainsi que les pôles condyliens (répétabilité 1.41±0.51mm pour PCD et 1.37±0.42mm pour PCG), qui ont donc été sélectionnés pour la création du repère mandibule (Figure 36).
Pour l'identification des points condyliens, le sujet effectue des mouvements d'ouverture-fermeture de la bouche de très faible amplitude et nous suivons le trajet des points condyliens pour identifier leur position en bouche fermée. Le point mentonnier est identifié en position bouche fermée.
Le choix des points PCD et PCG s'explique par le besoin de créer un repère directement lié à l'anatomie de l'articulation temporo-mandibulaire. Le choix du point M s'explique par le souhait d'utiliser un point situé sur la ligne médiane de la mandibule et suffisamment éloigné des points condyliens pour permettre d'envelopper l'ensemble du volume mandibulaire.

Le repère mandibule (Figure 38) est finalement créé de la façon suivante : le centre du repère est le milieu des points PCD et PCG. L'axe Zm est l'axe intercondylien, partant du centre du repère vers PCD. L'axe Xm appartient au plan formé par l'axe Zm et le point M, de manière à être orthogonal à l'axe Zm. La direction de l'axe Xm part du centre du repère vers l'avant de la mandibule. Le point M est généralement situé sur cet axe. L'axe Ym est issu du produit vectoriel entre les deux axes Xm et Zm afin d'obtenir un repère orthonormé direct, partant du centre du repère vers le haut de la tête.

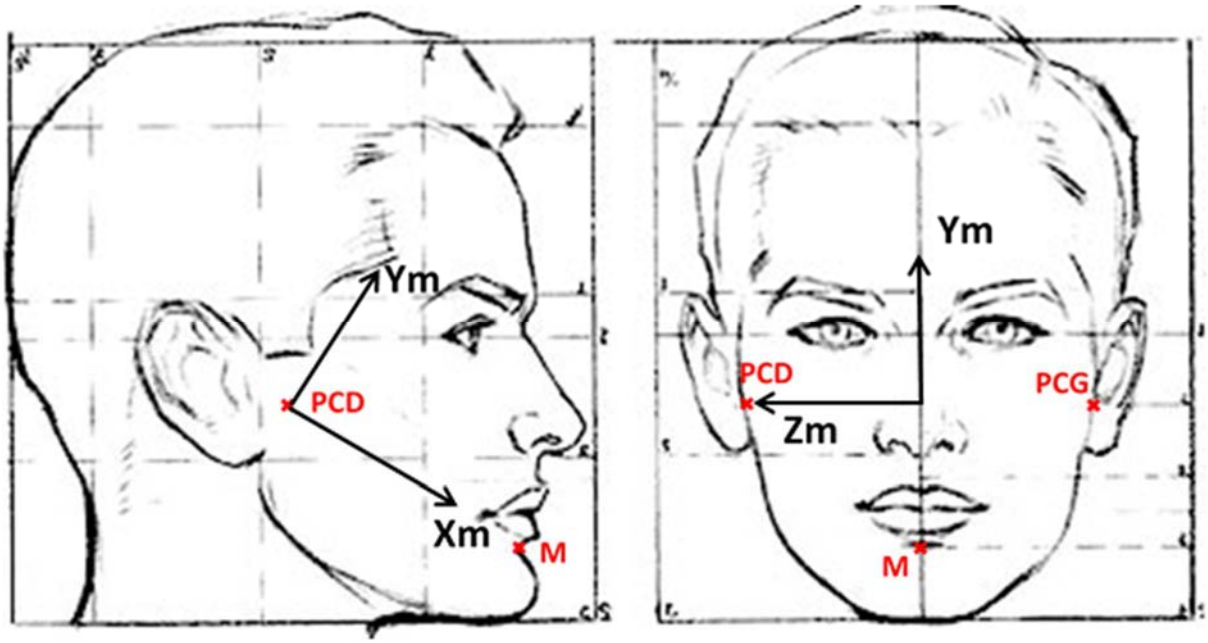


Figure 38: Repère mandibule Rm : points caractéristiques et axes ; PCD et PCG points condyliens droit et gauche, M : point mentolabial sulcus, (figure vierge d'après [131])

Grâce aux résultats fournis au chapitre 2, il est possible de quantifier l'effet de l'erreur de répétabilité du pointage d'un point sur la création du repère mandibule. Pour cela une simulation numérique par l'algorithme de Monte-Carlo est effectuée. Elle s'appuie sur les coordonnées des barycentres des points condyliens et du point mentonnier obtenues sur les 41 sujets du chapitre 2 et sur la variabilité maximale de ces coordonnées, liée à la répétabilité du pointage (2.58mm).

A l'aide du logiciel Matlab (MATLAB Release 2016b, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States) 1000 points-sélection virtuels sont générés dans l'intervalle d'erreur du pointage autour du point barycentre déterminé d'après les mesures réalisées sur chaque sujet. A partir des mille séries de points, nous créons mille repères anatomiques mandibulaires. Ces repères sont ensuite comparés au repère mandibulaire créé en utilisant les barycentres estimés à partir des mesures sur chaque sujet, et appelé par la suite « repère mandibulaire barycentrique ». En particulier, la position tridimensionnelle de l'origine de chaque repère est comparée à celle du repère mandibulaire barycentrique (Figure 39).
La variabilité de pointage des points condyliens et du point mentonnier entraîne un écart de 1.71mm en moyenne sur le positionnement de l'origine du repère. L'écart de positionnement peut atteindre 4mm dans les cas les plus défavorables. De plus, 80% des écarts de positionnement sont inférieurs à 2.28mm.

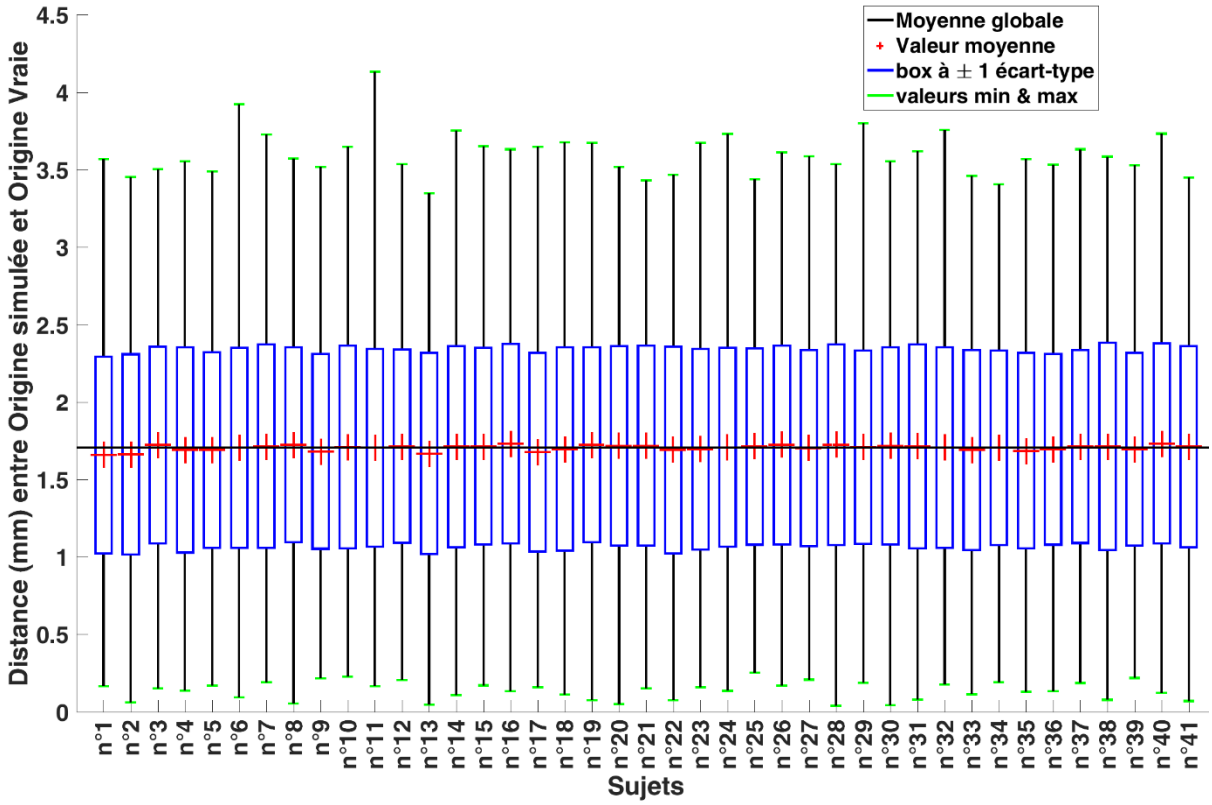


Figure 39 : Variabilité du positionnement de l'origine du repère mandibule exprimée comme la distance autour d'un point barycentre pour 1000 points numériquement simulés par la méthode de Monte-Carlo : résultats pour 41 sujets

Puis nous quantifions les variations d'orientation des repères en calculant les angles entre les axes de chaque repère et ceux du repère mandibulaire barycentrique. Par exemple pour l'axe $\vec{Z}$, nous calculons : $angleZ = \widehat{\vec{Z}.\overrightarrow{Z_{vrai}}} = \cos^{-1}\left(\frac{\overrightarrow{Z_i}.\overrightarrow{Z_{vrai}}}{\|\overrightarrow{Z_i}\|*\|\overrightarrow{Z_{vrai}}\|}\right)$ avec i=1…1000 et sans considérer le signe de l'angle. Comme pour le point Origine, nous visualisation la répartition de ces écarts pour chaque sujet.

Pour les angles $\widehat{\vec{X}.\overrightarrow{X_{vrai}}}$ (Figure 40), nous observons une répartition des écarts assez uniforme. Nous calculons alors les valeurs moyennes d'écarts sur la totalité des données (41*1000) et nous obtenons un écart moyen de 1.2°±0.6° (maximum égal à 4.4°) entre l'axe $\vec{X}$calculé et l'axe $\vec{X}$vrai. De plus, 80% des écarts d'orientation de cet axe sont inférieurs à 1.77°.

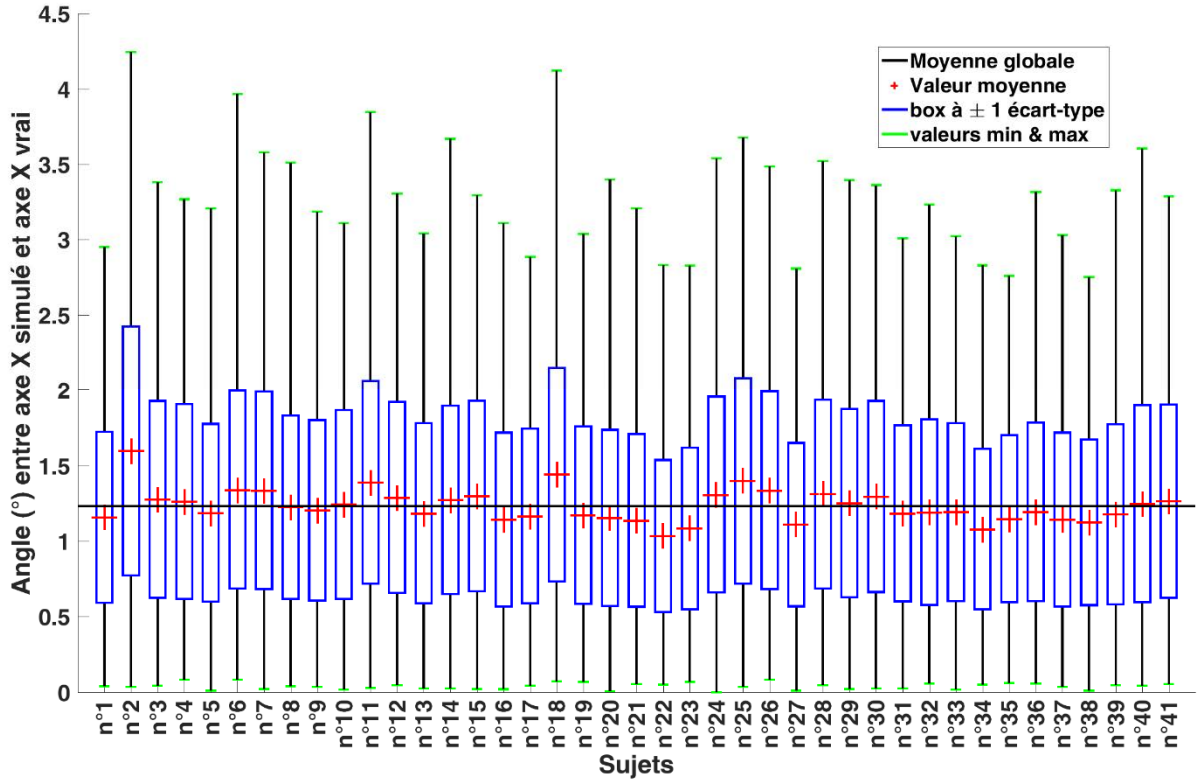


Figure 40 : Variabilité d'orientation de l'axe X du repère mandibule exprimé comme l'angle entre l'axe créé à partir des barycentres et les 1000 axes simulés numériquement par la méthode de Monte-Carlo : résultats pour 41 sujets

Comme pour $\vec{X}.\widehat{\overrightarrow{X_{vrai}}}$, les écarts pour $\vec{Y}.\widehat{\overrightarrow{Y_{vrai}}}$ (Figure 41) sont uniformément répartis entre les sujets, et nous trouvons une valeur moyenne de 1.2°±0.6° (maximum égal à 4.2°) pour l'écart entre l'axe $\vec{Y}$calculé et l'axe $\vec{Y}$vrai. Par ailleurs, 80% des écarts d'orientation de cet axe sont inférieurs à 1.76°.

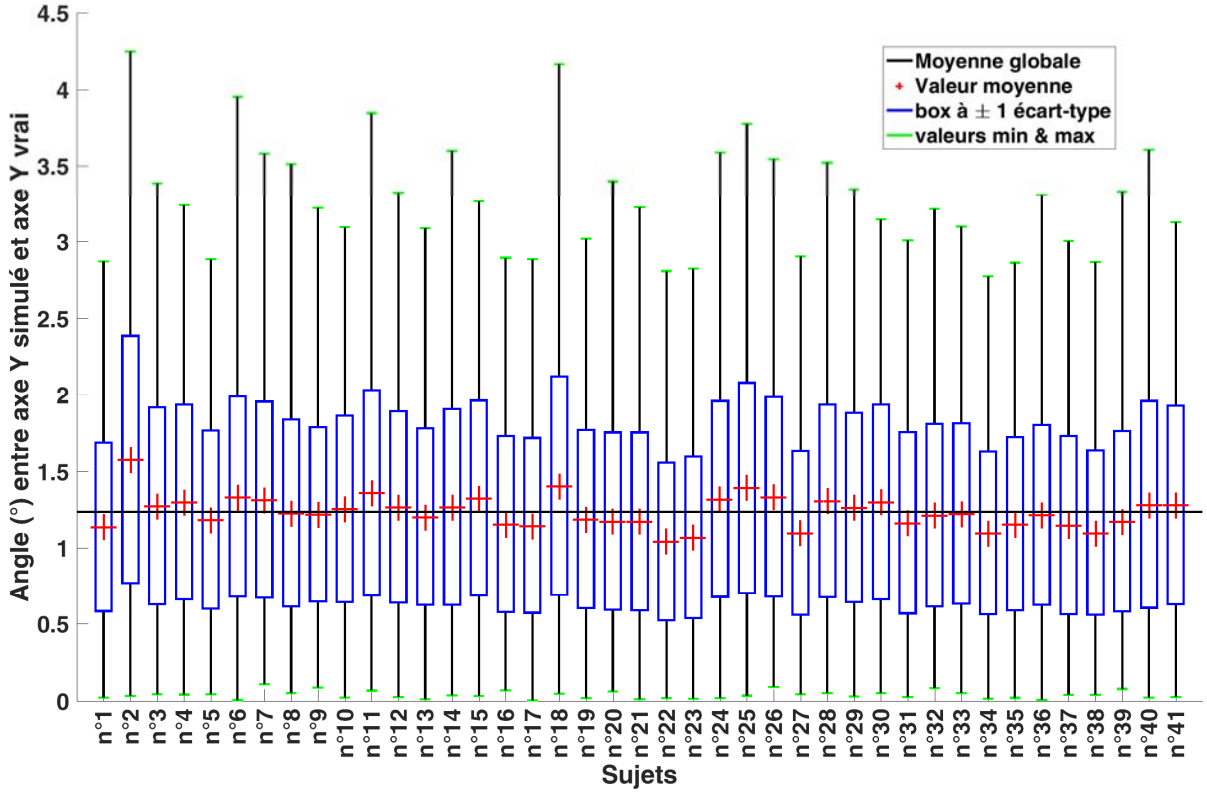


Figure 41 : Variabilité d'orientation de l'axe Y du repère mandibule exprimé comme l'angle entre l'axe créé à partir des barycentres et les 1000 axes simulés numériquement par la méthode de Monte-Carlo : résultats pour 41 sujets

Enfin pour les angles $\widehat{\vec{Z}.\overrightarrow{Z_{vrai}}}$ (Figure 42), nous observons des écarts similaires à ceux obtenus pour les axes X et Y avec une valeur moyenne de 1.1°±0.5° (maximum égal à 3.3°) pour l'écart entre l'axe $\vec{Z}$ calculé et l'axe $\vec{Z}$vrai. De plus, 80% des écarts d'orientation de cet axe sont inférieurs à 1.60°.

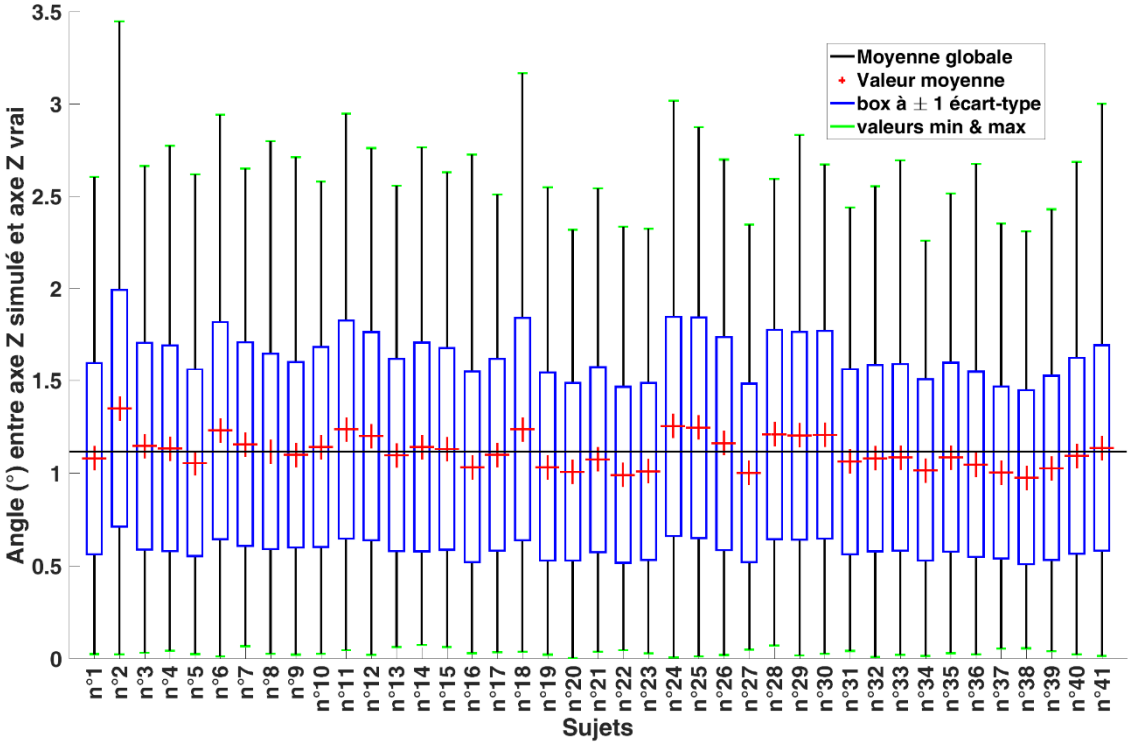


Figure 42 : Variabilité d'orientation de l'axe Z du repère mandibule exprimé comme l'angle entre l'axe créé à partir des barycentres et les 1000 axes simulés numériquement par la méthode de Monte-Carlo : résultats pour 41 sujets

Pour résumer, les écarts de positionnement des points de la mandibule, liés à la répétabilité du pointage calculée dans le chapitre 2, entrainent un décalage moyen de la position de l'origine du repère mandibule sur l'ensemble des sujets de 1.71mm±0.64mm et une différence d'orientation des axes du repère de 1.2±0.6° pour les axes postéro-antérieur et inféro-supérieur et 1.1±0.5° pour l'axe intercondylien. Compte tenu de ces résultats, les variations de position et d'orientation de la mandibule quantifiées dans notre étude cinématique seront considérées comme significatives à partir de 2.4mm et 1.8° respectivement.

2. Paramètres cinématiques étudiés

Les sujets inclus dans l'étude effectueront des mouvements d'ouverture de la bouche, des mouvements latéraux et des mouvements de propulsion. L'objectif de ce paragraphe est d'expliciter les paramètres cinématiques calculés pour chacun de ces mouvements.

2.1. Amplitudes des mouvements

Dans le chapitre 1 nous avons montré que la majorité des études évaluent dans un premier temps les amplitudes maximales de mouvement. Cependant les méthodes de calcul varient d'une étude à l'autre. En effet, les amplitudes maximales sont calculées soit en considérant le déplacement du point IP dans une direction donnée [68, 89, 93], soit la distance (norme 2D) dans le plan [67], soit la distance (norme 3D) dans l'espace [61, 62, 85, 87].

Dans notre étude, le point interincisif mandibulaire IP, qui est coïncident avec le point IPmx lorsque la bouche est fermée avec contacts dentaires, sera utilisé pour la quantification des amplitudes maximales de mouvement. Pour se comparer aux données de la littérature, nous considérons deux méthodes de calcul de ces amplitudes.
La première utilise le déplacement du point IP selon une direction fixée (Figure 43). Pour le mouvement d'ouverture, nous observons la variation de la coordonnée du point IP selon l'axe inféro-supérieur Yc du crâne. La coordonnée maximale en valeur absolue (exprimée en millimètres) est appelée Maximal Mouth Opening (MMO). Nous procédons de même pour les mouvements latéraux afin de déterminer la coordonnée maximale en valeur absolue du point IP selon l'axe médial-latéral Zc du crâne, appelée par la suite Maximal Mouth Lateral movement to the right (MMLr) ou Maximal Mouth Lateral movement to the left (MMLl) selon le cas. Enfin la coordonnée maximale du point IP selon l'axe postéro-antérieur Xc du crâne correspond à la capacité à projeter la mandibule vers l'avant et sera appelée Maximal Mouth Propulsion (MMP).

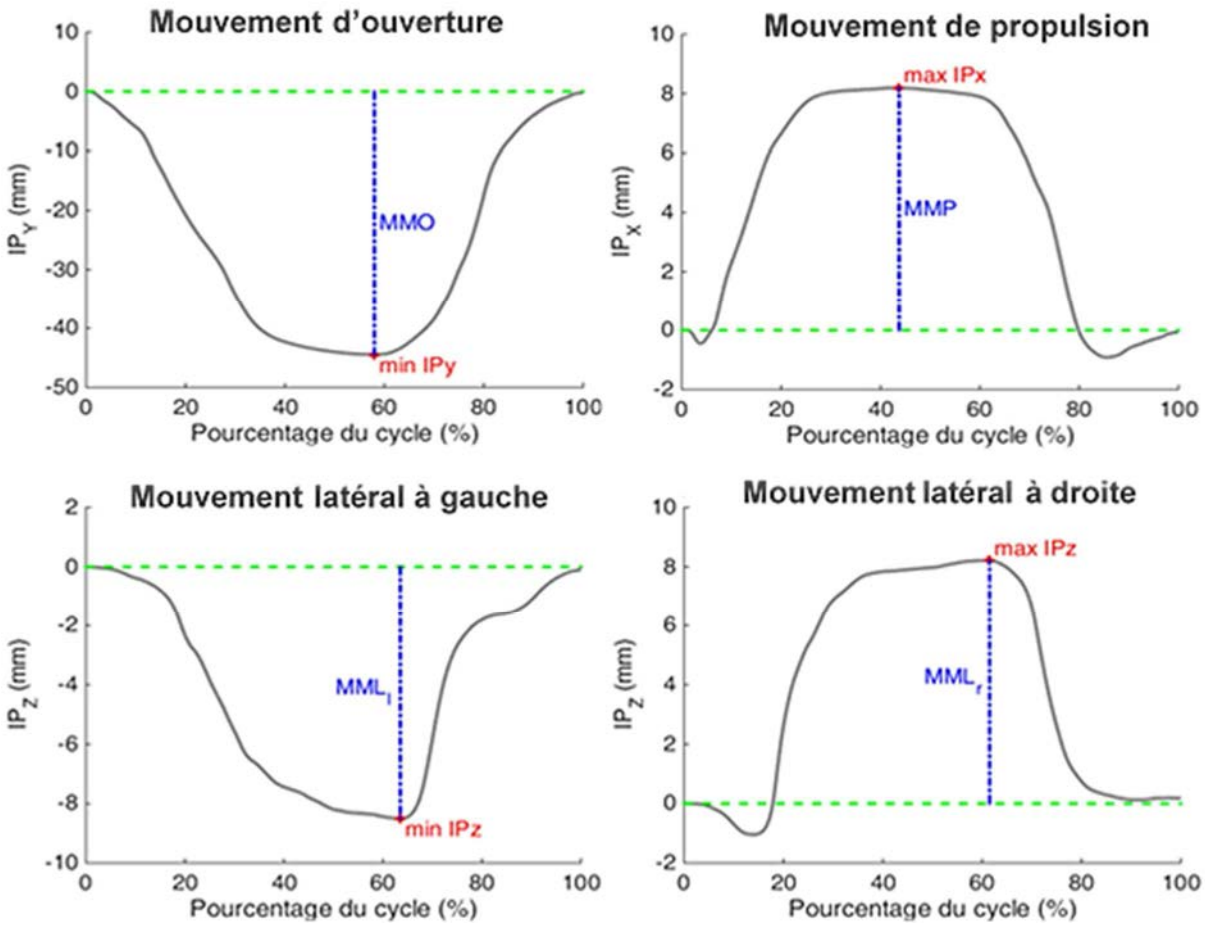


Figure 43 : Visualisation des amplitudes maximales (en rouge) de chaque mouvement, calculées à partir des valeurs maximales (en valeur absolue) des coordonnées du point interincisif mandibulaire (IP) ; MMO= maximal mouth opening, MMP= maximal mouth propulsion, MMLr= maximal mouth lateral movement to the right et MMLl= maximal mouth lateral movement to the left

La deuxième méthode consiste à calculer la distance issue des coordonnées 3D du point IP entre sa position initiale et sa position extrême du mouvement considéré.

La première méthode nous permet d'obtenir une quantification uniquement liée à la direction principale du mouvement considéré : inféro-supérieure en ouverture, postéro-antérieure en propulsion et latérale pour les mouvements latéraux, sans interférences des autres directions du mouvement du point IP. Alors que la deuxième méthode nous permet une quantification prenant en compte les déplacements du point IP dans l'ensemble des directions de l'espace. Ces deux paramètres, mis en commun, nous permettent donc une évaluation complète de ces amplitudes maximales de mouvements, et une comparaison possible avec de nombreuses et diverses études.

2.2.Vitesses naturelles d'exécution des mouvements

Nous calculons également la vitesse moyenne de réalisation des mouvements. Pour cela, nous considérons la norme de la vitesse du point IP à chaque instant, exprimée dans le repère crâne, telle que :

$$\left\|\overrightarrow{V(IP(t),R_c}\right\| = \sqrt{\dot{x_{IP}}^2 + \dot{y_{IP}}^2 + \dot{z_{IP}}^2}$$

Puis nous calculons la valeur moyenne sur la durée totale du mouvement considéré :

$$V_{IP} = moy\left(\overrightarrow{V(IP(t),R_c}\right)$$

Nous obtenons donc les vitesses moyennes de chaque mouvement : ouverture, propulsion et mouvements latéraux. La consigne sera donnée aux sujets d'étude de réaliser les mouvements à leur vitesse « naturelle » dite aussi « confortable ».

2.3.Trajectoires condyliennes

La quantification des amplitudes de mouvement renseigne sur la capacité du sujet à mouvoir la mandibule dans les différentes directions de l'espace, et les valeurs de vitesse de réalisation des mouvements informent sur l'aisance du sujet pour réaliser ces mouvements.
Pour compléter cette évaluation, les trajectoires des points condyliens PCD et PCG seront étudiées dans les trois plans et en particulier dans le plan sagittal lié au crâne (Xc, Yc) et dans le plan transversal lié au crâne (Zc, Xc). Ces trajectoires ont l'intérêt de fournir une information au plus près de l'articulation temporo-mandibulaire.
Néanmoins, l'intérêt de ces paramètres 1D et 2D reste limité pour l'étude complète des mouvements de la mandibule car ils s'appuient sur l'observation d'un seul point de la mandibule. C'est pourquoi nous devons nous tourner vers une analyse 3D des mobilités de la mandibule.

2.4.Mobilités de la mandibule par rapport au crâne

Conformément à ce qui est préconisé pour les autres articulations du corps humain, l'expression du mouvement de la mandibule se fait par l'étude de ses positions successives par rapport au crâne à chaque instant. Les six degrés de liberté sont ensuite calculés à chaque instant en considérant la transformation géométrique qui changerait le repère anatomique associé au

crâne pour le superposer au repère anatomique de la mandibule. Le repère d'écriture (ou repère d'interprétation) choisi pour cette transformation est le repère anatomique du crâne. Une attention particulière a été portée pour le choix de la décomposition de cette transformation pour que les mobilités calculées puissent correspondre aux mobilités décrites cliniquement.
Nous explicitons dans ce qui suit les calculs réalisés pour déterminer les valeurs des mobilités.
Repère crâne : $R_c(\overrightarrow{X_c}, \overrightarrow{Y_c}, \overrightarrow{Z_c}, O_c)$ et Repère mandibule :$R_m(t)(\overrightarrow{X_m}(t), \overrightarrow{Y_m}(t), \overrightarrow{Z_m}(t), O_m(t))$

$$avec\ \overrightarrow{X_m}(t) = \begin{pmatrix} X_{m1}(t) \\ X_{m2}(t) \\ X_{m3}(t) \end{pmatrix}_{Rc}, \overrightarrow{Y_m}(t) = \begin{pmatrix} Y_{m1}(t) \\ Y_{m2}(t) \\ Y_{m3}(t) \end{pmatrix}_{Rc} et\ \overrightarrow{Z_m}(t) = \begin{pmatrix} Z_{m1}(t) \\ Z_{m2}(t) \\ Z_{m3}(t) \end{pmatrix}_{Rc}$$

les coordonnées des axes mandibulaires exprimées dans le repère crâne

La matrice de passage du repère mandibule au repère crâne s'écrit donc :

$$P_{RcRm}(t) = \begin{bmatrix} X_{m1}(t) & Y_{m1}(t) & Z_{m1}(t) \\ X_{m2}(t) & Y_{m2}(t) & Z_{m2}(t) \\ X_{m3}(t) & Y_{m3}(t) & Z_{m3}(t) \end{bmatrix}$$

Cette matrice est également appelée « matrice de position angulaire » car elle reflète l'orientation de la mandibule par rapport au crâne. Les valeurs numériques des composantes de cette matrice sont calculées à chaque instant à partir des coordonnées des points anatomiques du crâne et de la mandibule qui sont fournies par le dispositif de capture du mouvement CMS-20-JMA de Zebris Medical.

Nous cherchons à présent à exprimer les translations et rotations à effectuer pour retrouver la position tridimensionnelle de la mandibule à chaque instant.
La translation de la mandibule par rapport au crâne, à chaque instant est exprimée par la position du centre du repère mandibule par rapport au centre du repère crâne ($\overrightarrow{O_c O_m}(t)$). La translation de la mandibule est décomposée en trois composantes selon les axes du repère crâne. Ainsi, la translation inféro-supérieure correspond à un abaissement ou une élévation de la mandibule le long de l'axe Yc (Figure 45). La translation postéro-antérieure correspond à une avancée ou un recul de la mandibule le long de l'axe Xc. La translation gauche-droite correspond à un déplacement latéral de la mandibule le long de l'axe Zc.
Nous utilisons ensuite $[\mathcal{R}_{R_c \to R_m}]$ la matrice de rotation globale qui exprime la transformation qui ré-oriente les axes de R_c pour les superposer à ceux de R_m. Lorsque le repère d'écriture (ou repère d'interprétation) de la transformation est le repère crâne Rc, cette matrice est égale à la matrice de position angulaire de la mandibule.

Nous décomposons cette rotation globale en trois rotations élémentaires successives. Il est indispensable de préciser la séquence d'axes utilisée pour les calculs afin de définir la décomposition des rotations. Une séquence d'axes mobiles a été choisie car elle permet de tenir compte des rotations déjà effectuées. Par exemple, l'inclinaison de la mandibule pourrait correspondre à la rotation autour de l'axe postéro-antérieur du crâne (Xc), mais si la mandibule est déviée latéralement, une rotation autour de l'axe Xc ne correspondra plus à son inclinaison intrinsèque. Nous avons donc choisi de décomposer la rotation globale en trois rotations successives (axes mobiles) réalisées dans l'ordre suivant (Figure 44) :

- Une rotation autour de Y_C (axe du repère crâne) d'un angle β représentatif de la rotation axiale
- Une rotation autour de X' (axe flottant résultant de la première rotation) d'un angle α représentatif de l'inclinaison mandibulaire
- Une rotation autour de Z''=Zm (axe intercondylien du repère mandibulaire) d'un angle γ représentatif de la rotation intercondylienne

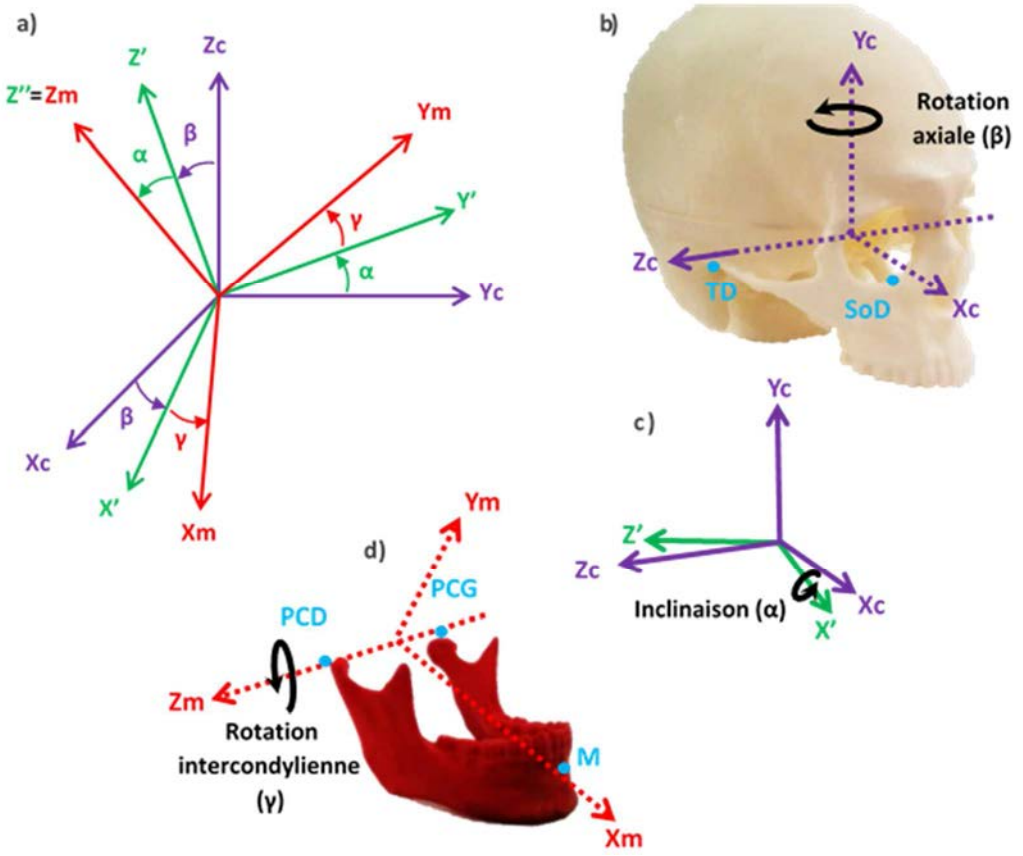


Figure 44 : a) Séquence d'axes utilisée pour l'étude du mouvement et décomposition de la rotation : b) première rotation (β) autour de l'axe Yc ; c) deuxième rotation (α) autour d'un axe X' d'une base flottante (X', Yc, Z') issu de la première rotation autour de Yc ; d) troisième rotation (γ) autour de l'axe Zm

Compte tenu de l'ordre de ces rotations, la matrice de rotation globale résultante s'écrit :

$$\left[\mathrm{R}_{R_c \to R_m}\right]_{R_c} = \begin{bmatrix} \sin\alpha \sin\beta \sin\gamma + \cos\beta \cos\gamma & \sin\alpha \sin\beta \cos\gamma - \cos\beta \sin\gamma & \cos\alpha \sin\beta \\ \cos\alpha \sin\gamma & \cos\alpha \cos\gamma & -\sin\alpha \\ \sin\alpha \cos\beta \sin\gamma - \sin\beta \cos\gamma & \sin\alpha \cos\beta \cos\gamma + \sin\beta \sin\gamma & \cos\alpha \cos\beta \end{bmatrix}$$

Cette expression permet de calculer les valeurs des angles α, β et γ par identification.

Nous choisissons d'utiliser la même méthode de décomposition pour tous les mouvements étudiés.

Dans le cadre de notre étude, nous pouvons donner des intervalles maximum pour les valeurs des angles [11] :

- Ouverture/fermeture : $\frac{-\pi}{4} < \alpha < \frac{\pi}{4} ; \frac{-\pi}{4} < \beta < \frac{\pi}{4} ; \frac{-\pi}{2} < \gamma < 0$
- Mouvement latéral : $\frac{-\pi}{4} < \alpha < \frac{\pi}{4} ; \frac{-\pi}{2} < \beta < \frac{\pi}{2} ; \frac{-\pi}{2} < \gamma < 0$
- Mouvement postéro-antérieur : $\frac{-\pi}{4} < \alpha < \frac{\pi}{4} ; \frac{-\pi}{4} < \beta < \frac{\pi}{4} ; \frac{-\pi}{2} < \gamma < \frac{\pi}{4}$

Dans le but de déterminer les valeurs de α, β et γ, et compte tenu du fait que tous les angles de rotation sont physiologiquement inférieurs à $\frac{\pi}{2}$, nous choisissons d'utiliser les expressions en arc tangente.

$$-\tan\alpha = \frac{\mathrm{Y}_{m_3}}{\sqrt{\mathrm{X}_{m_3}^2 + \mathrm{Z}_{m_3}^2}} \qquad \tan\beta = \frac{\mathrm{X}_{m_3}}{Z_{m_3}} \qquad \tan\gamma = \frac{\mathrm{Y}_{m_1}}{\mathrm{Y}_{m_2}}$$

Cependant les expressions choisies ci-dessus ne sont pas les seules possibilités. En testant toutes les expressions possibles pour le calcul des angles, nous obtenons des écarts relatifs sur les angles obtenus de l'ordre du centième de pourcent.

Les 3 rotations, d'angles α, β, γ, sont appelées respectivement inclinaison, rotation axiale et rotation intercondylienne. La rotation axiale (d'angle β) correspond à la rotation de la mandibule autour de l'axe Yc du crâne. Elle est effectuée en premier, ainsi l'angle β correspond à un angle de rotation qui serait évalué dans le plan horizontal du crâne. L'inclinaison (d'angle α) est la rotation qui s'effectue autour d'un axe compris dans le plan sagittal de la mandibule et qui pointe vers l'avant (axe flottant X' intersection des plans (Xc, Zc) et (Xm, Ym)). Cette rotation est généralement faible chez les sujets asymptomatiques du fait d'une action quasi-symétrique des muscles élévateurs. Enfin, la rotation intercondylienne (d'angle γ) s'effectue autour de l'axe intercondylien Zm. Ce choix a été fait pour permettre de quantifier la rotation autour de l'axe intercondylien même si celui-ci n'est pas fixe dans l'espace.

Ces différentes rotations, ainsi que les translations, sont visualisables sur la figure suivante.

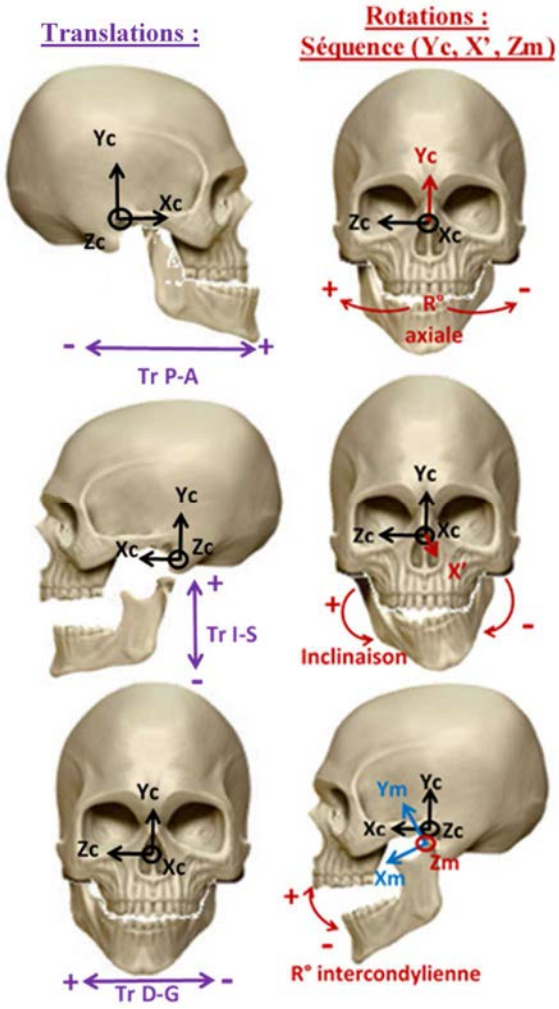


Figure 45 : Visualisation des mobilités de la mandibule par rapport au repère crâne ; Tr P-A= translation postéro-antérieure ; Tr I-S= translation inféro-supérieure ; Tr G-D= translation gauche droite ; R°= rotation

Le calcul décrit précédemment revient à considérer que la configuration de référence de la mandibule est celle où son repère coïncide avec le repère anatomique du crâne (angles nuls). Pour notre étude, il apparaît plus pertinent de quantifier la variation de position de la mandibule par rapport au crâne, en prenant comme configuration de référence pour la mandibule la position obtenue lorsque la bouche est fermée avec contacts dentaires. Cette position de référence a été choisie car elle est reproductible pour tout sujet asymptomatique.

La translation correspond alors à la variation de position linéaire du centre du repère mandibulaire :

$$\vec{T}(t) = \overrightarrow{O_c O_m}(t) - \overrightarrow{O_c O_{m_0}}(t) \qquad \text{[eq1]}$$

La rotation globale dépend alors des orientations du repère anatomique mandibulaire, par rapport au repère lié au crâne, à l'instant considéré et à l'instant initial :

$$\left[\mathcal{R}_{R_{m0} \to R_m}\right]_{R_c} = \left[P_{R_c R_m}\right](t).\left[P_{R_{m0} Rc}\right] \qquad \text{[eq2]}$$

3. Mise en œuvre des mesures : description du protocole d'acquisition cinématique

Le protocole décrit ici a été validé par le Comité de Protection des Personnes Est III en avril 2012 (protocole n° 2011-A00349-32). Chaque sujet participant à l'étude donne son consentement libre et éclairé avant la réalisation de toute mesure.

3.1. Questionnaire clinique

A partir de l'étude bibliographique des indices de dysfonctions, présenté dans le chapitre 1, nous avons mis en place un questionnaire afin de récupérer toutes les informations importantes du sujet. Ce questionnaire condense les données morphologiques (tailles, masse…) mais surtout les données relatant le fonctionnement de l'appareil manducateur. Pour cela des questions sont posées sur les antécédents du sujet (traumatisme, blocage, chirurgie…), mais également sur la présence potentielle de problèmes actuels (douleur, claquement…). L'ensemble des thèmes abordés dans le questionnaire est récapitulé dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Questionnaire pour la détection des dysfonctions et score associé

ANTECEDENTS	***Score***
TRAUMATISME ET CHIRURGIE	
Traumatisme mandibule et/ou maxillaire	50
Chirurgie orthognatique	50
Blocage de la mandibule	20
SOINS DENTAIRES	
Orthodontie (dernier acte) <5 ans / 5-10ans / >10ans	4 / 2 / 1
Poussée de dents de sagesse avec complication <5 ans / 5-10ans / >10ans	4 / 2 / 1
Remplacement dents (dernier acte) <5 ans / 5-10ans / >10ans	4 / 2 / 1
DYSFONCTIONS ARTICULAIRES	
Claquements à l'ouverture / craquements à la palpation ayant existé mais qui n'apparaissent plus	15
DYSFONCTIONS/SYMPTOMES ACTUELS CONNUS	
Luxation du disque réversible ou non avec ou sans limitation de l'ouverture	50
Bruxisme	50
Pathologie musculaire ou articulaire	50
Symptômes ou signes visibles sans diagnostic médical	
Claquement à l'ouverture / craquement à la palpation	30
Limitation de l'ouverture (pour manger un sandwich par exemple)	40
Douleurs musculaires	20
Douleurs articulaires	30
Douleurs dentaires chroniques	10
Acouphènes	20
Cervicalgies	20
Grincement de dents en période de stress par exemple	15

Nous donnons ensuite un score à chaque item en tenant compte de son importance pour notre étude. De ce fait, les douleurs dentaires se voient attribuer moins de points que les douleurs musculaires, elles-mêmes plus faibles que les douleurs articulaires. De la même manière nous accordons plus de points aux antécédents de traumatisme et de chirurgie qu'aux antécédents dentaires. Par ailleurs, une dysfonction articulaire dans le passé qui ne montre plus de signe au moment des mesures, apportera moins de points qu'un dysfonctionnement actuel.
Nous calculons alors le score total de chaque sujet comme la somme des scores des items pour lesquels le sujet a donné une réponse positive.
Nous sortons ensuite de la base de données des mesures asymptomatiques tous les sujets pour lesquels le score est supérieur ou égal à 20.

3.2. Mesures anthropométriques

Elles sont de deux types : des paramètres morphologiques généraux (taille totale, masse totale) et des paramètres morphologiques de la face pour évaluer les dimensions de la mandibule.
Nous utilisons un mètre ruban souple pour mesurer les distances curvilignes le long de la branche mandibulaire puis du corps de la mandibule (Figure 46). Nous obtenons donc une distance curviligne à droite et à gauche entre le condyle et la pointe du menton. Pour la définition des différents points, se référer au chapitre 2.

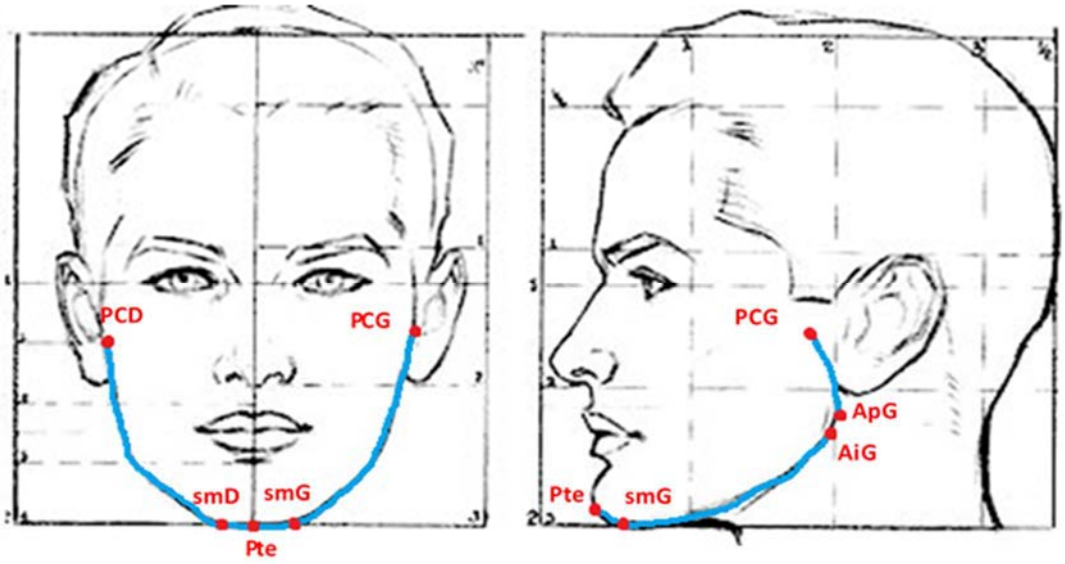


Figure 46 : Taille curviligne mandibulaire (en bleu) passant par les points caractéristiques de la mandibule (en rouge) : PCD&PCG (points condyliens droit et gauche), ApG (angle mandibulaire postérieur gauche), AiG (angle mandibulaire inférieur gauche), smD&smG (points de l'extrémité du sillon mentonnier à droite et à gauche), Pte (pointe du menton) (figure vierge d'après [131])

Après avoir positionné l'unité réceptrice du dispositif CMS-20-JMA de Zebris Medical sur la tête du sujet, la position des 14 points mandibulaires définis dans le chapitre précédent est enregistrée en bouche fermée. Un volume de la mandibule est évalué à partir des coordonnées des points mandibulaires sélectionnés en utilisant une routine Matlab permettant un maillage triangulaire basique reliant les 14 points de la mandibule (Figure 47) et le calcul du volume englobé.

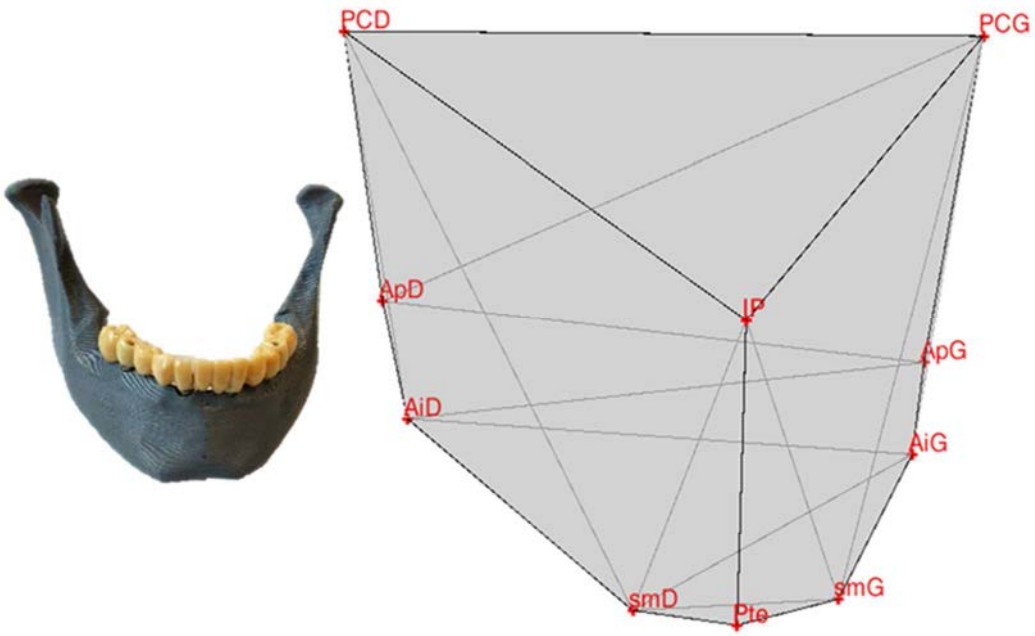


Figure 47 : Volume mandibulaire à partir des données de pointage (en rouge) : visualisation de la triangularisation permettant le calcul du volume mandibulaire à partir de ces points pointés

3.3. Réalisation des acquisitions

Après avoir collé l'unité réceptrice sur les dents mandibulaires par l'intermédiaire de l'empreinte dentaire, il est demandé au sujet de réaliser des mouvements d'ouverture-fermeture de la bouche, des mouvements latéraux et enfin des mouvements de propulsion.

Le sujet s'entraîne et s'échauffe avant la réalisation des acquisitions en effectuant quelques mouvements. Chaque exercice est effectué 10 fois, en deux acquisitions de cinq exercices afin de limiter la fatigue du sujet.

L'acquisition doit obligatoirement commencer dans la position de référence qui a été utilisée pour l'enregistrement des coordonnées des points mandibulaires. Cette position est définie comme la position au repos du sujet, assis, le dos droit et les dents en contact (en intercuspidie maximale qui correspond généralement à une occlusion naturelle).

Pour réaliser les mouvements d'ouverture-fermeture (Figure 48), les consignes données au sujet sont les suivantes : se placer en position de référence, puis ouvrir la bouche le plus grand possible, et enfin refermer la bouche en retournant dans la position de référence. Il est demandé au sujet de réaliser ce mouvement à sa vitesse naturelle.

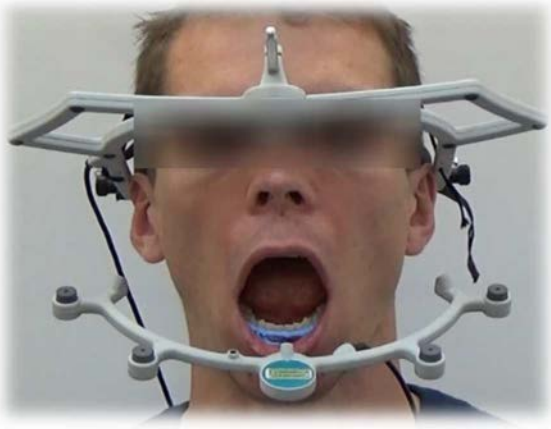


Figure 48 : Réalisation du mouvement d'ouverture maximale, photo issue de notre protocole

Pour réaliser les mouvements latéraux (Figure 49), les consignes sont de commencer en position de référence, puis ouvrir très légèrement la bouche afin de « libérer » les dents de la mandibule, emmener la mandibule le plus loin possible sur le côté, ramener la mandibule en face du maxillaire, et enfin refermer la bouche pour revenir en position de référence.

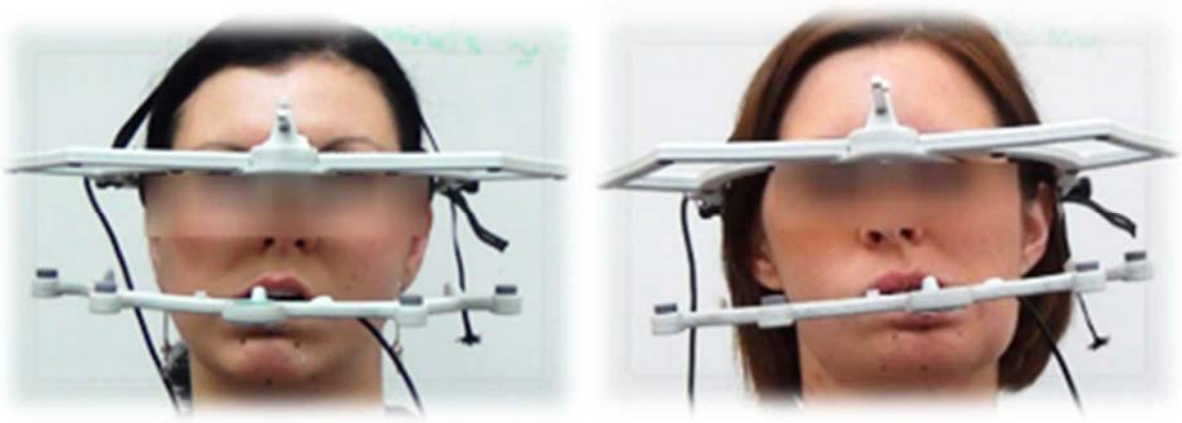


Figure 49 : Réalisation des mouvements latéraux, photos issues de notre protocole

Les mouvements latéraux s'effectuent d'abord d'un côté puis de l'autre. C'est le sujet qui détermine le côté par lequel il veut commencer.

Pour réaliser le mouvement de propulsion (Figure 50), les consignes sont, à partir de la position de référence, d'ouvrir très légèrement la bouche afin de « libérer » les dents de la mandibule si nécessaire, emmener la mandibule le plus loin possible vers l'avant, ramener la mandibule en face du maxillaire, et enfin de refermer la bouche pour revenir en position de référence.

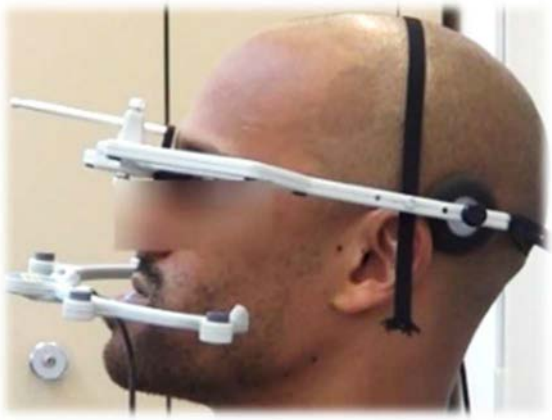


Figure 50 : Réalisation des mouvements de propulsion, photo issue de notre protocole

4. Méthodologie de traitement des données

Les données issues des répétitions de mouvement sont ensuite traitées par le biais d'une routine spécifique développée à l'aide du logiciel Matlab.

Dans un premier temps, les acquisitions sont analysées pour dissocier chaque réalisation du mouvement, que nous appellerons « cycle » par la suite. Un cycle est valable si la position initiale et la position finale sont identiques.

Dans un deuxième temps, les cycles présentant des artéfacts de mesure sont supprimés. Enfin, les corridors normalisés (moyenne ±1 écart-type) des six mobilités sont calculés pour chaque mouvement. Un exemple de corridors obtenus pour un sujet lors d'un mouvement d'ouverture-fermeture est fourni sur la Figure 51.

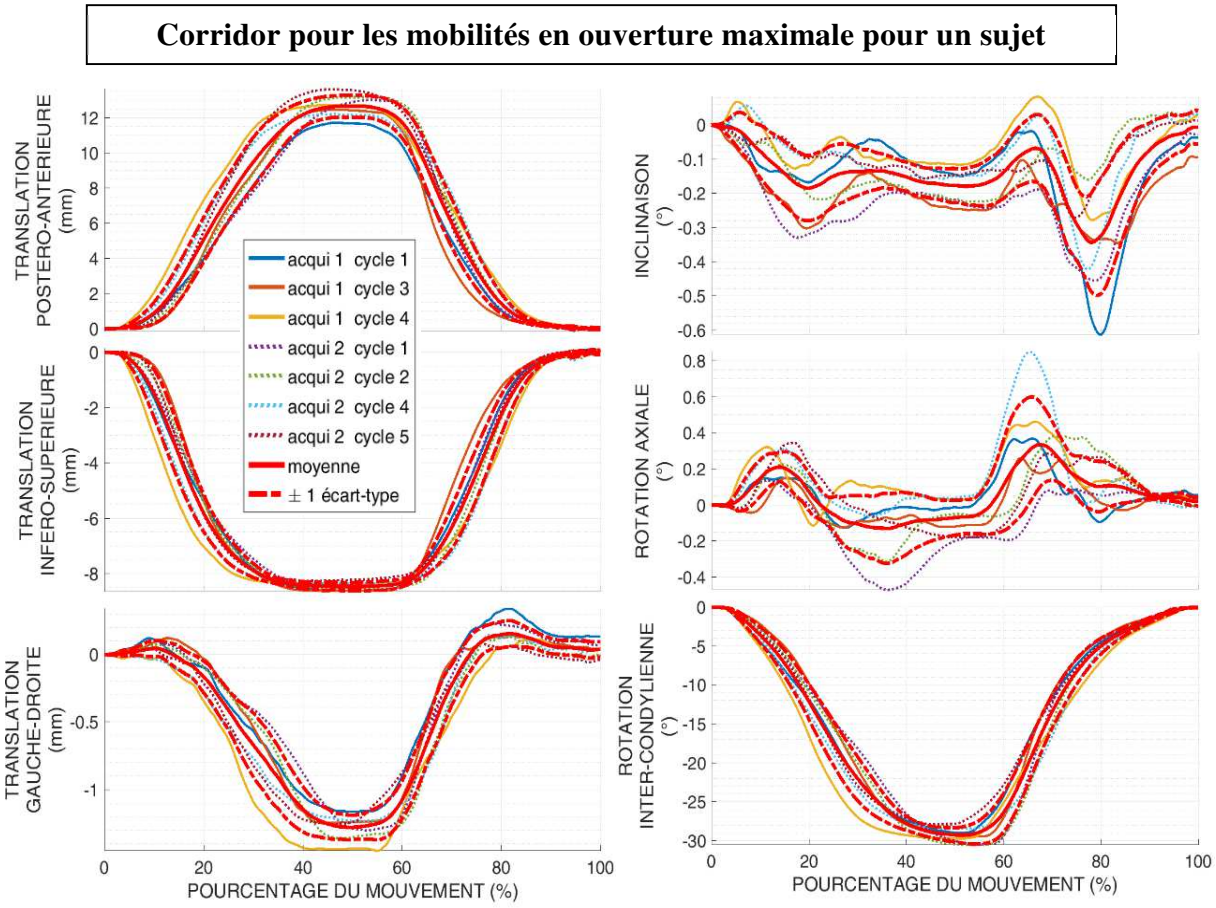


Figure 51 : Superposition des répétitions valides (courbes en couleur), moyenne et corridors (en rouge) des mobilités mandibulaires dans le cas du mouvement d'ouverture maximale du sujet XXIII

Après avoir vérifié qu'il est représentatif du corridor, le cycle présentant l'amplitude la plus grande, d'après les définitions proposées au paragraphe 2.1 de ce chapitre, est sélectionné. Nous appelons ce cycle « cycle d'amplitude maximale » ou « cycle max ».

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre méthode d'analyse cinématique et les différents paramètres calculés afin de quantifier la cinématique de l'articulation temporo-mandibulaire. Le repère crâne utilisé permet une analyse basée sur l'anatomie de chaque sujet par l'utilisation d'un plan représentatif de l'horizontalité du crâne et d'un plan représentatif de la latéralité du crâne. Concernant le repère mandibule, une étude par l'algorithme de Monte Carlo basée sur la variabilité de pointage des points du repère, a permis de quantifier le seuil de significativité des mobilités. Lors de l'exploitation cinématique, les variations de position et d'orientation de la mandibule seront donc considérées comme significatives à partir de 2.4mm et 1.8° respectivement.

L'analyse cinématique de la mandibule s'effectue tout d'abord par la quantification des paramètres globaux du mouvement comme les amplitudes maximales de mouvement et les vitesses moyennes d'exécution ainsi qu'une analyse des trajectoires condyliennes. L'ajout du tracé de l'évolution des six degrés de liberté au cours des mouvements est une première. Ces mobilités sont déterminées selon la méthode des positions successives qui est préconisée pour les autres articulations. Une attention particulière a été donnée au choix des axes de rotation pour permettre d'interpréter cliniquement les valeurs des angles.

L'objectif du chapitre suivant est par conséquent de fournir les résultats de cette étude cinématique pour les sujets asymptomatiques.

CHAPITRE 4 :
Etude cinématique des sujets asymptomatiques

L'objectif de ce chapitre est de quantifier les six degrés de liberté de la mandibule au cours de mouvements élémentaires de la bouche et de créer une base de données pour des sujets asymptomatiques. Ceci permettrait de caractériser et comprendre le comportement asymptomatique de l'ATM et de disposer de données de comparaison pour l'étude de sujets atteints de dysfonction de l'appareil manducateur.

1. Recrutement des sujets

Le protocole relatif à cette étude a été validé par le comité de protection des personnes CPP Est III, dans le cadre de l'essai clinique numéro 2011-A00349-32. Les personnes qui participent à notre étude sont volontaires. Il n'y a pas eu de pré-sélection avant nos mesures. Tous les sujets désireux de participer à l'étude ont été acceptés. Chaque volontaire a signé un formulaire de consentement pour sa participation.

Afin de créer une base de données de référence pour une population asymptomatique, nous avons défini les critères d'inclusion suivants :

- pas d'anomalie de la déglutition, de la respiration et de la posture,
- pas de traitement orthodontique ou dentaire en cours,
- pas de trouble actuel de l'articulation temporo-mandibulaire ou de l'appareil manducateur : incluant douleurs, traumatismes, bruits, gênes…

Ces critères correspondent à un score issu du questionnaire inférieur à 20 points.

66 volontaires ont pu participer à l'étude. Cependant compte tenu de l'évolution de notre protocole, seulement 44 personnes présentent des mesures exploitables dans le cadre de notre problématique de diagnostic. Sur ces 44 personnes, 29 répondent aux critères définis pour le groupe de référence.

2. Etude anthropométrique

La population de référence est constituée de 29 sujets asymptomatiques : 18 hommes et 11 femmes, de 22 ans à 63 ans, avec une moyenne d'âge de 36.7 ans. Le score issu du questionnaire pour ces sujets est compris entre 0 et 16, avec une moyenne de 3.5±5.3.

Le Tableau 8 regroupe les données générales recueillies pour cette population ainsi que les données morphologiques principales (volume de la mandibule et taille de la mandibule). Pour la description de ces paramètres morphologiques, se référer au chapitre 3.

Tableau 8 : Données générales et anthropométriques des 29 sujets asymptomatiques

Sujets	*Sexe*	*Age*	*Taille (cm)*	*Masse (kg)*	*Main dominante*	*Classe d'occlusion*	*Volume mandibule (L)*	*Distance curviligne Condyle-Pointe mandibule (mm)*	
								À droite	**À gauche**
I	F	36	183	85	D	3	0.39	/	/
II	H	24	182	100	D	3	0.32	158.9	157.3
III	H	26	154	46	D	1	0.16	125.2	117.6
IV	H	27	195	80	D	1	0.35	165.8	164.9
V	H	27	175	76	D	1	0.32	154.8	165.2
VI	H	26	186	80	D	1	0.33	155.6	159.2
VII	F	22	155	60	D	1	0.18	138.6	129.3
VIII	F	25	165	70	D	1	0.26	150.9	149.3
IX	F	28	172	58	D	1	0.23	145.6	137.3
X	F	46	164	79	D	1	0.24	140.6	137.6
XI	H	28	183	85	D	2	0.36	163.6	155.3
XII	H	40	170	68	D	1	0.33	158.3	161.6
XIII	F	34	160	48	D	1	0.19	129.3	128
XIV	F	50	169	68	D	1	0.34	157.3	154.6
XV	H	60	174	74	D	1	0.30	164.3	159.6
XVI	H	26	173	102	D	3	0.30	168.2	154.6
XVII	F	32	156	62	G	1	0.23	143.9	135.6
XVIII	H	36	178	75	G	1	0.38	159	158.2
XIX	F	39	165	67	G	1	0.26	159.3	173
XX	F	46	158	56	D	1	0.22	138.9	136.9
XXI	H	42	183	85	D	1	0.35	171.6	172.3
XXII	H	25	177	60	D	1	0.35	161.6	157.6
XXIII	H	23	176	80	D	1	0.36	154.9	158.3
XXIV	H	42	177	65	D	1	0.36	173.2	169.9
XXV	H	51	182	96	D	1	0.37	171.2	164.6
XXVI	F	53	172	100	D	1	0.36	168	169
XXVII	F	45	190	100	D	1	0.41	162	161
XXVIII	H	63	159	67	D	1	0.22	148	144
XXIX	H	41	165	59	D	1	0.25	147	147
Moyenne		**36.7**	**172.3**	**74.2**			**0.30**	**156.8**	**153.7**
Ecart-type		**11.6**	**10.9**	**15.7**			**0.07**	**9.1**	**17.1**

Les mesures anthropométriques sont utilisées dans notre étude afin d'identifier les liens potentiels entre cinématique et morphologie. Cependant leur utilité est plus large, notamment dans le cas de la création de modèles paramétrés de la mandibule.

L'étude des corrélations de Spearman (au seuil de 5%) entre paramètres morphologiques, effectuée sur les 29 sujets asymptomatiques pour les variables continues, figure dans le Tableau 9. Pour les variables non continues (le genre, la main dominante), nous effectuons une analyse de la variance (ANOVA) dont les résultats sont présentés dans le Tableau 10. Dans les tableaux suivants, les valeurs p de probabilités associées.

Tableau 9 : Valeurs de p pour le test de corrélation de Spearman (n=29, α=0.05) entre les différentes grandeurs morphologiques quantitatives sur les 29 sujets asymptomatiques ; valeur en rouge significative ; NS= non significatif

Corrélation de Pearson	*Age*	*Taille*	*Masse*	*Volume mandibule*	*Distance curviligne Condyle Droit-Pointe mandibule*
Taille	NS				
Masse	NS	<0,0001			
Volume mandibule	NS	<0,0001	<0,0001		
Distance curviligne Condyle Droit-Pointe mandibule	NS	<0,0001	0,0001	<0,0001	
Distance curviligne Condyle Gauche-Pointe mandibule	NS	0,0001	0,002	<0,0001	<0,0001

Tableau 10 : Etude ANOVA (n=29, α=0.05) sur les variables non continues pour les 29 sujets asymptomatiques, résultat du paramètre p ; NS=non significatif

ANOVA	*Sexe*	*Main dominante*	*Occlusion*
Taille	<0.0001	NS	NS
Masse	0.001	NS	NS
Volume mandibule	<0.0001	NS	NS
Dist Condyle Droit-Pointe mandibule	0.0004	NS	NS
Dist Condyle Gauche-Pointe mandibule	0.002	NS	NS
Age	NS	NS	NS

Nous remarquons que l'âge n'est corrélé avec aucune autre variable, sur notre population d'étude. Les autres variables sont corrélées positivement entre elles. La taille de la mandibule à gauche est fortement corrélée avec la taille de la mandibule à droite. De plus, les tailles de la mandibule à droite et à gauche et le volume de la mandibule montrent une corrélation, ce qui signifie que notre pointage (permettant de calculer le volume mandibulaire) reflète bien la dimension réelle mesurée au ruban (traduit par distance Condyle-Pointe de la mandibule). Nous remarquons également que ce volume mandibulaire est corrélé positivement avec les données morphologiques générales : plus le sujet est grand et plus sa mandibule le sera. Il existe une corrélation positive entre la taille et la masse. De la même manière une corrélation existe entre la masse et le volume de la mandibule. Néanmoins, il est ici légitime de se poser la question de l'existence d'une corrélation croisée. La vérification de ce résultat s'effectue par le calcul des corrélations partielles de Pearson pour obtenir les corrélations en s'affranchissant du paramètre « taille ». La corrélation entre la masse totale du sujet et le volume mandibulaire n'est alors plus significative.

Concernant l'étude ANOVA, les corrélations sur le paramètre « sexe » nous montre que les hommes sont en moyenne plus grands et plus lourds que les femmes. Les corrélations entre le sexe et le volume mandibulaire ou le sexe et la taille mandibulaire sont une conséquence de la corrélation entre ces paramètres et le paramètre « taille » retrouvé sur l'étude de Pearson.

La main dominante et l'occlusion ne sont pas corrélées avec les différents paramètres morphologiques.

Finalement, nous pouvons dire que la taille de la mandibule calculée à partir de données mesurées au ruban et le volume de la mandibule calculée à partir des données de pointage montrent des résultats corrélés. Par ailleurs ces paramètres sont liés à la taille du sujet : plus un sujet est grand plus sa mandibule le sera. Il existe donc des paramètres indépendants : l'âge, l'occlusion dentaire et la main dominante. Les paramètres de taille sont tous corrélés entre eux, donc nous pouvons sélectionner un seul de ces paramètres dans la suite de l'étude. Afin de se rapprocher de la zone d'étude, nous choisissons de conserver le volume mandibulaire.

3. Etude cinématique

3.1. Amplitudes de mouvement

Comme présentés dans le chapitre 3, les premiers paramètres cinématiques observés sont les amplitudes de déplacement du point IP :

- la MMO (amplitude maximale d'ouverture caractérisée par la valeur maximale de la coordonnée selon l'axe Yc du crâne),
- la MML (amplitude maximale latérale caractérisée par la valeur maximale de la coordonnée selon l'axe Zc du crâne),
- la MMP (amplitude maximale en propulsion caractérisée par la valeur maximale de la coordonnée selon l'axe Xc du crâne).

Nous avons également calculé les normes maximales de ces amplitudes à partir des coordonnées 3D du point IP.

Les résultats de ces amplitudes de chaque sujet asymptomatique sont consignés en annexe 1. Les valeurs moyennes de chacun de ces paramètres sont consignées dans le Tableau 4.

Tableau 11 : Valeurs moyennes et écart-types (moy ± sd) calculés à partir de l'étude des 29 sujets de référence pour les amplitudes de mouvements (en mm) : valeurs maximales suivant la direction principale de chaque mouvement et normes maximales du point interincisif mandibulaire (IP) ; Comparaison avec les résultats majeurs de la littérature

		OUVERTURE		***LATERAL A DROITE***		***LATERAL A GAUCHE***		***PROPULSION***	
		MMO (mm)	**Norme max (mm)**	**MMLr (mm)**	**Norme max (mm)**	**MMLl (mm)**	**Norme max (mm)**	**MMP (mm)**	**Norme max (mm)**
NOTRE ETUDE	***Moy±sd***	39.5±5.7	49.5±6.7	10.7±2.2	12.8±2.7	10.2±1.8	12.4±2.2	7.9±1.9	9.9±1.9
REFERENCES	[63] *(90)*		49.9±5.3		8.4±2.5		8.3±2.5		6.2±1.9
	[66] *(29)*		52.6±6.3		8.2±2.7		8.1±2.5		7.5±1.1
	[65] *(13)*		49.6±5.3		8.9±2.6		8.1±2.4		6.7±2.1
	[91] *(27F)*	46.6±0.9		11.4±0.4		11.0±0.4		9.3±0.3	
	[43] *(100F)*	35.5±4.2		6.1±2.8		6.1±2.8		5.7±2.4	
	[61] *(31)* [64] *(67)*		56.9±4.3		12.2±1.7		11.7±2.08		
	[67]*(22)*	35.4±3.3		10.5±2.6		9.8±3.9		7.9±1.3	

Concernant l'amplitude maximale en ouverture, la valeur moyenne sur notre base de données de référence est de 39.5±5.7mm. En propulsion, nous trouvons une valeur de 7.9±1.9mm, et des valeurs de 10.7±2.2mm et 10.2±1.8mm en latéralité respectivement à droite et à gauche. Pour la plupart des paramètres présentés ici, nos valeurs sont proches des différentes études effectuées (Tableau 11), sauf pour les valeurs de norme en latéralité et en propulsion, exceptée pour l'étude de Reicheneder et al. [64]. Ces différences peuvent s'expliquer par le fait que les études présentées ici ne présentent pas le résultat de la norme 3D mais de la norme 2D du point interincisif. Nos valeurs de norme sont donc calculées avec une composante supplémentaire, expliquant alors nos résultats plus importants, car les comparaisons s'effectuent entre un mouvement 3D et un mouvement plan. Cette nuance est moins marquée pour le mouvement d'ouverture pour lequel la troisième composante (déviation latérale) est faible en comparaison des deux autres voire pratiquement négligeable sur ce calcul de norme.

Dans un second temps, nous regardons s'il existe des corrélations entre ces paramètres cinématiques et les paramètres morphologiques (Tableau 12). Pour cela nous utilisons une étude ANOVA pour tester l'influence sur les variables qualitatives (occlusion et main dominante) et un test de corrélation de Spearman pour les variables quantitatives (volume mandibule et âge).

Tableau 12 : Corrélation entre les paramètres morphologiques et les amplitudes maximales en ouverture (MMO), en propulsion (MMP), en latéralité à droite (MMLr) et à gauche (MMLl) (test de corrélation de Spearman pour âge et volume ; étude ANOVA pour occlusion et main dominante). Résultat du paramètre p, n=29 et α=0.05 ; NS=non significatif

	Occlusion	*Main dominante*	*Age*	*Volume mandibule*
MMO	NS	NS	NS	0.036
MMP	NS	NS	NS	NS
MMLr	NS	NS	NS	NS
MMLl	NS	NS	NS	NS

Seule la MMO est corrélée avec le volume mandibulaire (et donc avec la taille et le genre). Les études [84, 101] ne montrent aucune différence entre les hommes et les femmes pour la MMO et la MML. Cependant l'influence du genre peut être discutée [44, 85]. L'étude de Ferrario et al. [85] montre des valeurs de MMO pour le point IP de 50.93±5.51mm pour les hommes et de 43.27±5.70mm pour les femmes. Dans leur étude, cette différence est expliquée en partie par la différence de taille de la mandibule entre les hommes et les femmes. Ce qui est également le cas dans notre étude et celle de Lewis et al. [44], qui montre des valeurs de MMO (déplacement inférieur du point IP) de 45.32±0.96mm pour les hommes et de 38.75±0.91mm pour les femmes, corrélées à la taille mandibulaire.

En conclusion, les amplitudes maximales reflètent la capacité du sujet à effectuer les mouvements. Nos valeurs, proches des données de la littérature, ont permis de déceler une corrélation entre la capacité maximale d'ouverture de la bouche (MMO) et la taille de la mandibule. Les autres mouvements ne sont pas corrélés à des paramètres morphologiques.

3.2. Vitesses de mouvement

Nous cherchons à quantifier les vitesses naturelles de réalisation des mouvements mandibulaires. Pour cela, lors des acquisitions cinématiques, nous n'avons donné aux sujets aucune consigne sur la vitesse d'exécution des mouvements. Les vitesses calculées, comme la vitesse de déplacement du point IP au cours du mouvement, peuvent alors être considérées comme représentatives de la vitesse naturelle du sujet. Sur la Figure 52, nous visualisons, pour chaque mouvement, la répartition des vitesses du point IP pour le groupe asymptomatique.

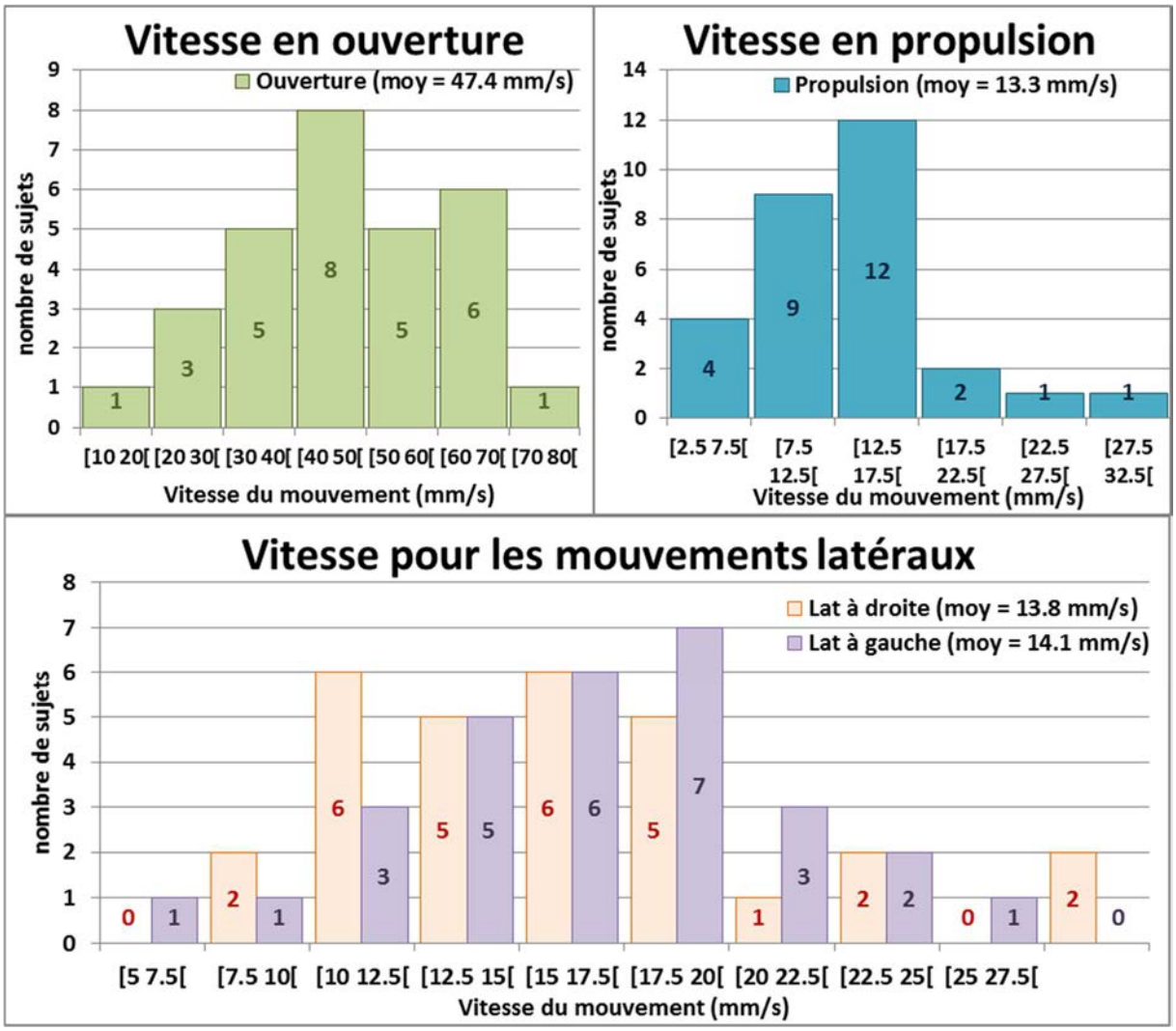


Figure 52 : Vitesses de réalisation des mouvements de la bouche en mm.s^{-1} (vitesse de déplacement du point interincisif mandibulaire) et répartition des valeurs dans le groupe asymptomatique

En ouverture, les vitesses varient de 19.4mm.s^{-1} à 73.1mm.s^{-1} avec une valeur moyenne de 47.4mm.s^{-1}. De plus, 24 sujets, soit 82% de notre population ont une vitesse comprise entre 30mm.s^{-1} et 70mm.s^{-1}, avec un pic entre 40 mm.s^{-1} et 50 mm.s^{-1} pour 8 sujets.

En propulsion les sujets effectuent le mouvement à une vitesse moyenne de 13.3mm.s^{-1} avec des valeurs entre 5.0mm.s^{-1} et 29.7mm.s^{-1}. De plus 86% de notre population, soit 25 sujets, montre des valeurs entre 2.5 mm.s^{-1} et 17.5mm.s^{-1} dont 12 sujets avec une vitesse comprise en 12.5mm.s^{-1} et 17.5mm.s^{-1}.

Les mouvements latéraux à droite s'effectuent à une vitesse moyenne de 13.8mm.s^{-1} avec un intervalle de 6.6mm.s^{-1} à 26.2mm.s^{-1} alors que, pour les mouvements à gauche, la valeur moyenne est de 14.1mm.s^{-1} avec un range de 4.8mm.s^{-1} à 22.9mm.s^{-1}. De plus, dans l'intervalle [10 mm.s^{-1} - 20mm.s^{-1}], nous pouvons trouver 22 sujets pour le mouvement vers la droite (soit

76% de la population) et 21 sujets pour le mouvement vers la gauche (soit 72% de la population asymptomatique).

A notre connaissance, il n'existe pas d'autres études quantifiant la vitesse d'exécution des mouvements élémentaires dans leur intégralité, alors que des vitesses sont calculées lors de la mastication [134, 135]. Par exemple, Hansdottir et al.[135] trouvent des valeurs de $151mm.s^{-1}\pm36mm.s^{-1}$ pour la phase d'ouverture et $173mm.s^{-1}\pm43.2mm.s^{-1}$ pour la phase de fermeture de la bouche lors de la mastication. Alors que Bhaskaracharya et al.[134] ont calculé des valeurs de $29.1mm.s^{-1}\pm7.9mm.s^{-1}$ lors de la mastication naturelle.

Nous avons ensuite effectué une étude des corrélations (Spearman, n=29, α=0.05) entre ces vitesses et les paramètres cinématiques et morphologiques précédemment décrits. Aucune corrélation n'a été trouvée entre les vitesses de réalisation des mouvements et les différentes grandeurs cinématiques ou morphologiques. Cependant, nous avons pu constater que les vitesses sont corrélées positivement entre elles (Tableau 13). Ce paramètre vitesse est donc un paramètre sujet-dépendant.

Tableau 13 : Etude des coefficients de corrélations de Spearman entre les vitesses des différents mouvements sur les 29 sujets asymptomatiques. Résultats de p (α=0.05)

	Vitesse IP en ouverture	*Vitesse IP en propulsion*	*Vitesse IP en latéralité à droite*
Vitesse IP en propulsion	<0.0001		
Vitesse IP en latéralité à droite	0.004	0.0001	
Vitesse IP en latéralité à gauche	<0.0001	<0.0001	0.0002

3.3. Trajectoires des points condyliens

Les trajectoires des points condyliens renseignent sur le fonctionnement articulaire. Observons dans un premier temps les trajectoires dans le plan sagittal. Pour cela, nous superposons les trajectoires de l'ensemble de notre population asymptomatique pour les mouvements d'ouverture et de propulsion (Figure 53), puis pour les mouvements latéraux (Figure 54).

En ouverture, nous pouvons observer une forme concave des trajectoires des condyles, qui remontent en fin d'ouverture. Les condyles se déplacent vers le bas et vers l'avant. Les amplitudes de notre groupe de référence varient entre -13mm à 2mm en Y, avec des valeurs principalement négatives, et entre 0mm et 21mm en X. Nous remarquons également que les

deux condyles travaillent de manière presque similaire. La majorité des sujets se trouve dans un intervalle de [0mm – 15mm] en X et de [-10mm – 0mm] en Y.

Pour le mouvement de propulsion, nous remarquons une bonne superposition des courbes des différents sujets. La tendance est ici très nette. Les trajectoires présentent un très faible rayon de courbure lors du déplacement vers l'avant et le bas. Nous voyons également que le condyle droit fonctionne de la même manière que le condyle gauche, avec des amplitudes en Y allant de -10mm à 1mm et en X allant de -1mm à 16mm. De plus, les trajets aller et retour sont bien superposés. Nous voyons bien que la majorité des sujets se trouvent dans un cadre de 0 à 8mm en X et de de 0 à -8mm en Y.

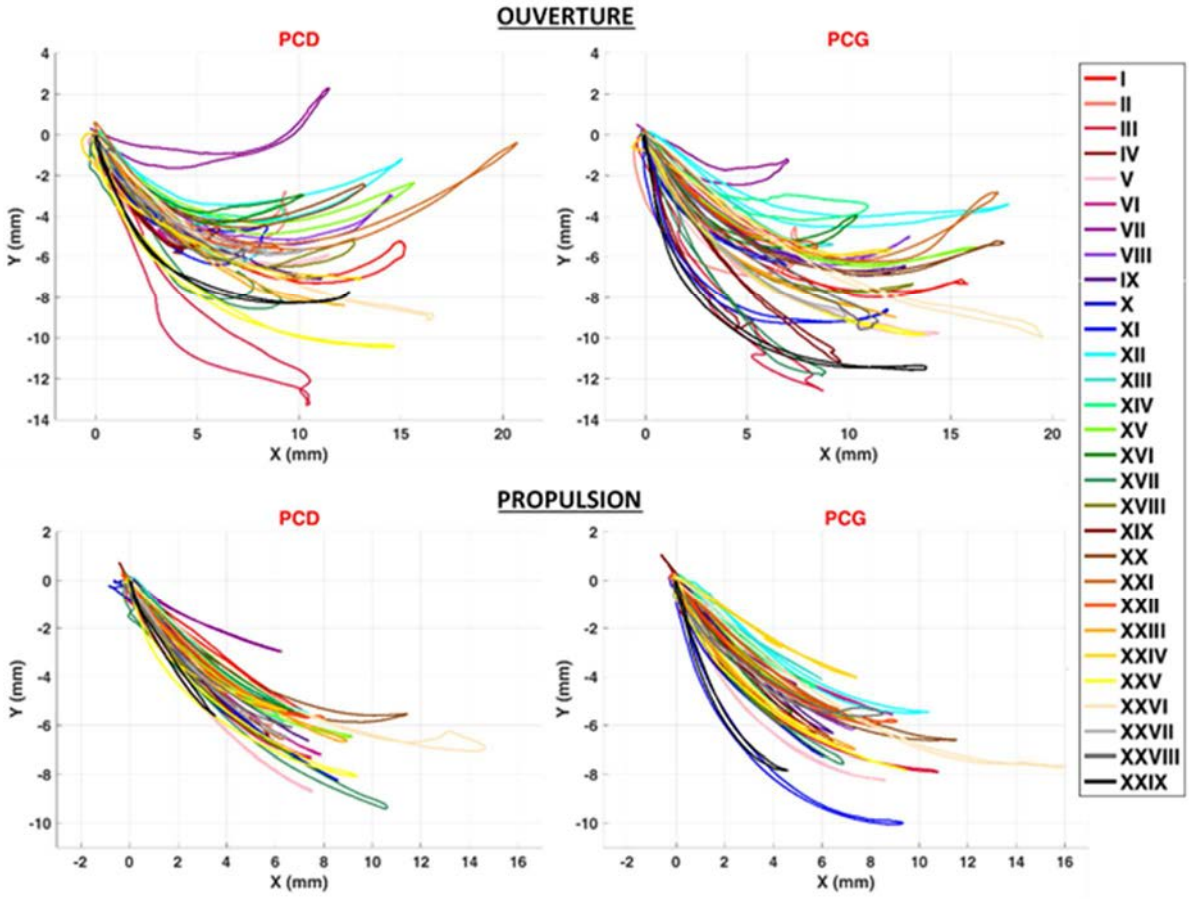


Figure 53 : Trajectoires des points condyliens (PCD et PCG) dans le plan sagittal lors du mouvement d'ouverture et lors du mouvement de propulsion pour l'ensemble des sujets asymptomatiques

Lors des mouvements de latéralité, nous voyons que le condyle droit lors du mouvement à gauche montre des trajectoires similaires au condyle gauche lors du mouvement à droite, ce sont les condyles non travaillants. Pour ces deux condyles, nous voyons des trajectoires avec un faible rayon de courbure et des amplitudes variant de -2mm à 16mm en X et -11mm à 2mm en Y, avec la majorité des sujets dans des intervalles de [0mm – 10mm] en X et de [-8mm –

0mm] en Y. Les trajets aller et retour sont également bien superposables. Pour les condyles travaillants (condyle gauche lors du mouvement à gauche et condyle droit lors du mouvement à droite), les trajectoires sont plus limitées avec des valeurs comprises entre -2 et 6mm en X et entre -5mm et 4mm en Y. Les trajectoires aller et retour sont bien superposables. Nous remarquons que ces condyles travaillants lors de ce mouvement de latéralité sont les seuls, sauf cas exceptionnels dans les autres mouvements, dont les trajectoires remontent au-delà de la position initiale (Y positif).

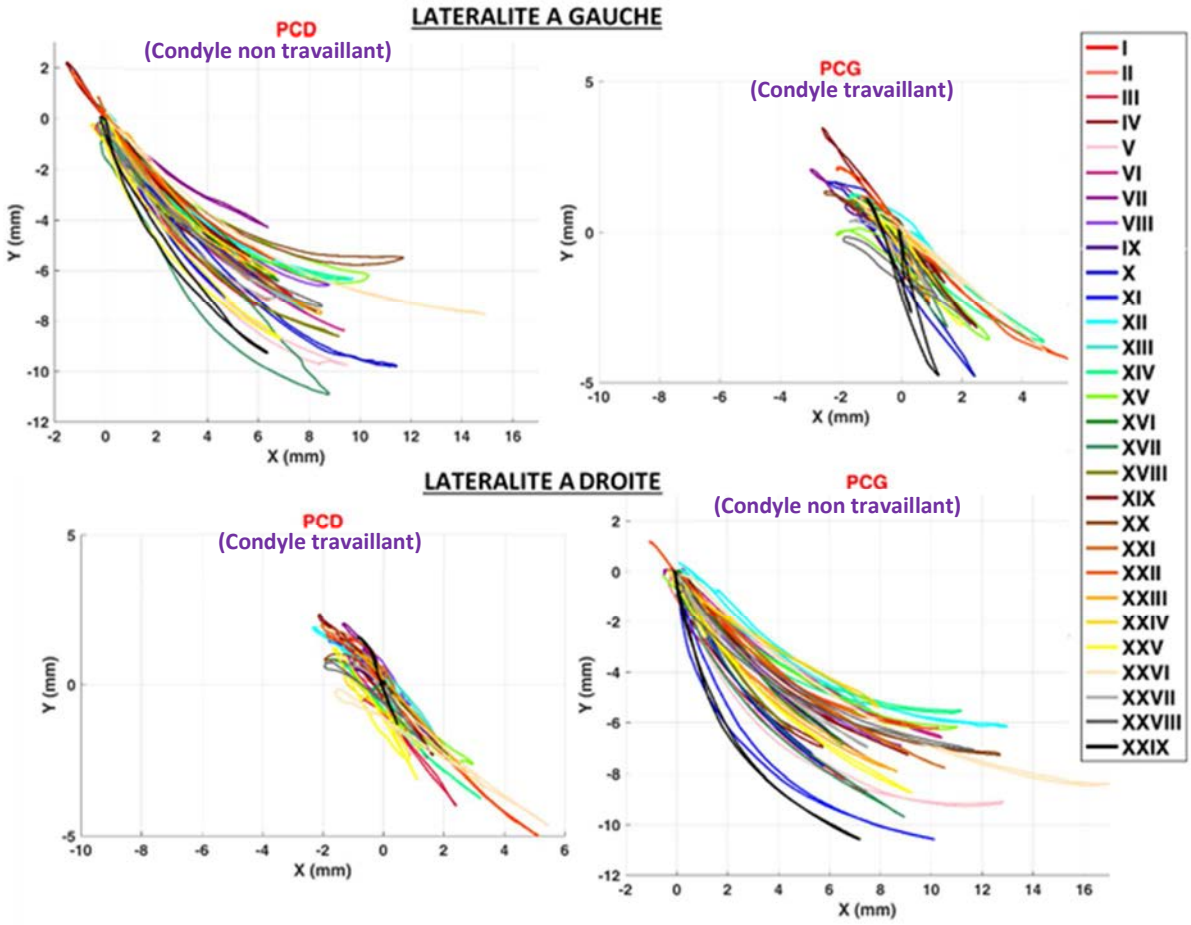


Figure 54 : Trajectoires des points condyliens (PCD et PCG) dans le plan sagittal lors des mouvements latéraux pour l'ensemble des sujets asymptomatiques

Cette description des différents mouvements dans le plan sagittal permet de mettre en avant une tendance générale pour chaque mouvement mandibulaire avec des courbes plutôt bien superposables entre les différents sujets. Cette tendance de forme concave (en ouverture, propulsion et pour les condyles non travaillant en latéralité) s'explique essentiellement par la géométrie de la fosse, que le condyle doit suivre lors des mouvements pour passer le tubercule articulaire (Figure 55).

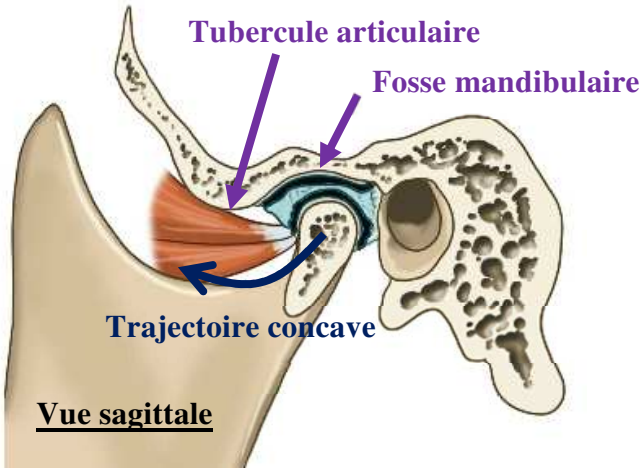


Figure 55 : Coupe sagittale de l'articulation temporo-mandibulaire. Le condyle longe la fosse mandibulaire pour les différents mouvements avant de passer sous le tubercule articulaire, pour le mouvement d'ouverture, d'après [136]

Après visualisation de cette tendance générale dans le plan sagittal, nous allons observer le fonctionnement articulaire dans les différents plans anatomiques. Pour cela, nous visualisons les trajectoires des points condyliens pour un sujet-type du groupe de référence lors des différents mouvements élémentaires.

Lors du mouvement d'ouverture (Figure 56), les deux condyles travaillent en simultané et de manière relativement symétrique dans les 3 plans anatomiques. En effet, ils effectuent essentiellement un déplacement vers le bas (Y négatifs) et vers l'avant (X positifs). Ce déplacement en avant est souvent le plus important, avec environ le double du déplacement vers le bas. Le déplacement latéral est pratiquement nul avec des valeurs comprises entre -1 et 1mm en Z. Dans le plan transversal, les trajectoires montrent un aspect très faiblement incurvé se rapprochant de la linéarité. Dans le plan frontal la trajectoire est d'abord presque linéaire, puis montre une courbure lorsque le mouvement est à son maximal. Le condyle effectue alors une légère remontée, laissant supposer le passage du tubercule articulaire.

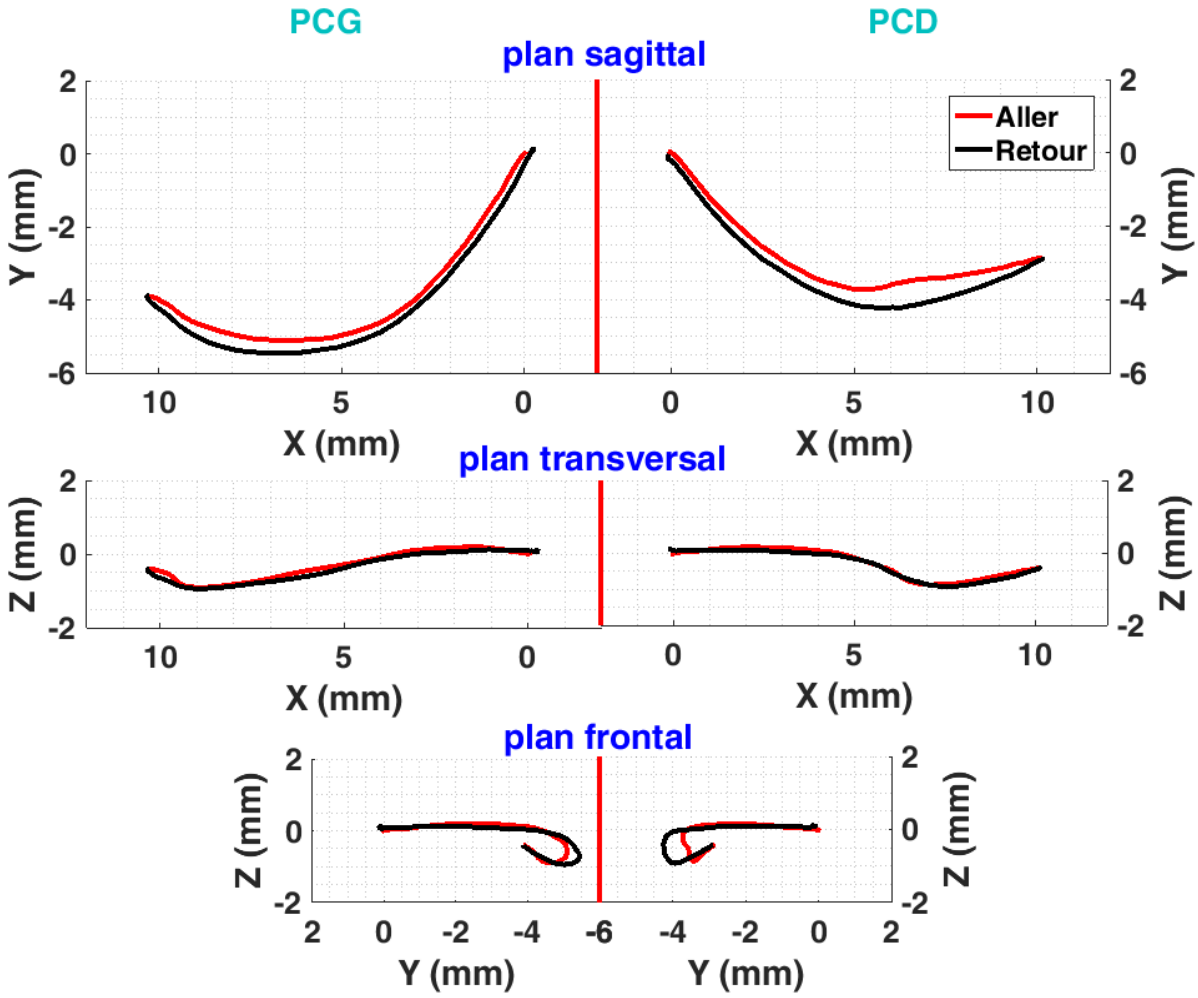


Figure 56 : Trajectoires des points condyliens droit (PCD) et gauche (PCG) dans les trois plans anatomiques lors du mouvement d'ouverture maximale pour le sujet-type du groupe asymptomatique (XVI)

Lors du mouvement de propulsion (Figure 57), comme pour le mouvement d'ouverture, les deux condyles travaillent simultanément et de manière assez symétrique. Ils présentent une trajectoire linéaire dans le plan transversal et dans le plan frontal, avec des déplacements inférieurs à 1mm en Z. L'aller et le retour sont bien superposés.

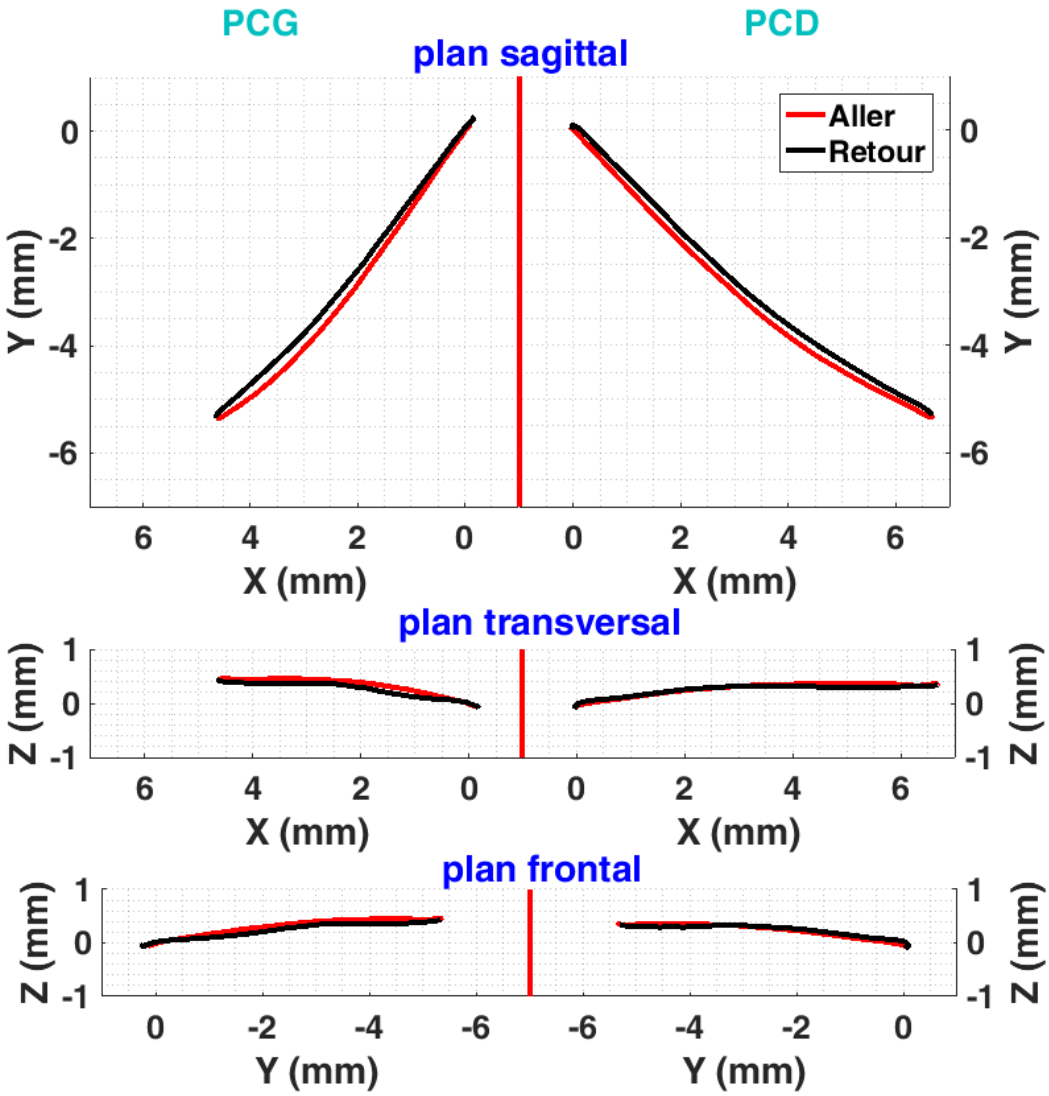


Figure 57 : Trajectoires des points condyliens droit (PCD) et gauche (PCG) dans les trois plans anatomiques lors du mouvement de propulsion pour le sujet-type (XVI) du groupe asymptomatique

Lors des mouvements latéraux, nous pouvons observer une particularité en comparant les condyles travaillants d'une part (Figure 58-A), et les condyles non travaillants d'autre part (Figure 58-B). En effet, pour chaque comparaison, il y a une similitude des trajectoires dans le plan sagittal, une symétrie axiale dans le plan transversal et une symétrie centrale dans le plan frontal. Encore une fois, les déplacements en Z sont compris entre -2mm et 2mm. Nous voyons de plus que les trajectoires des condyles non travaillants présentent une forme légèrement concave dans le plan sagittal, mais également dans les plans frontal et transversal. Les condyles travaillants présentent des déplacements réduits par rapport aux condyles non travaillants. De plus, ils présentent une remontée des condyles avec des valeurs de Y positives.

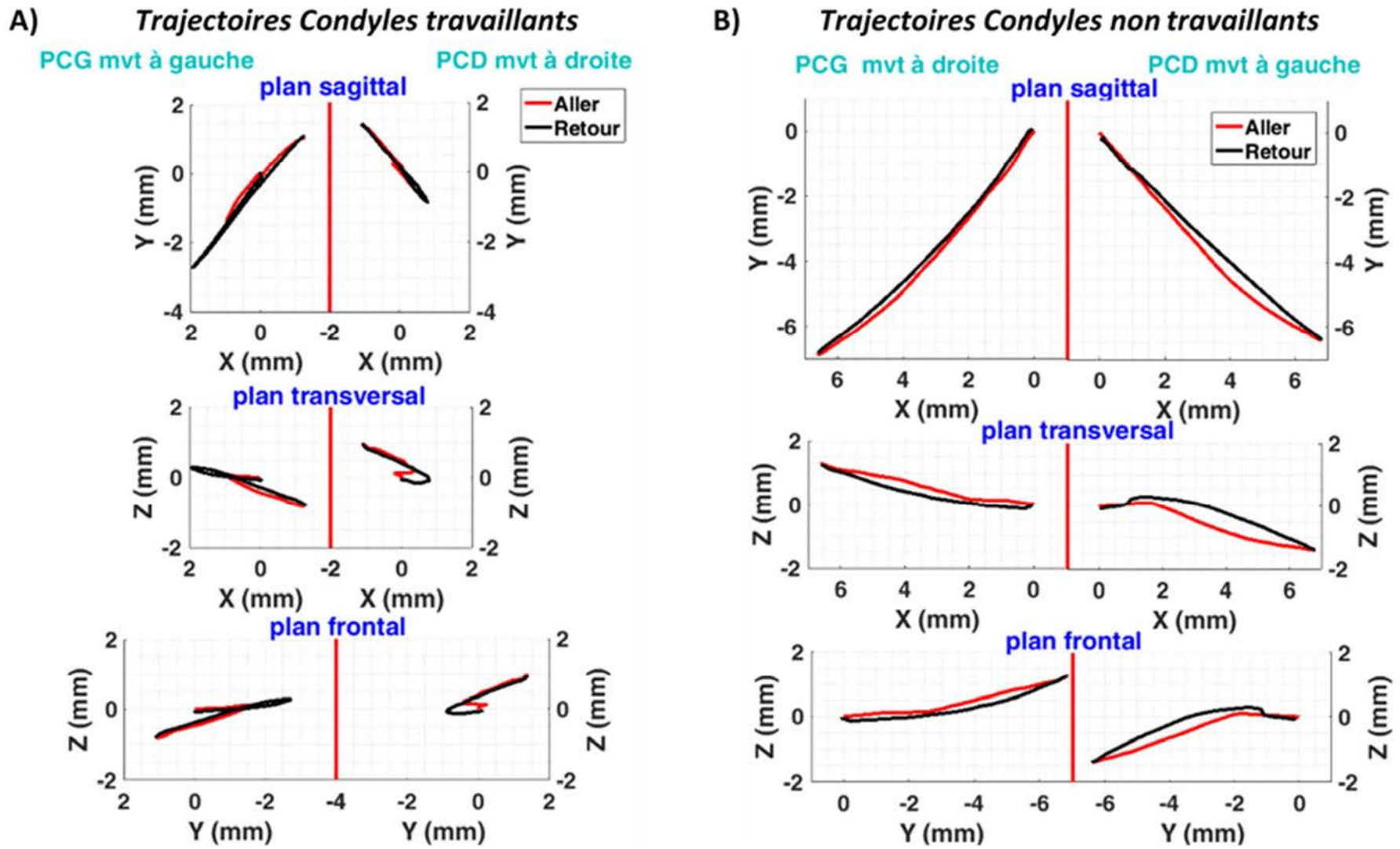


Figure 58 : Symétrie des condyles opposés pendant les mouvements latéraux, exemple pour le sujet XVI. A) pour les condyles travaillants (PCD lors du mouvement latéral à droite et PCG lors du mouvement latéral à gauche). B) pour les condyles non travaillants (PCD lors du mouvement latéral à gauche et PCG lors du mouvement latéral à droite)

Superposons à présent les trajectoires des différents mouvements pour ce sujet-type (Figure 59).

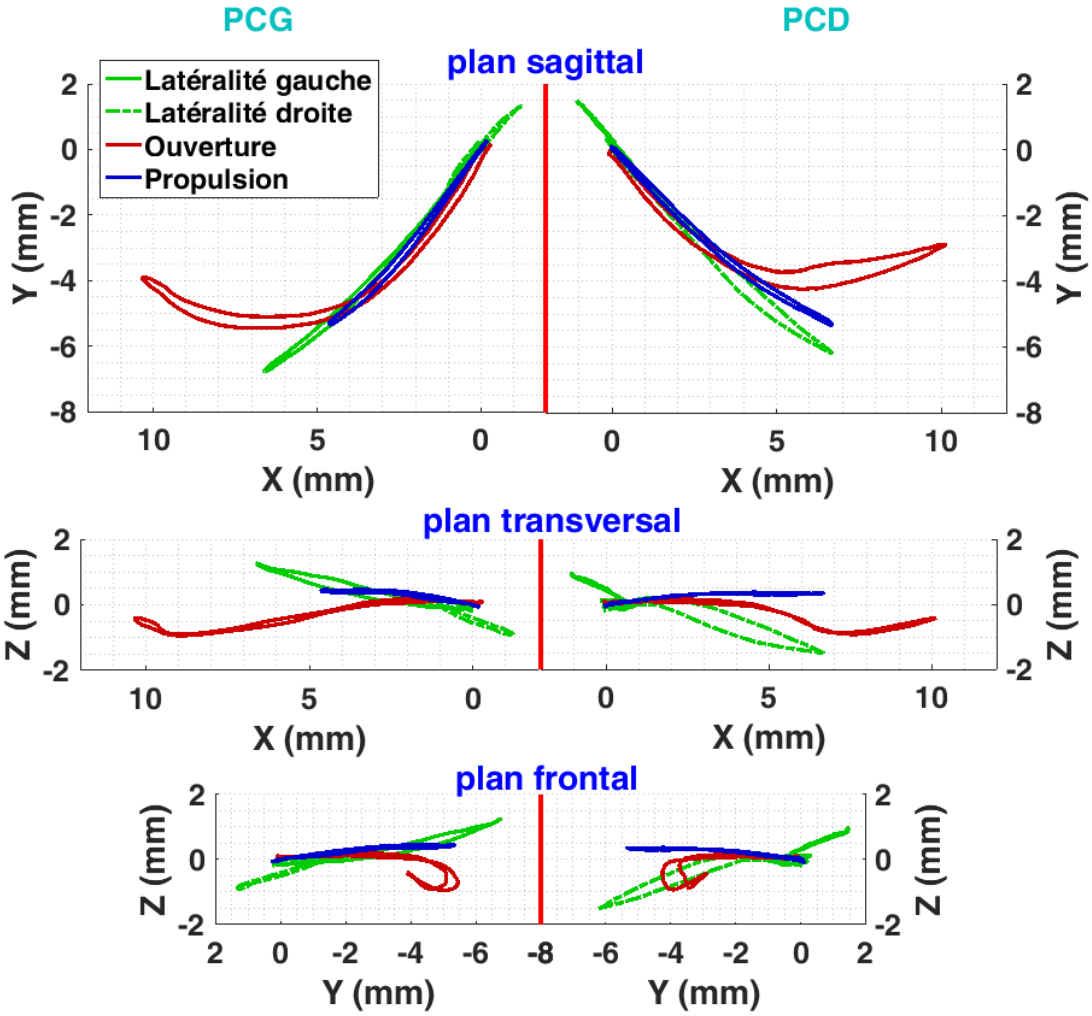


Figure 59 : Visualisation des trajectoires des points condyliens droit (PCD) et gauche (PCG) (en mm) dans les trois plans anatomiques pour l'ensemble des mouvements du sujet type (XVI)

Nous observons une superposition des trajectoires dans les premiers millimètres dans les trois plans anatomiques. Les trajectoires des condyles dans les différents plans au début des différents mouvements sont identiques car ces déplacements sont contraints par la géométrie de la fosse. C'est elle qui guide le mouvement jusqu'au passage du tubercule articulaire quand il a lieu. C'est ce passage que nous visualisons pour le mouvement d'ouverture avec la remontée de la courbe en Y. Par ailleurs, cette géométrie anatomique limite également les déplacements en Z, toujours inférieurs à ±2mm, pour les différents mouvements.

Les trajectoires de notre groupe de référence se rapprochent des descriptions anatomiques classiques [20]. Si nous prenons la description générale de l'ensemble des mouvements effectuée classiquement, dans le plan sagittal, les trajectoires sont décrites comme concaves

avec une superposition des différents mouvements dans les 8 à 10 premiers millimètres. Ensuite les trajectoires d'ouverture remontent et présentent alors un rayon de courbure plus petit. Les tracés d'aller et retour sont confondus et réguliers [74], et le point final du mouvement est identique au point de début de mouvement. Dans le plan transversal, les tracés sont linéaires en ouverture et en propulsion. Le mouvement de propulsion et les mouvements latéraux sont très peu documentés dans les études des trajectoires condyliennes. Néanmoins pour les mouvements latéraux, dans le plan sagittal, le condyle non travaillant doit montrer une trajectoire concave et le condyle travaillant doit présenter des amplitudes réduites. Dans les autres plans, les trajectoires sont difficilement définissables. Cependant, il existe une symétrie des trajectoires des condyles travaillants entre eux et des condyles non travaillants entre eux [4].
Nous retrouvons l'ensemble de ces caractéristiques lors de notre description des mouvements. Un autre paramètre mentionné dans la description des trajectoires condyliennes est la similitude du mouvement des deux condyles. Les trajectoires de ces deux points doivent donc être superposables lors de l'ouverture et de la propulsion, alors que pour la latéralité nous comparons les condyles travaillants d'une part et les condyles non travaillants d'autres part.

Vérifions cette superposition pour le mouvement d'ouverture (mouvement le plus référencé), dans le plan sagittal (plan qui présente les plus grands déplacements condyliens) (Figure 60). Les trajectoires condyliennes dans les autres plans et pour les autres mouvements sont consignées en annexe 2.
Nous pouvons observer que la majorité des sujets ne présente pas une superposition parfaite de la trajectoire du condyle droit et de la trajectoire du condyle gauche. Les différences observées peuvent être de différentes natures. En effet certains sujets présentent des différences entre l'aller et le retour du mouvement (sujets II, XI, XIX…), d'autres vont montrer des trajectoires avec des amplitudes différentes (sujets : IV, VII, X, XI, XIX…), ou encore avec des irrégularités (sujet III). Nous pouvons également voir que certains sujets présentent des trajectoires particulières par rapport à la description précédente du mouvement d'ouverture. En effet, les sujets IV, VII, X montrent des déplacements réduits (inférieurs aux 8-10mm décrits dans la littérature pour la composante X [20]), et le sujet XXI présente des amplitudes exagérées suivant l'axe X (supérieure à 20mm en X). Sur les 29 sujets asymptomatiques de l'étude, au moins 20 montrent au minimum une de ces particularités des trajectoires condyliennes dans le plan sagittal pour le mouvement d'ouverture. Certains sujets (VII, XI, XIX…) cumulent même plusieurs de ces caractéristiques.

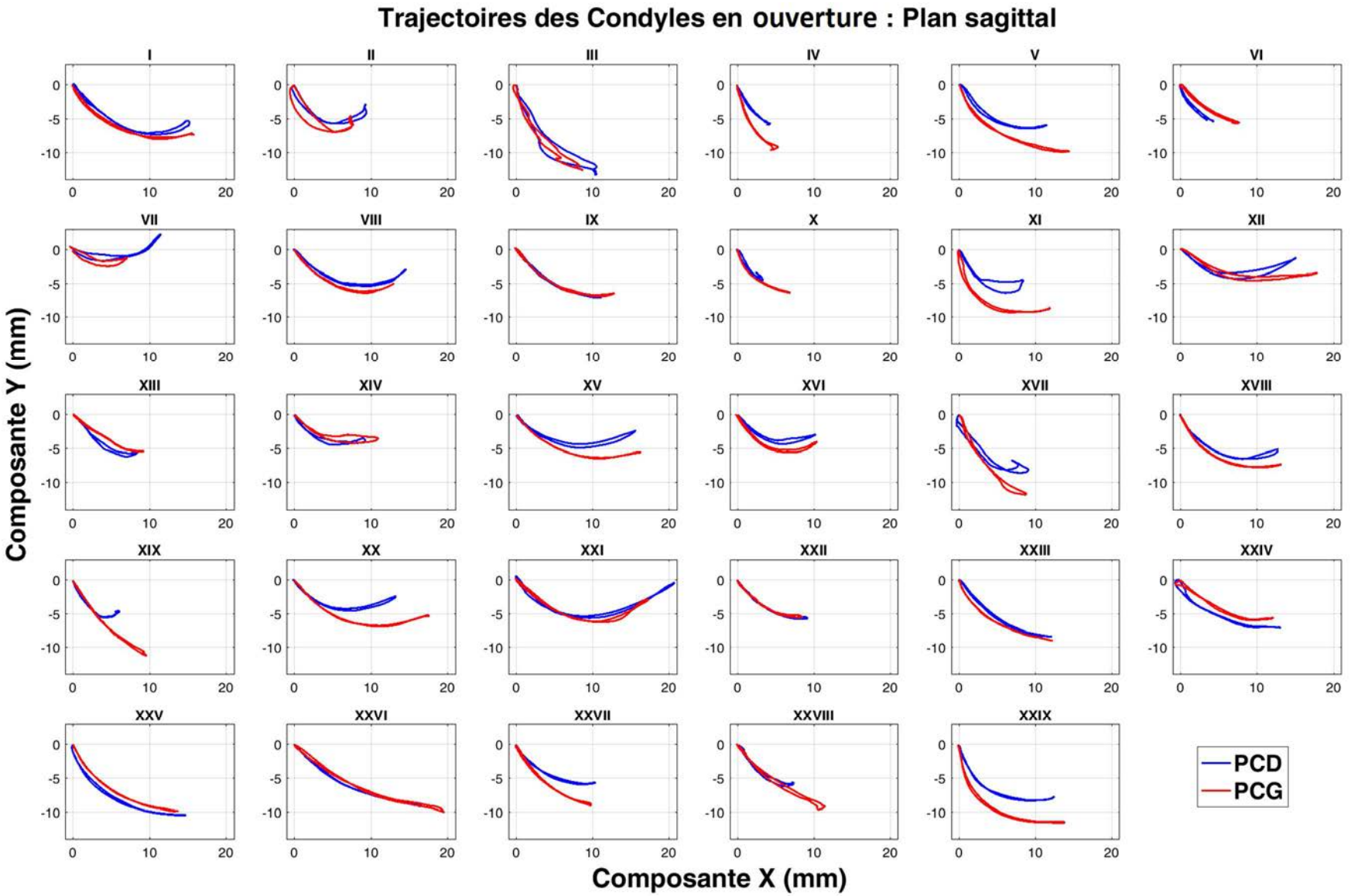


Figure 60 : Trajectoires des condyles (en rouge PCD et en bleu PCG) pour le mouvement d'ouverture dans le plan sagittal pour chaque sujet

Nous voyons bien qu'une grande partie de nos sujets asymptomatiques présente des particularités sur l'observation des trajectoires condyliennes en ouverture. Or, ces particularités sont souvent rapportées dans la littérature comme étant le signe de l'existence de dysfonctions [20, 75]. Cependant, ici nous examinons le groupe de référence qui ne présente aucun problème passé ou actuel que ce soit au niveau dentaire, articulaire ou musculaire. Il est alors difficile de dire que les trajectoires condyliennes d'un sujet donné témoignent d'une dysfonction alors que le sujet ne présente aucun signe ou symptôme reflétant cette dysfonction.

La question se pose alors sur l'existence d'un tracé universel pour ces trajectoires condyliennes asymptomatiques, ce qui est également remis en question par Joerger et al. [74], pour lesquels un tracé parfait n'existe pas et pour Theusner et al [137] qui ont démontré que les trajectoires condyliennes et les symptômes de dysfonctions ne présentent pas obligatoirement de relation de cause à effet.

De plus, afin d'expliquer ces différences de trajectoires de certains de nos sujets asymptomatiques, nous devons également considérer les limitations de notre étude. Premièrement, la présence de l'unité émettrice peut perturber la réalisation naturelle des mouvements. En effet, cette unité, avec une masse de 55g sans l'empreinte dentaire et la tige, est située en avant de la mandibule et provoque donc un effet de porte-à-faux pouvant entrainer une réalisation différente des mouvements naturels. La deuxième limitation réside dans la comparaison entre les trajectoires décrites dans la littérature et les trajectoires issues de nos mesures pour les mouvements de propulsion et les mouvements latéraux. En effet dans de nombreuses études, les mouvements de latéralité et de propulsion sont réalisés avec glissement dento-dentaire, nous parlons alors de mouvement de protrusion et de mouvement de diduction (définis dans le chapitre 1).

Et enfin la limitation la plus importante à considérer concerne les points condyliens étudiés. Peck et al.[138] ont montré la prudence indispensable à tenir sur l'exploitation des trajectoires condyliennes lors de l'utilisation d'un point du condyle. En effet, après l'étude des trajectoires condyliennes par l'intermédiaire de plusieurs points sur le condyle, ils ont démontré que la variabilité sur la trajectoire condylienne est très importante d'un point à l'autre.

D'où l'intérêt majeur de ne pas s'intéresser au déplacement d'un point unique et de quantifier plutôt le comportement de la mandibule dans son ensemble, par la quantification de ses mobilités 3D.

3.4.Mobilités

Pour rappel, nous exprimons à chaque instant la position du repère mandibule par rapport au repère crâne. Le repère crâne est formé d'un axe Yc normal au plan horizontal du crâne (dirigé vers le haut), d'un axe Xc intersection du plan horizontal et du plan sagittal médian du crâne (dirigé vers l'avant), et Zc est créé afin d'obtenir un repère orthonormé direct. Son origine est le milieu de la distance inter-tragi. Concernant le repère mandibule, l'origine est le milieu de la distance inter-condyles (PCD et PCG), l'axe Zm relie les deux condyles (dirigé vers la droite), l'axe Ym est la normale au plan formé par PCD PCG et le point mentonnier M, dirigé vers le haut, et enfin Xm est créé par produit vectoriel pour obtenir un repère orthonormé direct.

Les mobilités de la mandibule par rapport au crâne sont calculées par la méthode des positions successives par rapport à la position initiale. La séquence d'axes utilisée pour le calcul des rotations est (Y, X', Z''), avec Y la rotation axiale autour de l'axe Yc, X' la rotation autour de l'axe X d'un repère intermédiaire, représentant l'inclinaison mandibulaire et Z'' la rotation autour de Zm, rotation autour de l'axe intercondylien mandibulaire. Les trois composantes de la translation représentent la variation de position de l'origine du repère mandibulaire le long des axes du repère crâne (Xc, Yc et Zc).

Après étude de l'influence de la répétabilité du pointage sur la création du repère mandibule, nous avons déterminé que les variations de position et d'orientation de la mandibule, quantifiées dans notre étude cinématique seront considérées comme significatives à partir de 2.5mm et 1.8° respectivement.

3.4.1. Mouvement d'ouverture

Les mobilités lors du mouvement d'ouverture maximale sont présentées pour tous les sujets sur la Figure 61. Pour créer cette figure et afin de superposer tous les sujets, nous avons appliqué une procédure de normalisation des tracés par rapport au temps. Nous séparons le cycle d'ouverture-fermeture pour chaque mobilité en une phase d'ouverture et une phase de fermeture. La jonction entre ces phases représente l'instant où la mandibule atteint son amplitude maximale (MMO). Nous effectuons ensuite une normalisation de la partie ouverture par le temps mis pour réaliser cette ouverture (jusqu'à ouverture maximale) et une normalisation de la partie fermeture par le temps mis pour refermer la bouche jusqu'au retour à la position initiale avec contacts dentaires. Nous obtenons donc pour chaque sujet un mouvement divisé en deux phases (ouverture et fermeture) sur des échelles de 0 à 100%.

Malgré certaines différences entre les sujets, nous pouvons voir l'existence de tendances générales dans la réalisation de ce mouvement. Nous observons l'activation simultanée des 6 degrés de liberté de la mandibule tout au long du cycle d'ouverture-fermeture. Ceci rejoint les travaux récents de Bonnefoy et al.[9] et Dargaud et al.[11] cités dans le chapitre 1 dans lesquels les auteurs évoquent, pour parler de cet aspect simultané de la rotation et de la translation, le concept de « rototranslation ».

Une étude plus détaillée de ces mobilités montre que le mouvement se décompose en 3 mobilités prédominantes : la rotation intercondylienne (R IC), la translation inféro-supérieure (Tr I-S) et la translation postéro-antérieure (Tr P-A) avec des valeurs maximales pouvant atteindre -40.5° pour R IC, -12.9mm pour Tr I-S et 19mm pour Tr P-A, ainsi que 3 mobilités secondaires : l'inclinaison, la rotation axiale (Raxiale) et la translation gauche-droite (Tr G-D) avec des valeurs maximales de l'ordre de -3° pour l'inclinaison et Raxiale et de -2mm pour Tr G-D.

Le mouvement d'ouverture s'effectue par une rotation intercondylienne qui évolue durant toute la phase d'ouverture et qui s'accompagne d'une translation vers l'avant et vers le bas jusqu'à l'ouverture maximale. La déviation latérale de la mandibule, son inclinaison ainsi que sa rotation axiale sont logiquement d'amplitude faible pour ce type de mouvement. Pour la fermeture, le mouvement se fait par une translation postérieure, supérieure et une rotation intercondylienne inversée.

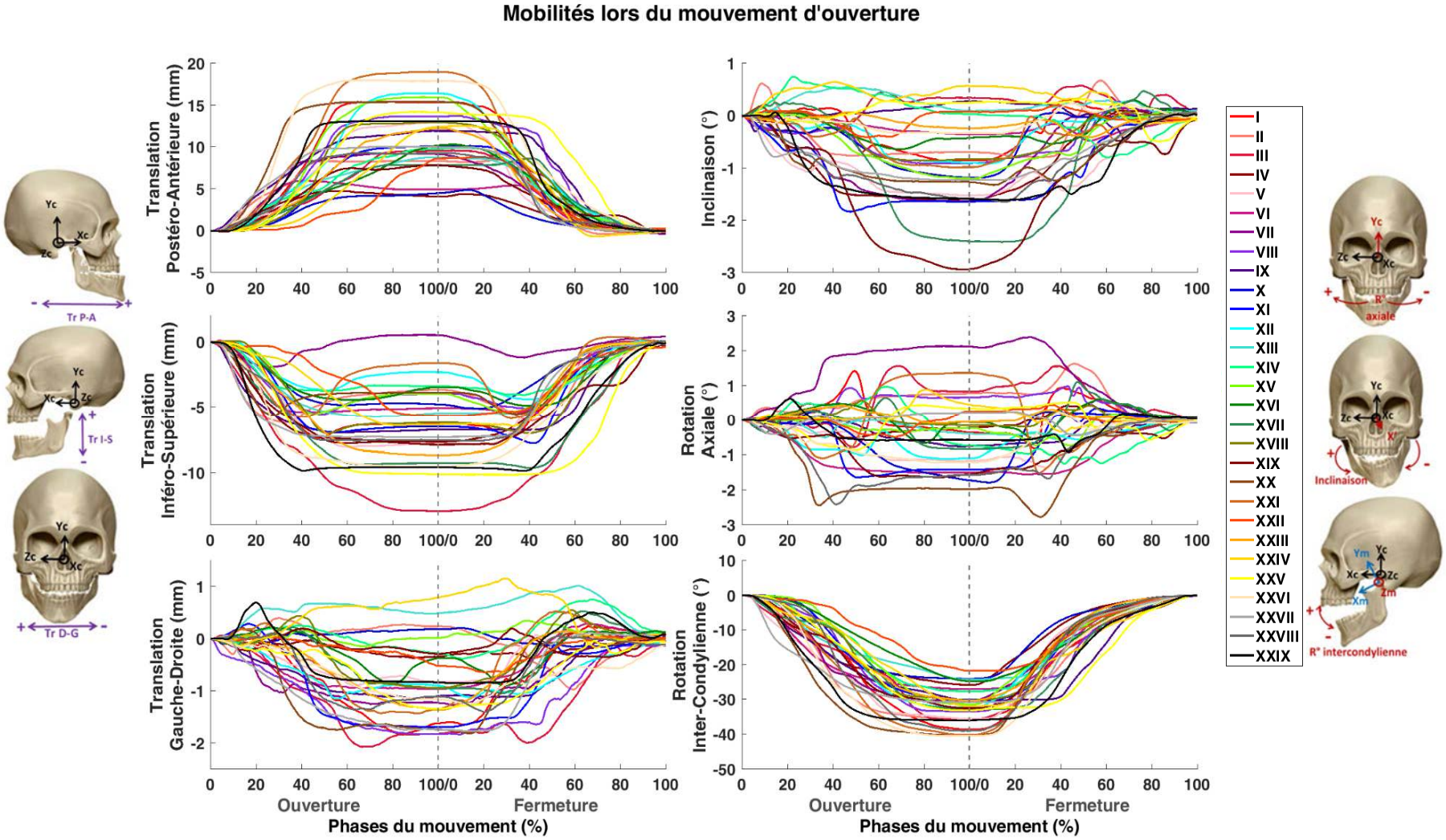


Figure 61 : Mobilités mandibulaires lors du mouvement d'ouverture maximale pour l'ensemble des sujets asymptomatiques. Superposition des sujets pour chaque phase du mouvement (de 0 à 100% de l'ouverture et 0 à 100% de la fermeture)

A partir de ces 29 sujets asymptomatiques, nous créons ensuite les corridors moyens pour chaque mobilité (moyenne ± 1 ou 2 écarts-types correspondant respectivement à 68 et 95% de la population), après vérification de leur normalité par un test de Kolmogorov-Smirnov. Ces corridors sont présentés sur la Figure 62.

Les valeurs moyennes et écarts-types des différentes mobilités à 100% d'ouverture sont les suivantes : -31.9±5.1° en rotation intercondylienne, -6.1±2.9mm en translation inféro-supérieure et 11.3±3.8mm en translation postéro-antérieure. Les mobilités secondaires montrent des valeurs moyennes et d'écart-type du même ordre de grandeur : de -0.8±0.7mm pour la translation latérale, -0.8±0.9° pour l'inclinaison et -0.4±1.0° pour la rotation axiale.

Pour rappel l'étude de répétabilité a permis d'établir un seuil de significativité de 2.5mm et de 1.8°. Les mobilités secondaires montrent des résultats dans cette variabilité de mesure et doivent donc être interprétées avec prudence.

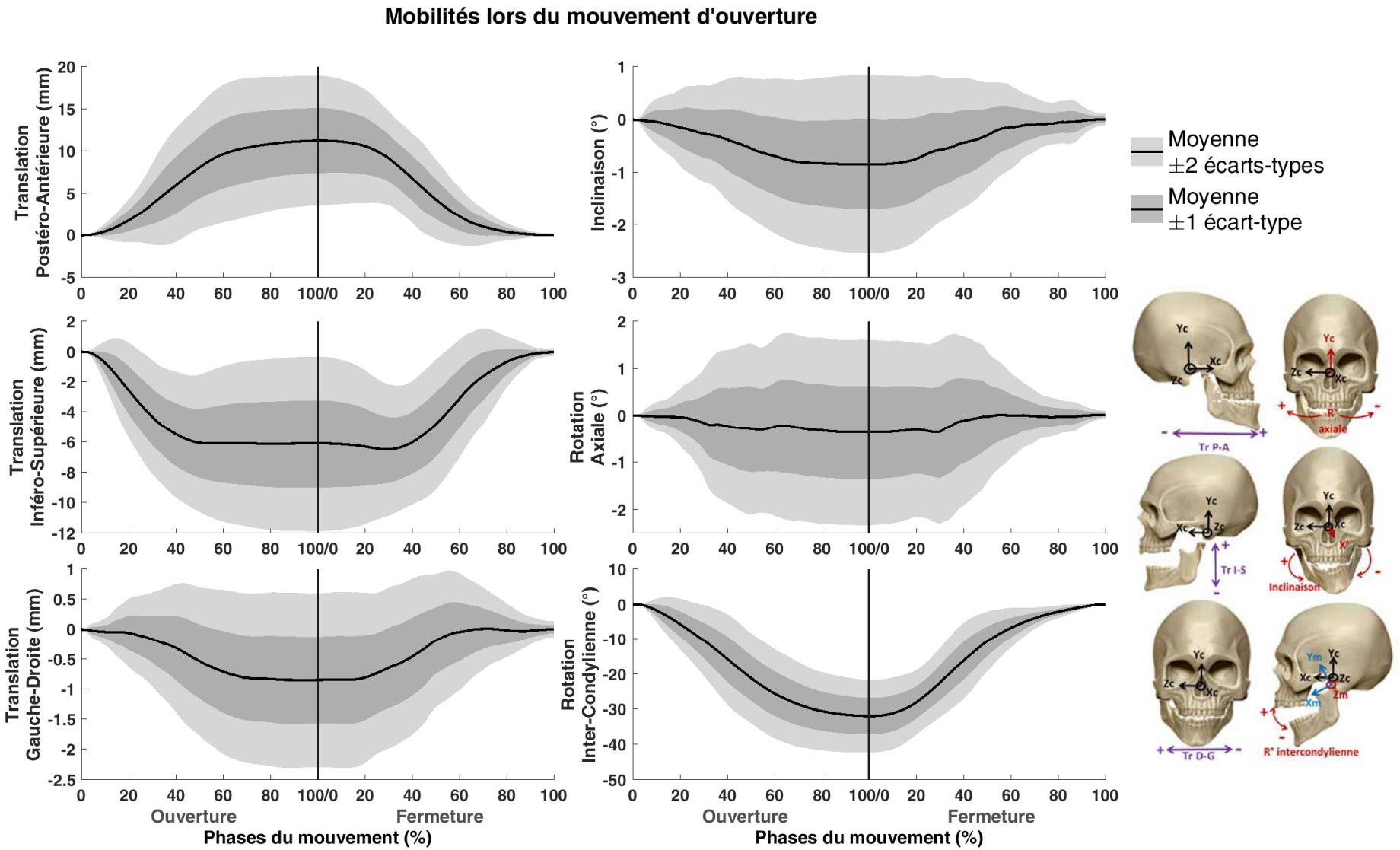


Figure 62 : Mobilités en ouverture pour le groupe asymptomatique, visualisation des corridors représentant la valeur moyenne ±1 écart-type (gris foncé) ou ±2 écart-types (gris clair) issus de l'étude des 29 sujets de référence

Nos résultats pour la rotation intercondylienne, classiquement appelée l'angle d'ouverture, sont proches des données de la littérature. En effet, Sforza et al. [139] ont étudié 27 sujets asymptomatiques et ont calculé une valeur moyenne de 32.8±1.2° pour l'angle d'ouverture. Une autre étude a aussi été réalisée sur 35 sujets asymptomatiques par Naeije et al. [88] avec des valeurs de 34.7±5.7°. Les données pour les autres mobilités demeurent peu présentes dans la littérature. Coutant et al. [62] donnent des valeurs pour la translation postéro-antérieure de 15.5±4.1mm pour 32 sujets asymptomatiques, à comparer avec nos valeurs de 11.3±3.8mm. Mappeli et al. [96] effectuent une étude sur 20 sujets asymptomatiques, avec des valeurs de 34.0±4.2° en R IC, 2.9±2.6° en inclinaison et 2.6±1.8° en Raxiale, 6.9±2.5mm en Tr I-S et 12.7±3.4mm en Tr P-A. Les résultats de cette équipe, bien que concernant l'ensemble des mobilités mandibulaires, restent cependant limités à l'étude des valeurs maximales des mobilités, sans discussion de leur évolution au cours du mouvement. Chen et al. [140] ont commencé récemment à étudier les mobilités 3D de la mandibule en décrivant leur évolution au cours du mouvement d'ouverture mais l'étude reste cependant limitée à un seul sujet.

Les rotations quantifiées dans ces différentes études ne sont pas issues d'une décomposition avec les mêmes séquences d'axes que la nôtre. Cependant, étant donné que seule la rotation intercondylienne est significative sur l'ensemble des rotations, la séquence d'axe choisie importe peu lors du mouvement d'ouverture, ce qui nous permet alors une comparaison avec les données de la littérature.

Peu d'études ont par ailleurs dissocié les hommes et les femmes dans l'exploitation des résultats. Dans notre étude, la distinction entre les corridors de mobilités obtenus pour les femmes et pour les hommes est effectuée sur la Figure 63. Sur cette figure, les corridors ont été calculés à partir des 11 femmes et 18 hommes asymptomatiques de l'étude. Nous remarquons que les hommes ont tendances à effectuer le mouvement d'ouverture avec des mobilités principales légèrement plus grandes en translation. La rotation intercondylienne n'est quasiment pas affectée par le genre. Cependant, après vérification par un test de Mann-Whitney ($n=29$, $\alpha=0.05$), il n'existe pas de différences significatives entre les hommes et les femmes. Nous pouvons cependant observer des différences sur les mobilités secondaires.

Ce qui est également le cas pour Mapelli et al. [87], qui ont calculé les angles mandibulaires sur 26 sujets asymptomatiques et obtiennent des valeurs de 0.5±1.7° en inclinaison et 0.3±1.1° en Raxiale pour 14 femmes et de respectivement 0.3±0.9° et 0.5±1.1° pour 12 hommes.

Cependant, compte tenu des faibles valeurs obtenues et de l'importance des écart-types, surtout pour les femmes, il est délicat de proposer des conclusions quant à cette comparaison hommes-femmes.

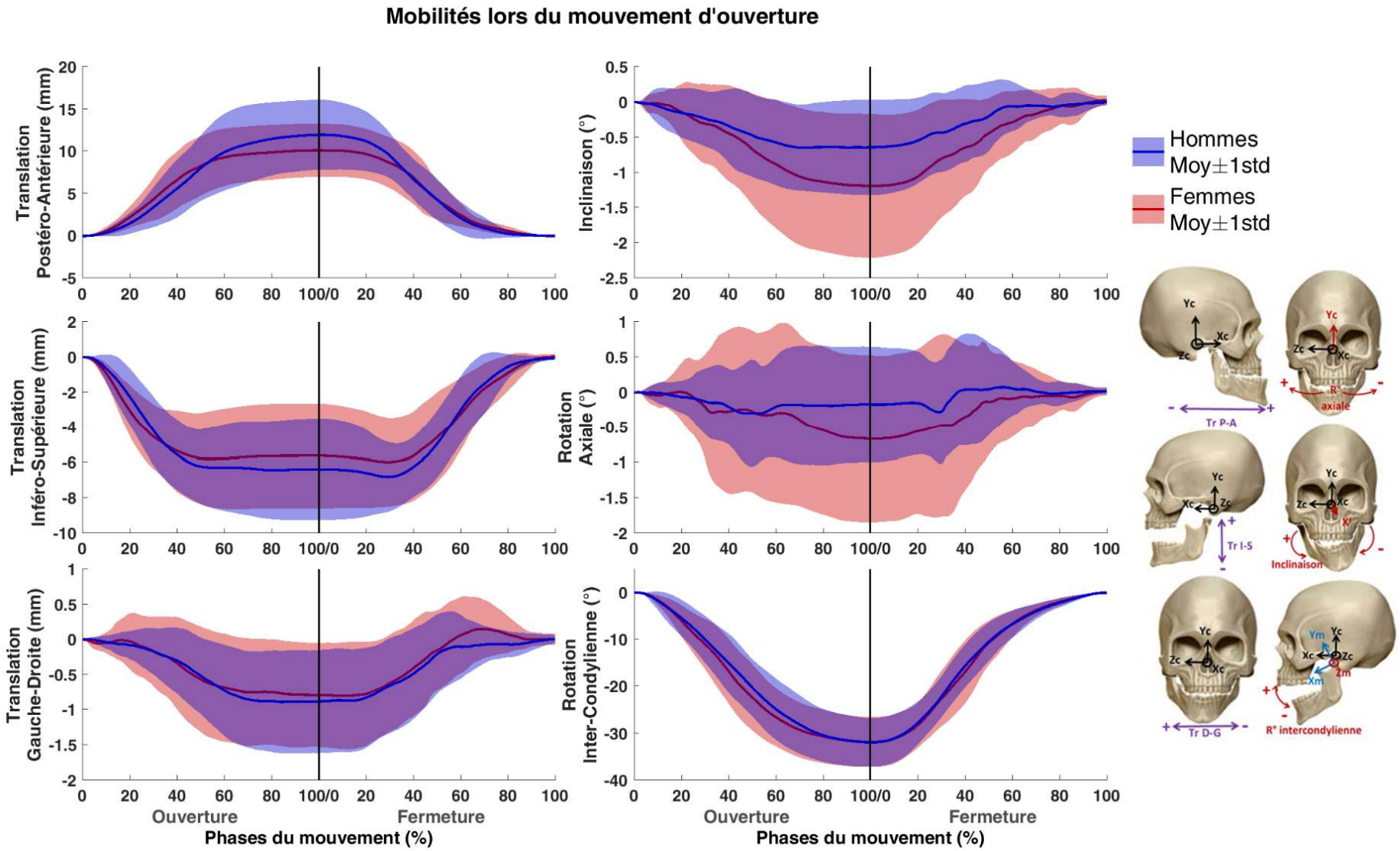


Figure 63 : Comparaison des valeurs moyennes et corridors (à± 1 écart-type) des mobilités entre 18 hommes (en bleu) et 11 femmes (en rouge) pour la réalisation du mouvement d'ouverture

Nous avons, dans la première partie de ce chapitre, introduit deux autres paramètres indépendants à prendre en compte dans notre étude : la classe d'occlusion et la main dominante des sujets (droitier-gaucher). Pour rappel les classes d'occlusion sont déterminées selon la position de la première molaire supérieure par rapport à la première molaire inférieure. Les sujets de classe 1 sont donc les occlusions appelées « normales ». Les sujets de classe 2 présentent une arcade dentaire maxillaire anormalement avancée par rapport aux dents de la mandibule et les sujets de classe 3 montrent une dentition mandibulaire en avant de celle du maxillaire.

L'étude des différentes classes d'occlusion s'effectue pour 25 sujets de classe 1, 1 sujet de classe 2 et 3 sujets de classe 3, alors que l'étude de la main dominante compare 26 droitiers avec 3 gauchers.

La comparaison de ces classes d'occlusion montre des particularités sur la rotation axiale, qui sont cependant comprises dans notre seuil de variabilité.

Pour la comparaison entre droitiers et gauchers, nous observons une différence sur l'inclinaison. Les sujets gauchers présentent des valeurs plus importantes sur cette mobilité. Néanmoins cette particularité n'est pas retrouvée pour l'ensemble des sujets gauchers.

Nous ne pouvons donc pas dégager de tendances générales concernant ces deux études pour le mouvement d'ouverture. De ce fait, nous ne nous attarderons pas sur ces figures qui seront visualisables en annexe 3 pour l'étude de la main dominante et en annexe 4 pour l'étude de l'occlusion.

Le protocole cinématique que nous avons mis en place nous permet donc d'obtenir une description complète des 6 mobilités lors du mouvement d'ouverture-fermeture et d'effectuer une analyse de ces mobilités en fonction de plusieurs paramètres caractéristiques du sujet étudié. Pour pouvoir proposer des conclusions pertinentes sur l'influence des paramètres étudiés, un plus grand nombre de sujets représentatifs d'une catégorie de population pourra être intégré à l'étude. A notre connaissance, il n'existe pas d'autres études similaires réalisées sur ces mobilités mandibulaires pour le mouvement d'ouverture.

3.4.2. Mouvement de propulsion

Nous visualisons sur la Figure 64, les mobilités en propulsion pour l'ensemble des sujets asymptomatiques. Nous avons, sur cette figure, décomposé le mouvement en 4 phases correspondant aux consignes données pour l'exécution du mouvement pendant les mesures : une phase d'ouverture de la bouche suivie d'une phase aller pendant laquelle le sujet amène la mandibule le plus loin possible en avant puis une phase retour qui ramène la mandibule pour positionner les dents en vis-à-vis, et enfin une phase de fermeture. Les mobilités sont tracées de 0 à 100% pour chaque phase avec une normalisation par la durée de chaque phase.

Comme pour le mouvement d'ouverture-fermeture, des différences existent entre les différents sujets mais il apparaît clairement que le mouvement de propulsion présente des mobilités principales et des mobilités secondaires. Les mobilités principales sont les translations inféro-supérieure et postéro-antérieure ainsi que la rotation intercondylienne. Le mouvement démarre tout d'abord par une faible rotation intercondylienne (R IC) pour générer l'ouverture de la bouche. Les deux translations s'enclenchent dès l'ouverture puis s'amplifient de façon très importante pour générer l'avancée de la mandibule. En ce qui concerne la rotation intercondylienne, elle s'effectue dans le sens inverse pendant cette avancée mandibulaire. Les phases de retour et de fermeture montrent les mouvements inverses. Les mobilités (inclinaison, Raxiale et Tr G-D) initiées pendant l'ouverture s'accentuent de façon significative pendant l'avancée de la mandibule mais restent néanmoins dans des gammes de valeurs inférieures aux valeurs seuil de répétabilité du protocole.

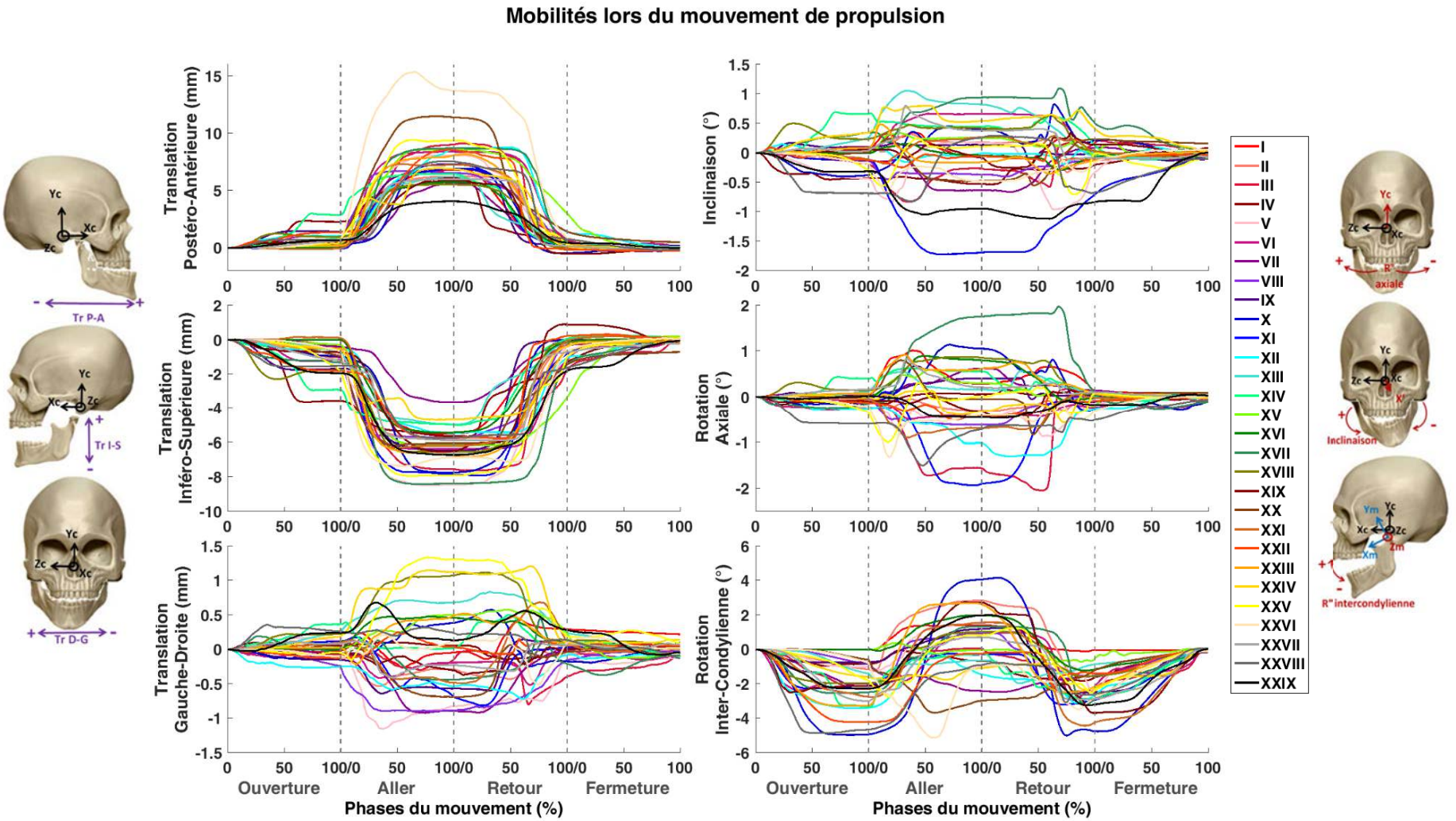


Figure 64 : Mobilités mandibulaires lors du mouvement de propulsion pour l'ensemble des sujets asymptomatiques. Superposition des sujets par normalisation des résultats pour chaque phase du mouvement (de 0 à 100% de l'ouverture, de 0 à 100% de la phase de mouvement « aller » vers l'avant, de 0 à 100% de la phase de retour en arrière et de 0 à 100% de la fermeture)

Comme pour le mouvement d'ouverture nous traçons les corridors pour les mobilités du groupe asymptomatique. Cependant, certains sujets de ce groupe ne dissocient pas suffisamment les différentes phases durant le mouvement, comme indiqué par les consignes. En effet, pour certains, la phase d'ouverture et d'aller s'effectuent en parallèle (ou le retour avec la fermeture), ce qui entraine des différences sur les mobilités. Pour que les corridors soient représentatifs de mouvements similaires, nous n'avons inclus dans ces corridors que les sujets respectant strictement les consignes du protocole. Nous avons de plus distingué les phases ouverture-aller des phases retour-fermeture. Pour l'ouverture-aller, 17 sujets ont été retenus, contre 23 sujets pour les phases retour-fermeture. Les corridors sont présentés sur la figure ci-dessous.

La visualisation de ces corridors permet de bien distinguer les différentes phases du mouvement et d'identifier les six mobilités pour chacune de ces phases. Si nous étudions, à présent les valeurs moyennes et écart-type de ces mobilités (nous prenons ici la valeur à la position extrême du mouvement considéré, soit à 100% de la phase aller), nous trouvons des valeurs de 7.5±1.2mm pour Tr P-A, -6.7±1.0 pour Tr I-S, -0.1±0.6mm pour Tr G-D, 0.1±0.6° pour l'inclinaison, -0.2±0.9° pour Raxiale et 1.1±1.4° pour R IC. Nous pouvons cependant préciser que les valeurs maximales de rotation intercondylienne sont obtenues durant les phases d'ouverture et de fermeture et sont respectivement de -2.6° et -2.5°. Nous observons également clairement sur cette figure que les valeurs moyennes de translation gauche-droite, inclinaison et rotation axiale restent très proches de la valeur nulle sur l'ensemble des phases du mouvement de propulsion.

Aucune comparaison ne peut ici être effectuée avec les données de la littérature car il n'existe à ce jour, à notre connaissance, aucune donnée sur les mobilités tridimensionnelles du mouvement de propulsion.

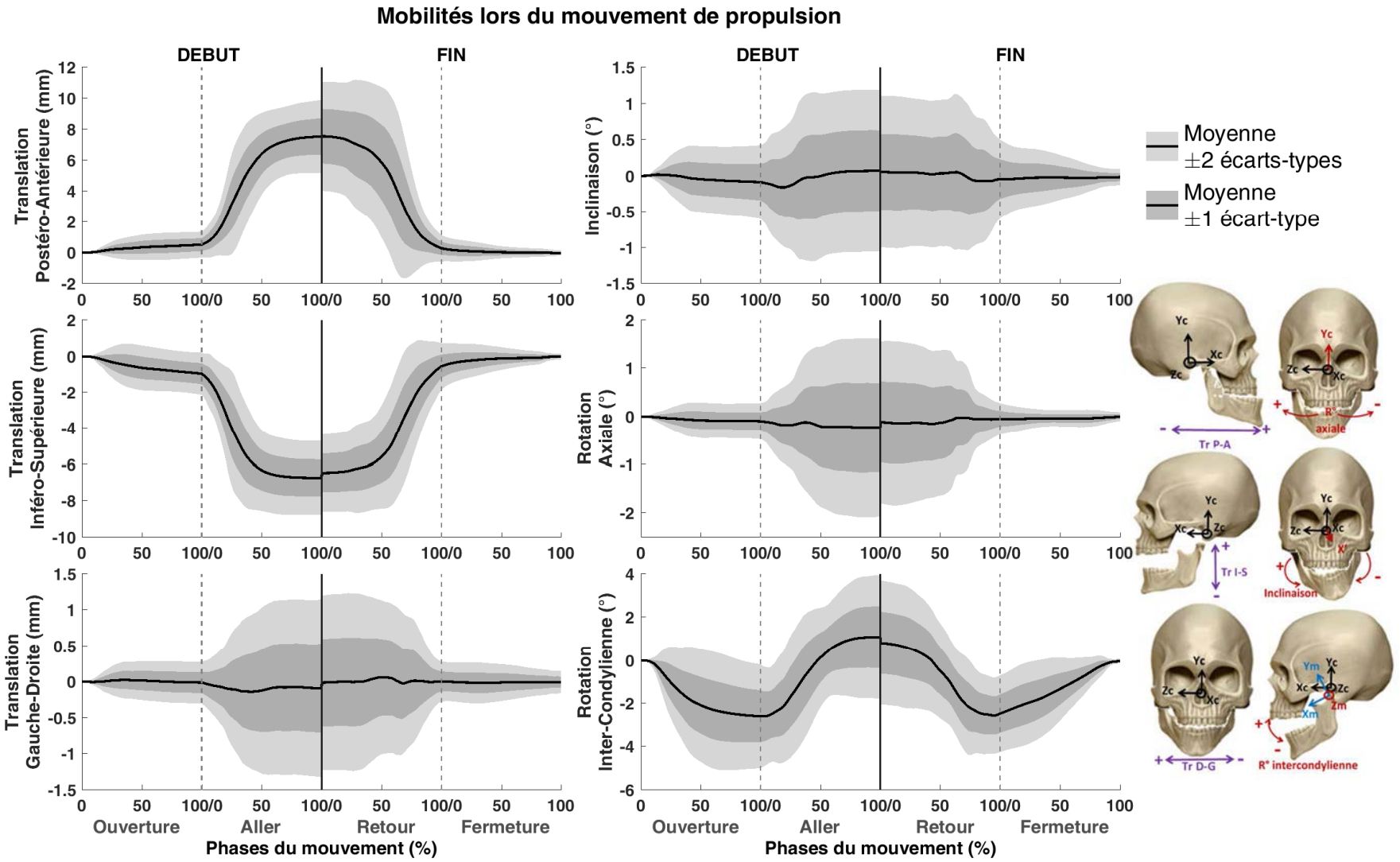


Figure 65 : Mobilités en propulsion pour le groupe asymptomatique, visualisation, par pourcentage de phase de mouvement, les corridors représentant la valeur moyenne ±1 écart-type (gris foncé) ou ±2 écart-types (gris clair) issus de l'étude des sujets respectant les consignes données pour la réalisation des mouvements soit 17 sujets pour les phases ouverture & aller et 23 sujets pour les phases retour & fermeture

Comparons à présent les mobilités entre les hommes et les femmes respectant les consignes (Figure 66). Le groupe ouverture-aller est constitué de 5 femmes-12 hommes et le groupe retour-fermeture de 7 femmes-16 hommes.

Tout comme pour le mouvement d'ouverture, les différences observées entre les hommes et les femmes sur les mobilités principales de translation postéro-antérieure et rotation intercondylienne au point maximal du mouvement ne sont pas significatives (vérifié par le test de Mann-Whitney). Concernant les mobilités secondaires (inclinaison, rotation axiale et translation latérale), les différences observées sont une fois encore non significatives, compte tenu des faibles amplitudes mesurées et de la taille des écarts-types.

Ces résultats nécessiteraient une confirmation, étant donné la taille des populations étudiées.

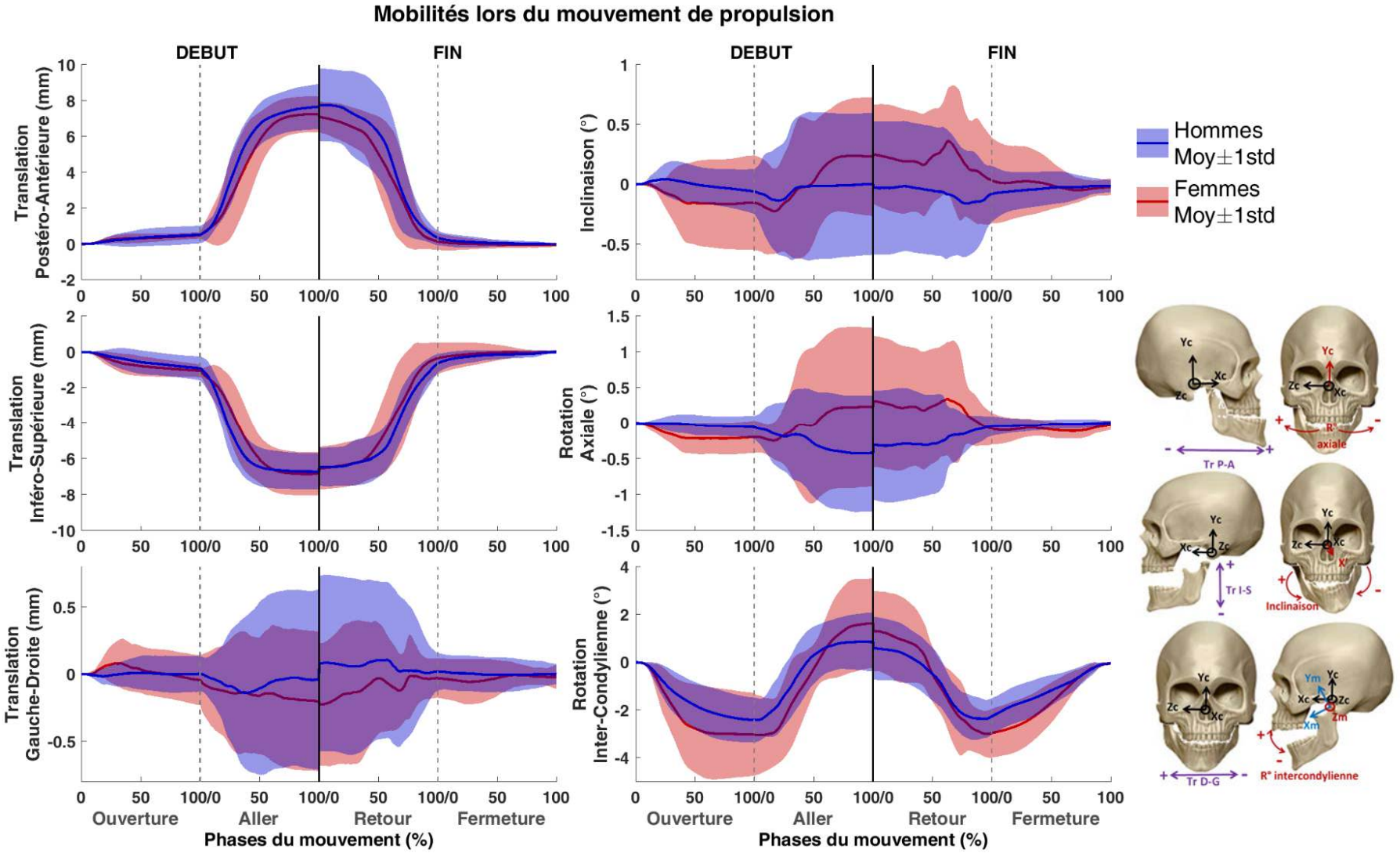


Figure 66 : Comparaison des valeurs moyennes et corridors (à± 1 écart-type) des mobilités lors du mouvement de propulsion. Visualisation par phase de mouvement pour les sujets respectant les consignes soient 5 femmes (en rouge) & 12 hommes (en bleu) en ouverture-aller et 7 femmes & 16 hommes en retour-fermeture.

Concernant l'étude des autres paramètres (occlusion et main dominante), nous ne comparons que les sujets qui respectent les consignes. Pour l'étude de la main dominante nous étudions donc 14 droitiers et 3 gauchers en ouverture-aller et 20 droitiers et 3 gauchers retour-fermeture. Pour l'étude des classes d'occlusion, la comparaison s'effectue sur 15 sujets avec occlusion de classe 1, 1 sujet avec occlusion de classe 2 et 1 sujet avec occlusion de classe 3 en ouverture-aller ainsi que 20 sujets de classe 1, 1 sujet de classe 2 et 2 sujets de classe 3 en retour-fermeture. Nous n'observons aucune différence entre droitiers et gauchers, et la seule particularité observée pour la comparaison des classes d'occlusion est visible pour le sujet avec occlusion 2. Pour ce dernier, le seul élément distinctif concerne l'inclinaison dont l'amplitude est augmentée par rapport à la classe 1. Néanmoins, cette information ne permet pas de dégager des tendances générales car cette étude n'est effectuée que sur un seul sujet de classe 2. De ce fait les figures de ces comparaisons ne seront pas présentées dans ce chapitre mais uniquement en annexe 3 pour la comparaison droitier-gaucher et en annexe 4 pour la comparaison entre classe d'occlusion.

3.4.3. Mouvements latéraux

Les résultats des mobilités pour les mouvements latéraux sont illustrés sur les Figure 67 (latéralité droite) & Figure 68 (latéralité gauche). Comme pour le mouvement de propulsion, nous avons sur ces figures décomposé le mouvement en 4 phases correspondant aux consignes données pour l'exécution du mouvement pendant les mesures : une phase d'ouverture pour libérer les dents de la mandibule, une phase aller pour emmener la mandibule sur le côté, une phase retour pour ramener la mandibule en face du maxillaire et une phase de fermeture.

Contrairement aux autres mouvements étudiés, les résultats obtenus ne montrent pas de mobilités prédominantes (les valeurs extrêmes varient entre 1.5 et 7.9mm en translation postéro-antérieure, entre -1 et -4.9mm en translation inféro-supérieure, entre (-)0.6 et (-)4.1mm en translation latérale, entre (-)1.7 et (-)5.6° pour l'inclinaison, entre (-)2.1 et (-)7.1° en rotation axiale et entre -0.5 et -7.5° pour la rotation intercondylienne.

Nous pouvons remarquer que les mobilités s'activent différemment selon la phase du mouvement, sauf pour la rotation intercondylienne pour laquelle les valeurs évoluent peu sur l'ensemble du mouvement.

Lors de la phase d'ouverture, comme pour les mouvements précédemment décrits, il y a une activation de la rotation intercondylienne et des translations postéro-antérieure et inféro-supérieure, alors que les autres mobilités restent secondaires.
Lors de la phase latérale aller, nous voyons une forte activation de l'ensemble des mobilités, sauf la rotation intercondylienne qui n'évolue pas.
Lors de la phase retour, les mobilités montrent les tendances inverses.
Nous pouvons donc dire que les six mobilités participent à la réalisation de ce mouvement latéral.

Lors du mouvement à droite (Figure 67), la translation latérale s'effectue vers la droite, l'inclinaison est négative, ce qui signifie que la mandibule tourne dans le sens horaire donc s'incline vers la droite, et la rotation axiale négative témoigne d'une rotation vers la droite. Les tendances opposées sont obtenues pour le mouvement à gauche (Figure 68).

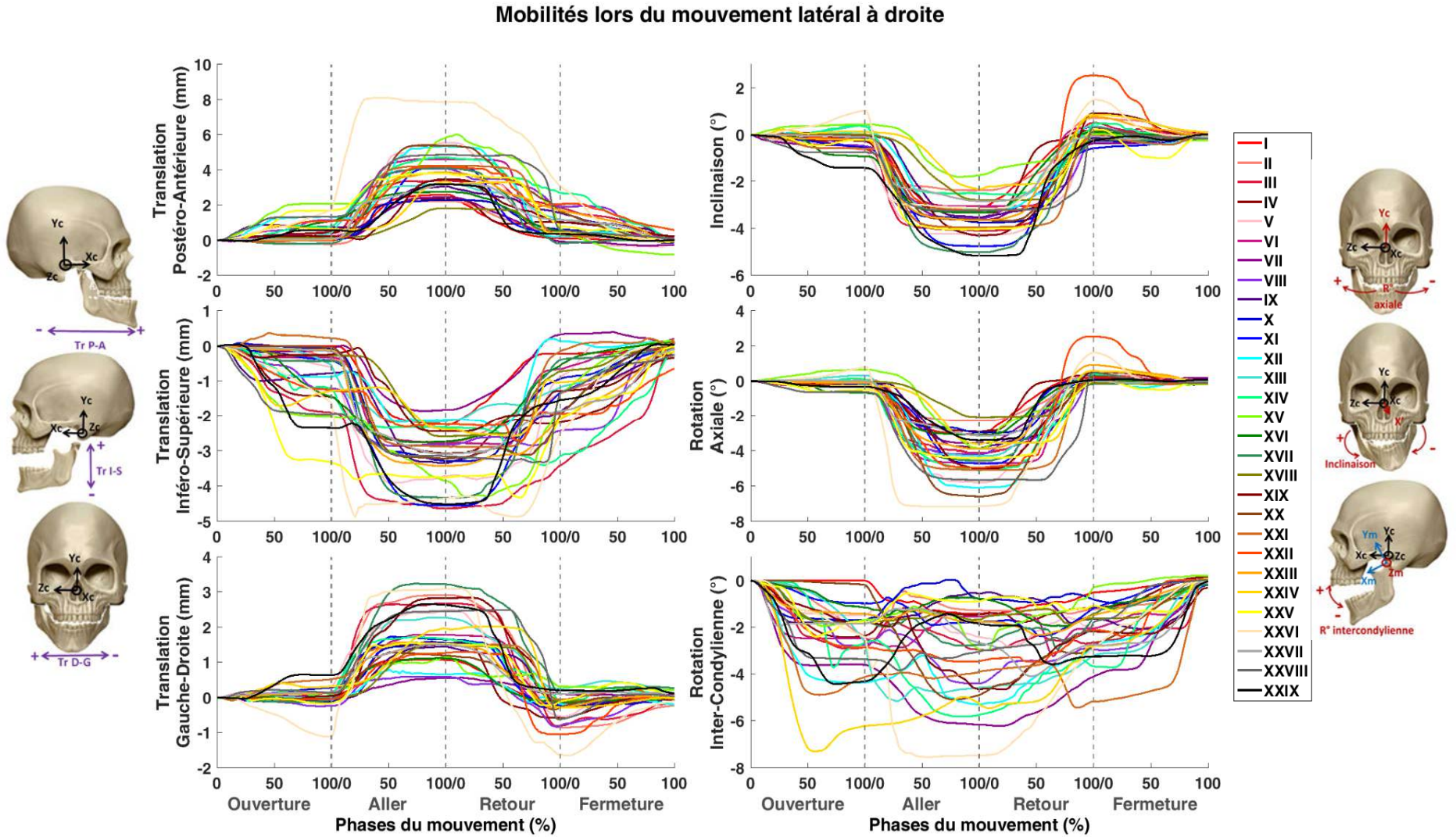


Figure 67 : Mobilités mandibulaires lors du mouvement latéral à droite pour l'ensemble des sujets asymptomatiques. Superposition des sujets par normalisation des résultats pour chaque phase du mouvement (de 0 à 100% de l'ouverture, de 0 à 100% de l'aller vers le côté, de 0 à 100% de la phase de retour et de 0 à 100% de la fermeture)

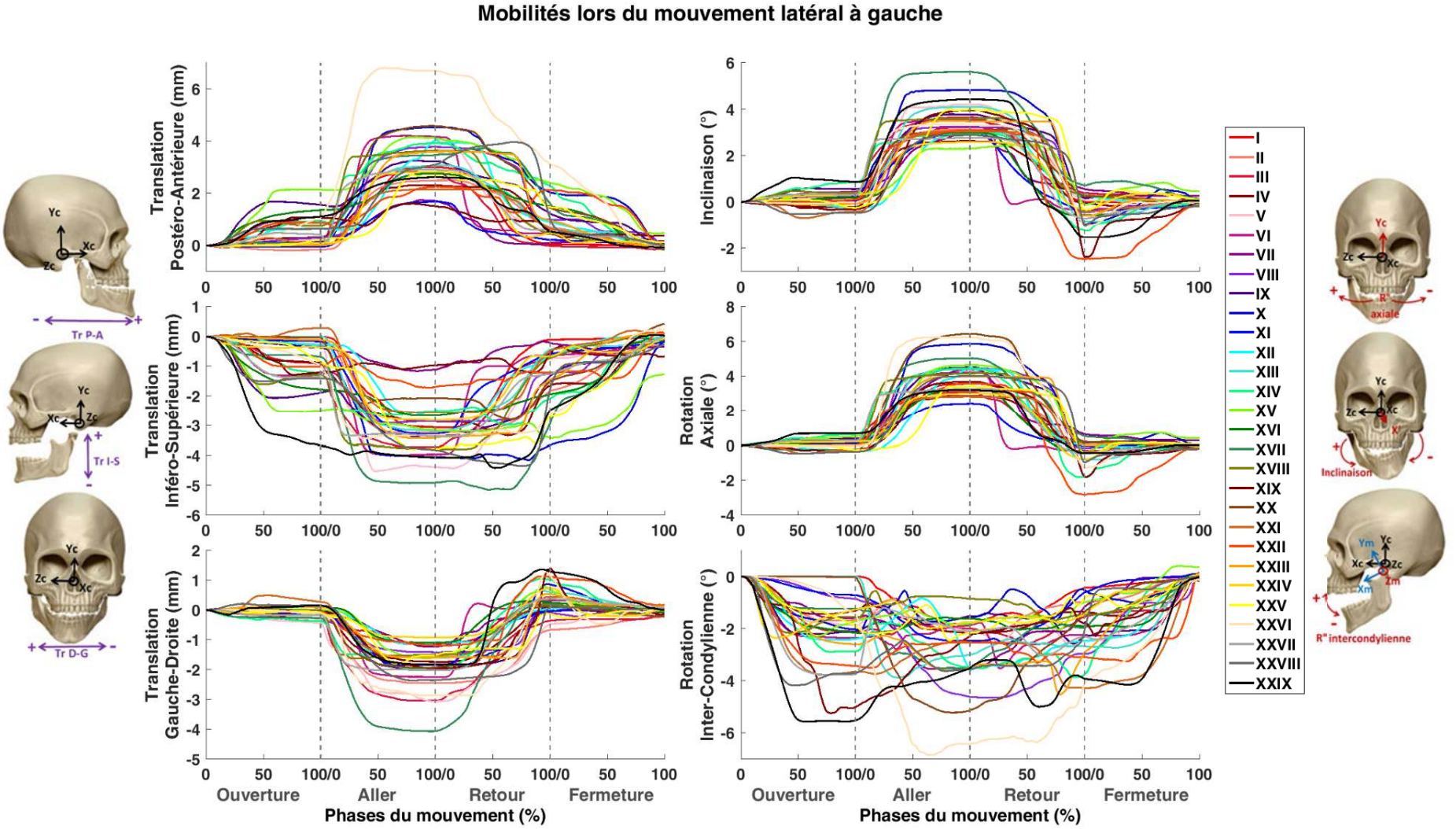


Figure 68 : Mobilités mandibulaires lors du mouvement latéral à gauche pour l'ensemble des sujets asymptomatiques. Superposition des sujets par normalisation des résultats pour chaque phase du mouvement (de 0 à 100% de l'ouverture, de 0 à 100% de l'aller vers le côté, de 0 à 100% de la phase de retour et de 0 à 100% de la fermeture)

Comme pour la propulsion, les corridors sont créés à partir des sujets respectant les consignes. En effet lors des mouvements latéraux, certains sujets n'ont pas effectué la distinction des phases lors du mouvement. Ces sujets vont effectuer la latéralité en parallèle de l'ouverture de la bouche (non-respect des consignes en début de mouvement), ou fermer la bouche tout en ramenant la mandibule en face du maxillaire (non-respect des consignes en fin de mouvement). Il nous reste donc 20 sujets en début de mouvement (ouverture-aller) et 16 sujets en fin de mouvement (retour-fermeture) pour le mouvement à droite et 21 sujets en ouverture-aller et 20 sujets en retour-fermeture pour la latéralité gauche.

La Figure 69 montre que les résultats des mouvements à gauche et à droite sont très bien superposés, que ce soit au niveau des valeurs moyennes ou des corridors. Pour les sujets respectant bien les consignes de réalisation des mouvements, aucune différence notable n'est visible entre les mouvements réalisés à gauche et à droite. Cette fois encore, la construction des corridors permet de bien distinguer les différentes phases du mouvement et d'identifier le rôle des mobilités dans chacune de ces phases.

Les deux mouvements latéraux débutent par une rotation intercondylienne qui augmente jusqu'à atteindre une valeur moyenne de 2.6° (Tableau 14). Cette rotation s'accompagne des translations antérieures et inférieures pouvant atteindre respectivement 0.7mm et 1.1mm en fin d'ouverture. Les autres mobilités sont très faibles. A partir de ce moment débute la latéralité avec l'ensemble des mobilités qui s'enclenchent. A la fin de cette phase, les valeurs moyennes des mobilités peuvent atteindre des valeurs entre 3 et 4mm pour les translations postéro-antérieure et inféro-supérieure et entre 3 et 4° pour l'inclinaison et la rotation axiale. Les deux autres mobilités sont plus faibles avec environ 2mm pour la translation latérale et la rotation intercondylienne qui reste à sa valeur d'ouverture d'environ 2.5°.

La latéralité retour et la fermeture s'effectuent inversement à la phase aller et ouverture.

Tableau 14 : Valeurs des mobilités à la fin de la phase d'ouverture et à la fin de la phase de latéralité pour les deux mouvements latéraux, valeurs moyennes et écart-types issues de l'étude des sujets respectant les consignes

	LATERALITE A DROITE				**LATERALITE A GAUCHE**			
	Fin de phase ouverture		Fin de phase aller		Fin de phase ouverture		Fin de phase aller	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
TR P-A (mm)	0,6	0,6	3,6	1,1	0,7	0,6	3,3	1,1
Tr I-S (mm)	-1,0	0,9	-3,1	0,8	-1,1	0,9	-3,2	0,8
Tr G-D (mm)	0,1	0,2	1,8	0,7	-0,1	0,2	-1,9	0,6
Inclinaison (°)	-0,2	0,4	-3,4	0,8	0,2	0,4	3,4	0,6
Raxiale (°)	-0,2	0,3	-3,9	1,1	0,1	0,3	4,0	0,9
R IC (°)	-2,6	1,3	-2,5	1,5	-2,6	1,2	-2,5	1,2

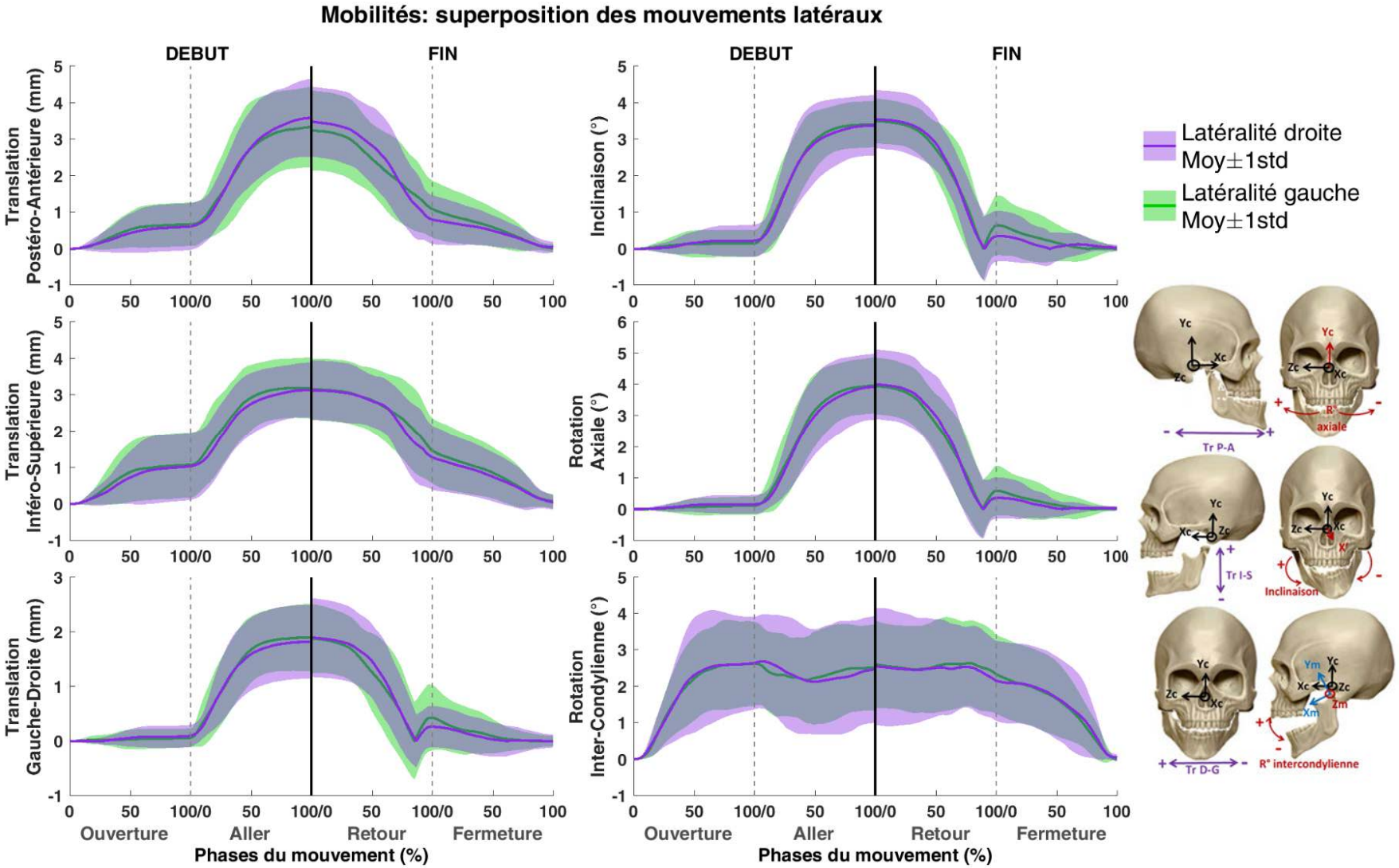


Figure 69 : Superposition des valeurs absolues des mobilités mandibulaires des mouvements latéraux à droite (violet) et à gauche (vert), pour les sujets respectant les consignes données pour la réalisation des mouvements soient, pour les phases ouverture & aller 20 sujets en latéralité droite et 21 sujets en latéralité gauche et, pour les phases retour & fermeture 16 sujets en latéralité droite & 20 sujets en latéralité gauche.

Nous comparons à présent les résultats obtenus pour les hommes et les femmes sur ces mouvements latéraux. Pour le mouvement à droite, le groupe est constitué de 6 femmes-14 hommes en ouverture-aller et de 6 femmes-10 hommes en retour-fermeture. Pour le mouvement à gauche une population de 6 femmes-15 hommes est étudiée en ouverture-aller contre 7 femmes-13 hommes en retour-fermeture.

Il existe des différences entre hommes et femmes pour les valeurs au point maximal du mouvement pour la translation gauche-droite (2.3±0.7mm pour les femmes et 1.6±0.6 pour les hommes), la translation inféro-supérieure (-3.5±0.9mm pour les femmes et -3.0±0.7mm pour les hommes) et l'inclinaison (-4.0±0.9° pour les femmes et -3.1±0.7° pour les hommes) pour le mouvement latéral vers la droite et pour l'inclinaison du mouvement à gauche (3.8±0.8° pour les femmes et 3.3±3.5° pour les hommes) et sa rotation axiale (4.3±0.9° pour les femmes et 3.8±0.9° pour les hommes). Cependant, après vérification par le test de Mann-Whitney, ces différences entre les hommes et les femmes au point maximal du mouvement ne sont pas significatives.

Concernant à présent la réalisation des mouvements (Figure 70 & Figure 71), nous pouvons distinguer qu'en dehors de ces valeurs plus importantes chez les femmes pour ces mobilités, les réalisations sont similaires entre hommes et femmes pour le mouvement vers la droite. Pour le mouvement à gauche, nous pouvons voir une différence dans la réalisation pour la rotation intercondylienne et la translation inférieure. Les femmes vont donc avoir tendance à ouvrir plus la bouche pour effectuer le mouvement vers le côté. Cependant, comme pour le mouvement de propulsion, ces résultats devraient être confirmés compte tenu du nombre de sujets limité dans chacun de ces groupes.

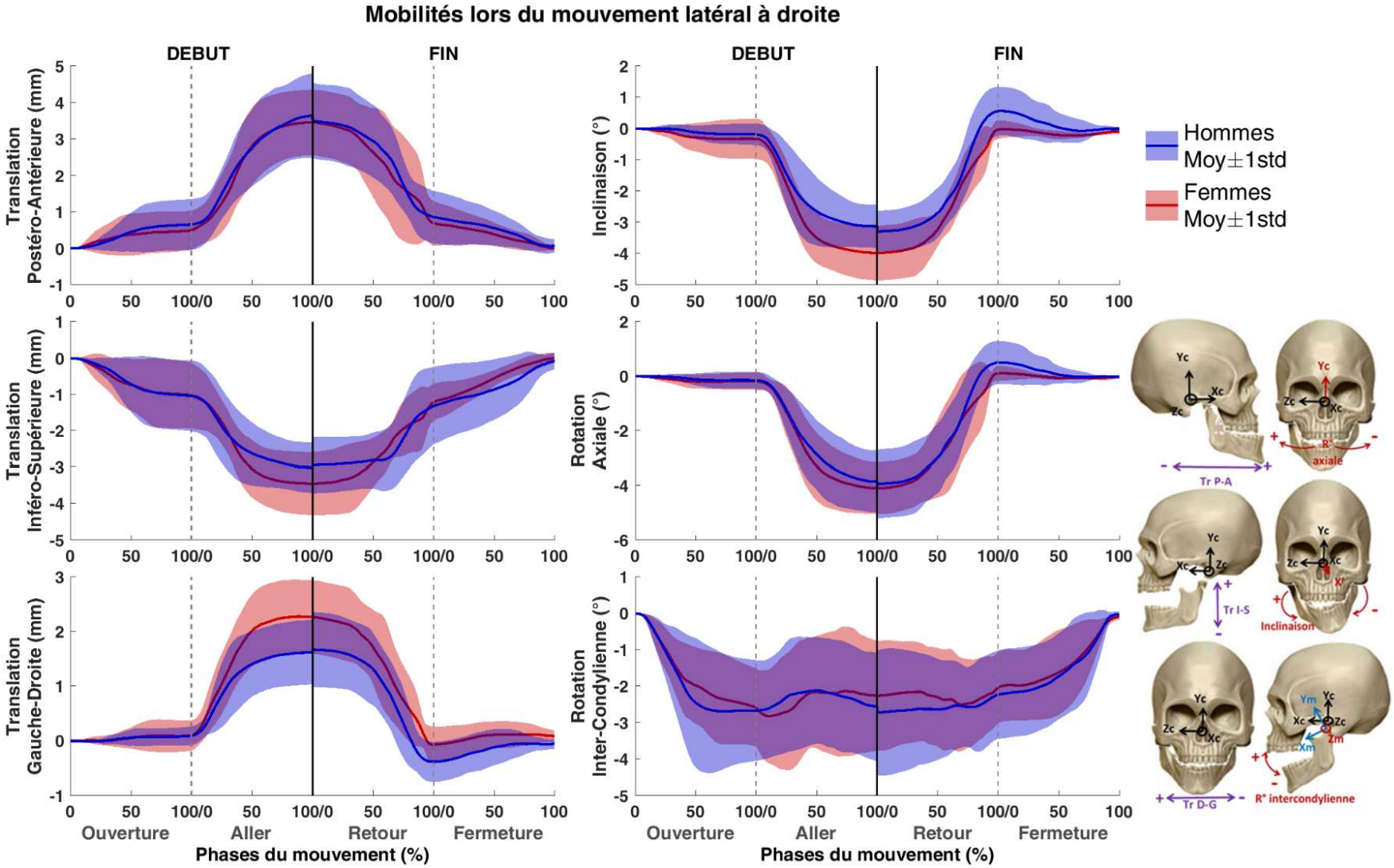


Figure 70 : Comparaison des valeurs moyennes et corridors (à± 1 écart-type) des mobilités lors du mouvement latéral à droite. Visualisation par phase de mouvement pour les sujets respectant les consignes soient 6 femmes (en rouge) & 14 hommes (en bleu) en ouverture-aller et 6 femmes & 10 hommes en retour-fermeture

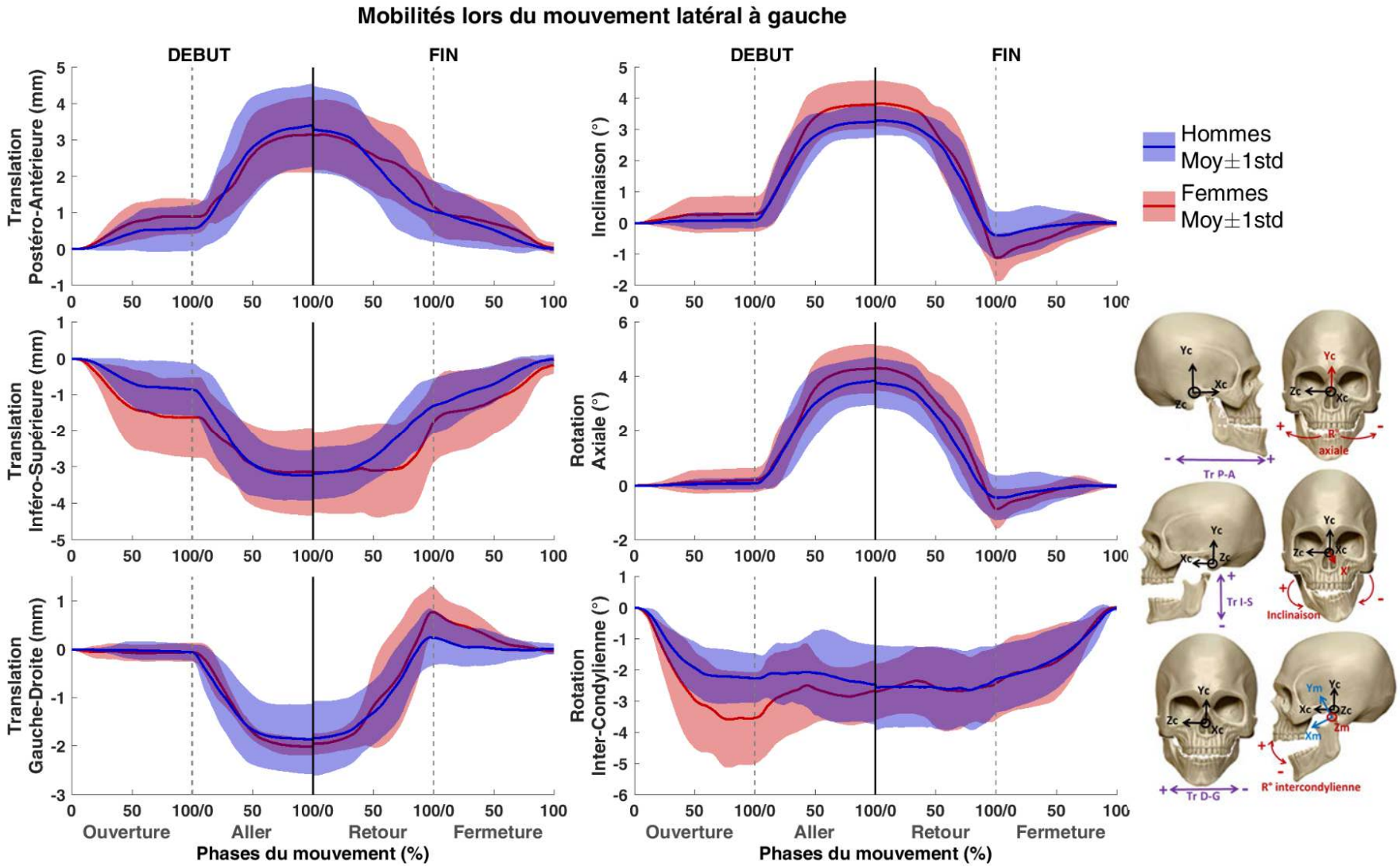


Figure 71 : Comparaison des valeurs moyennes et corridors (à± 1 écart-type) des mobilités lors du mouvement latéral à gauche. Visualisation par phase de mouvement pour les sujets respectant les consignes soient 6 femmes (en rouge) & 15 hommes (en bleu) en ouverture-aller et 7 femmes & 13 hommes en retour-fermeture

Concernant l'étude de la classe d'occlusion, nous comparons, pour le mouvement latéral à droite,18 sujets avec occlusion 1 et 2 sujets avec occlusion 3 en ouverture-aller et 14 sujets de classe 1 et 2 sujets de classe 3 en retour-fermeture, et en latéralité gauche : 19 sujets avec occlusion 1 et 2 sujets avec occlusion 3 en ouverture-aller et 18 de classe 1 et 2 de classe 3 en retour-fermeture. Les figures consignées en annexe 4 ne présentent aucune différence entre les sujets de classe 1 et les sujets de classe 3 lors de ces mouvements latéraux. A l'instar de la comparaison entre les sujets droitiers et les sujets gauchers (visualisables en annexe 3), qui, contrairement à ce qui aurait pu être attendu, ne montre pas de différence pour les mouvements de latéralité. L'étude était effectuée ici sur 18 droitiers et 2 gauchers en ouverture-aller lors du mouvement à droite et 19 droitiers er 2 gauchers en ouverture-aller à gauche, ainsi que 14 droitiers et 2 gauchers en retour-fermeture à droite et 18 droitiers et 2 gauchers en retour-fermeture lors du mouvement à gauche.

Finalement, il est important de noter qu'aucune comparaison de ces résultats n'est possible avec la littérature compte tenu de l'inexistence de l'étude des mobilités pour ces mouvements latéraux.

4. Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats fournis par l'analyse cinématique des 29 sujets asymptomatiques. L'étude des amplitudes maximales de déplacement du point interincisif, effectuée à la fois dans la direction principale du mouvement ainsi que sur les normes a permis d'effectuer une comparaison avec les données de la littérature. Une analyse de corrélation entre ces amplitudes et certains paramètres morphologiques des sujets a permis de mettre en évidence un lien entre l'amplitude maximale d'ouverture de la mandibule, la taille de celle-ci et le sexe du sujet. Une quantification des vitesses d'exécution des différents mouvements a révélé que ces vitesses étaient dépendantes du sujet et non pas du mouvement réalisé. Nous avons ensuite visualisé les trajectoires des points condyliens dans différents plans anatomiques pour les différents mouvements étudiés. Nous avons pu voir que, pour tous les mouvements, le trajet du condyle est limité par la fosse temporale. Cette étude nous a également permis de montrer que l'allure générale des trajectoires des sujets asymptomatiques suit une tendance globale, en accord avec les observations fournies par la littérature. Néanmoins, il est

également ressorti de cette analyse qu'il existe une grande variabilité inter-individus et qu'il n'existe pas de tracé universel pour ces déplacements condyliens. En effet certains de nos sujets asymptomatiques présentent des caractéristiques différentes des descriptions anatomiques classiques, sans pour autant présenter de signes quelconques de dysfonctions. Nous avons alors pu voir les limites des études de trajectoires effectuées sur un point unique de l'articulation. C'est pourquoi nous nous sommes tournés vers l'étude cinématique de la mandibule dans sa globalité, en quantifiant ses mobilités pour les différents mouvements étudiés. Il a ainsi été montré que les mouvements élémentaires d'ouverture-fermeture, de latéralité et de propulsion s'effectuent par une combinaison de translations et de rotations. L'ouverture et la propulsion présentent les mêmes mobilités prédominantes, contrairement aux mouvements latéraux pour lesquels toutes les mobilités s'activent avec des amplitudes comparables. Par ailleurs, nous n'avons pas obtenu de différences significatives, sur les valeurs maximales des mobilités, lors des comparaisons hommes-femmes, droitiers-gauchers ou selon la classe d'occlusion. Il peut cependant exister des tendances différentes (non significatives) sur la réalisation du mouvement. Ces résultats devront être validés avec des groupes plus importants, notamment pour l'étude des classes d'occlusion et de la main dominante.

La base de données, présentée dans ce chapitre, est, à notre connaissance, la seule base de données visualisant le comportement des six mobilités mandibulaires pour l'ensemble des mouvements élémentaires : ouverture, propulsion, latéralité gauche et droite.

Composée de 29 sujets asymptomatiques, elle permet de positionner la référence de l'étude des mouvements de la mandibule, et sert de base à la comparaison avec des sujets à dysfonctions.

CHAPITRE 5 :
Etude des sujets présentant des dysfonctions mineures

L'ensemble des volontaires participant à l'étude ont suivi le protocole présenté dans le chapitre 3. Cependant certains de ces sujets ont montré des caractéristiques de dysfonctions, qui ont été repérées par le score calculé à l'issu du questionnaire. Ces dysfonctions sont appelées dysfonctions mineures car elles n'entravent pas le quotidien des sujets. En effet, les sujets de notre étude sont venus participer aux mesures en estimant ne présenter aucun signe pouvant entrainer une remise en question de leur caractère asymptomatique. C'est uniquement par le questionnaire et le score que ces sujets ont été discriminés. Ce sont ces sujets présentant des dysfonctions mineures qui seront étudiés dans ce chapitre.

Dans un premier temps, nous allons effectuer une description de ces sujets et de leurs dysfonctionnements. Nous pourrons alors, dans un deuxième temps, analyser les caractéristiques cinématiques de ces sujets en les comparant aux sujets asymptomatiques. Le but de cette dernière partie est de comprendre les particularités cinématiques, si elles existent, de ces dysfonctions mineures afin, idéalement, d'apprendre à les diagnostiquer de manière systématique.

1. Les sujets atteints de dysfonctions mineures

A partir du questionnaire, présenté dans le chapitre 3, 15 sujets se sont démarqués par leurs scores élevés (≥ 20points). Nous donnons les détails de leurs caractéristiques dans le tableau ci-dessous.

Tableau 15 : Caractéristiques des sujets à dysfonctions (G=gauche, D=droite)

Sujets	*Sexe*	*Age (ans)*	*Taille (cm)*	*Masse (kg)*	*Occlusion*	*Main dominante*	*Dysfonctions*	*Score*
DI	*H*	*27*	*172*	*65*	*1*	*D*	*Traumatisme ATM G*	52
DII	*F*	*25*	*168*	*62*	*1*	*D*	*Bruxisme*	*51*
DIII	*H*	*27*	*178*	*82*	*1*	*D*	*Douleurs musculaires à G*	*20*
DIV	*H*	*64*	*192*	*92*	*3*	*D*	*Acouphènes*	*20*
DV	*H*	*27*	*168*	*78*	*1*	*D*	*Acouphènes*	*22*
DVI	*F*	*43*	*165*	*63*	*1*	*D*	*Bruits articulaires à G*	*30*
DVII	*F*	*34*	*163*	*63*	*1*	*G*	*Bruits articulaires à G + Douleurs articulaires*	*61*
DVIII	*H*	*39*	*178*	*84*	*2*	*D*	*Bruits articulaires à G*	*31*
DIX	*H*	*50*	*182*	*100*	*1*	*D*	*Bruits articulaires à G*	*31*
DX	*F*	*34*	*170*	*53*	*1*	*G*	*Bruits articulaires à G*	*30*
DXI	*F*	*36*	*173*	*65*	*3*	*G*	*Bruits articulaires à D*	*30*
DXII	*F*	*36*	*173*	*79*	*1*	*D*	*Bruits articulaires à G*	*31*
DXIII	*H*	*53*	*176*	*77*	*1*	*D*	*Bruits articulaires à D*	*30*
DXIV	*H*	*23*	*175*	*67*	*1*	*D*	*Bruits articulaires à D*	*34*
DXV	*F*	*44*	*155*	*51*	*1*	*G*	*Bruits articulaires à D*	*30*

Nous pouvons séparer ces sujets en deux catégories. Dans un premier temps, nous observerons les caractéristiques cinématiques des cinq premiers sujets individuellement. Puis nous étudierons les 10 sujets avec des bruits articulaires comme un seul groupe. Ce groupe est donc composé de : 4 hommes de 23 à 53 ans (moyenne 41.2ans) et 6 femmes de 34 à 44 ans (moyenne 37.8ans).

Néanmoins, l'étude des corrélations morphologiques s'effectue sur les 15 sujets à dysfonctions, par l'intermédiaire du coefficient de corrélation de Spearman (n=15, α=0.05) (Tableau 16).

Tableau 16 : Etude de corrélation de Spearman entre les grandeurs morphologiques ; Résultats du paramètre p. NS= non significatif

Corrélation de Spearman	*Age*	*Taille*	*Masse*	*Volume mandibule*
Taille	NS			
Masse	NS	0.0001		
Volume mandibule	NS	0.001	0.001	
Genre	NS	0.008	0.003	0.0002

Les mêmes corrélations que pour les sujets asymptomatiques sont trouvées entre les paramètres morphologiques. Il n'existe pas de lien entre l'âge et les différents paramètres mais la taille, la masse, le genre, et le volume mandibulaire sont corrélés entre eux.

De plus nous vérifions que ce groupe avec dysfonctions est identique au groupe asymptomatique du point de vue morphologique par un test de comparaison des moyennes (test de Wilcoxon). Nous obtenons des résultats ne permettant pas de rejeter l'hypothèse de différences nulles pour l'ensemble de ces paramètres morphologiques entre ces sujets à dysfonctions et les sujets asymptomatiques. Ceci nous permet donc de pouvoir comparer cinématiquement ces deux groupes en s'affranchissant de l'aspect anthropométrie et morphologie.

2. Etude cinématique des cinq premiers sujets à dysfonctions

Dans un premier temps nous quantifions sur la Figure 72, les amplitudes maximales de mouvements pour ces différents sujets et nous les comparons aux valeurs caractéristiques (moyenne±1 écart-type) du groupe de référence. Pour rappel, la MMO représente la capacité de mouvement d'ouverture, MMP de propulsion, MMLr latéral à droite et MML à gauche.

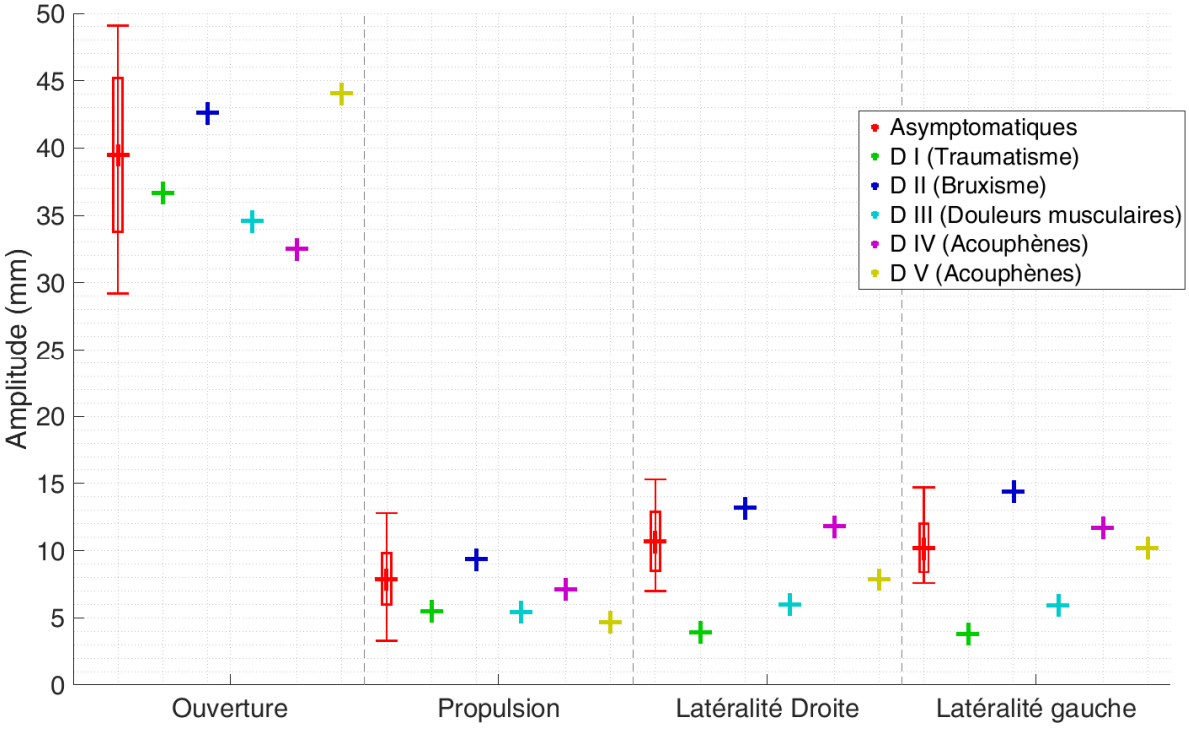


Figure 72 : Amplitudes maximales de mouvement : déplacement maximal du point IP. Valeurs moyenne ±1 écart-type et valeurs extrêmes en rouge pour le groupe de référence, et valeurs de chacun des 5 sujets à dysfonctions

Nous pouvons remarquer que le sujet DI avec traumatisme présente des valeurs d'amplitudes latérales (3.9mm à droite et 3.8mm à gauche) inférieures aux valeurs asymptomatiques de la

moyenne - 1 écart-type, respectivement 8.5mm et 8.4mm, et en propulsion avec une valeur de 5.5mm contre une limite basse asymptomatique de 6mm. Il en est de même pour le sujet DIII, avec des valeurs de 6.0mm à droite, 5.9mm à gauche et 5.4mm en propulsion.

A l'inverse, le sujet DII avec bruxisme montre des valeurs importantes pour les amplitudes maximales en latéralité droite (13.2mm) et gauche (14.4mm).

Pour les deux sujets avec acouphènes (DIV et DV), les résultats sont plus mitigés. Certaines amplitudes sont réduites (MMO pour le sujet DIV avec une valeur de 32.5mm, et pour le sujet DV avec une valeur de 4.7mm en MMP et de 7.9mm en MMLr), alors que pour certains mouvements, les résultats se trouvent dans les valeurs hautes (moyenne + 1 écart-type) du groupe asymptomatique. C'est notamment le cas pour les latéralités pour le sujet DIV (11.8mm à droite et 11.7mm à gauche) et en ouverture pour le sujet DV (44.1mm).

Etudions à présent les vitesses de réalisation des différents mouvements (Figure 73).

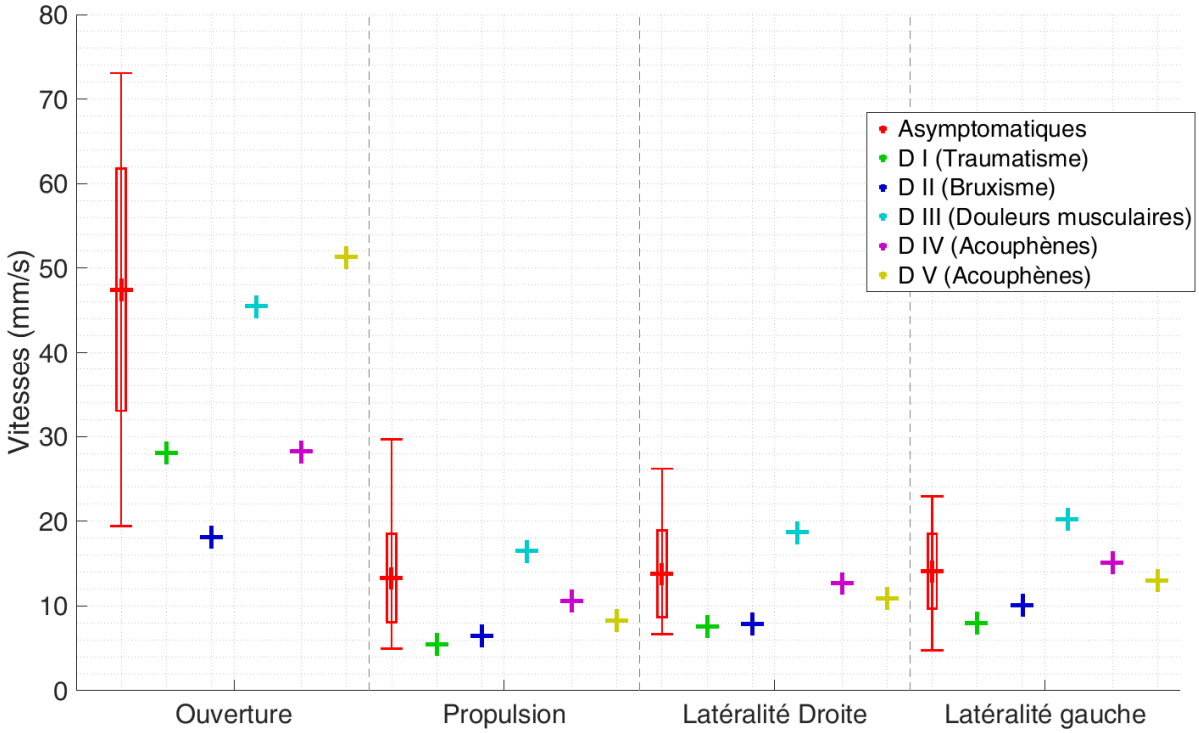


Figure 73 : Vitesses de réalisation des mouvements pour chaque groupe : vitesse du point IP (valeurs moyenne ±1 écart-type et valeurs extrêmes)

Nous pouvons remarquer que le sujet DI présente des vitesses réduites pour l'ensemble des mouvements (28.1mm.s^{-1} en ouverture, 5.5mm.s^{-1} en propulsion, 7.6mm.s^{-1} en latéralité droite et 8.0mm.s^{-1} en latéralité gauche contre des valeurs moyennes asymptomatiques respectivement de 47.4±14.4mm.s^{-1}, 13.3±5.2mm.s^{-1}, 13.8±5.1mm.s^{-1} et 14.1±4.4mm.s^{-1}).

Le sujet DII effectue également les déplacements du point IP moins rapidement que le groupe asymptomatique en ouverture (18.1mm.s^{-1}) mais également en propulsion (6.5mm.s^{-1}) et pour le mouvement latéral à droite (7.9mm.s^{-1}). Pour le mouvement vers la gauche, sa vitesse de 10.1mm.s^{-1} est dans la partie basse des valeurs de référence.
Le sujet avec douleurs musculaires (DIII) effectue les mouvements latéraux plus rapidement (18,7mm.s^{-1} à droite et 20.2mm.s^{-1} à gauche).
Le sujet DIV montre une vitesse réduite uniquement en ouverture (28.3mm.s^{-1}).
Enfin le sujet DV effectue l'ensemble de ses mouvements à des vitesses correspondant aux valeurs moyennes asymptomatiques.

Nous pouvons donc voir que ces sujets à dysfonctions mineures peuvent présenter des vitesses réduites (DI et DII) ou rapides (DIII). Les sujets avec acouphènes montrent encore une fois des résultats moins marqués qui varient en fonction du mouvement étudié.

Il devient donc intéressant d'observer plus en détails le comportement plus global de la mandibule au cours de ces différents mouvements afin de voir si des différences existent entre ces sujets à dysfonctions mineures et le groupe asymptomatique. Observons donc à présent le comportement de ces cinq sujets sur les mobilités mandibulaires. Le mouvement d'ouverture est présenté sur la Figure 74, le mouvement de propulsion sur la Figure 75 et enfin les mouvements latéraux à droite et à gauche respectivement sur les Figure 76 et Figure 77.

Pour effectuer cette exploitation, l'étude sera toujours présentée par une comparaison des courbes de chaque sujet à dysfonction avec les corridors (moyenne à ±1 ou ±2 écart-types) du groupe de référence asymptomatique. De plus, nous simplifierons souvent, comme dans le chapitre 4, la dénomination des mobilités par leur abréviation : la translation postéro-antérieure (Tr P-A), la translation inféro-supérieure (Tr I-S), translation gauche-droite (Tr G-D), l'inclinaison, la rotation axiale (Raxiale) et la rotation intercondylienne (R IC).

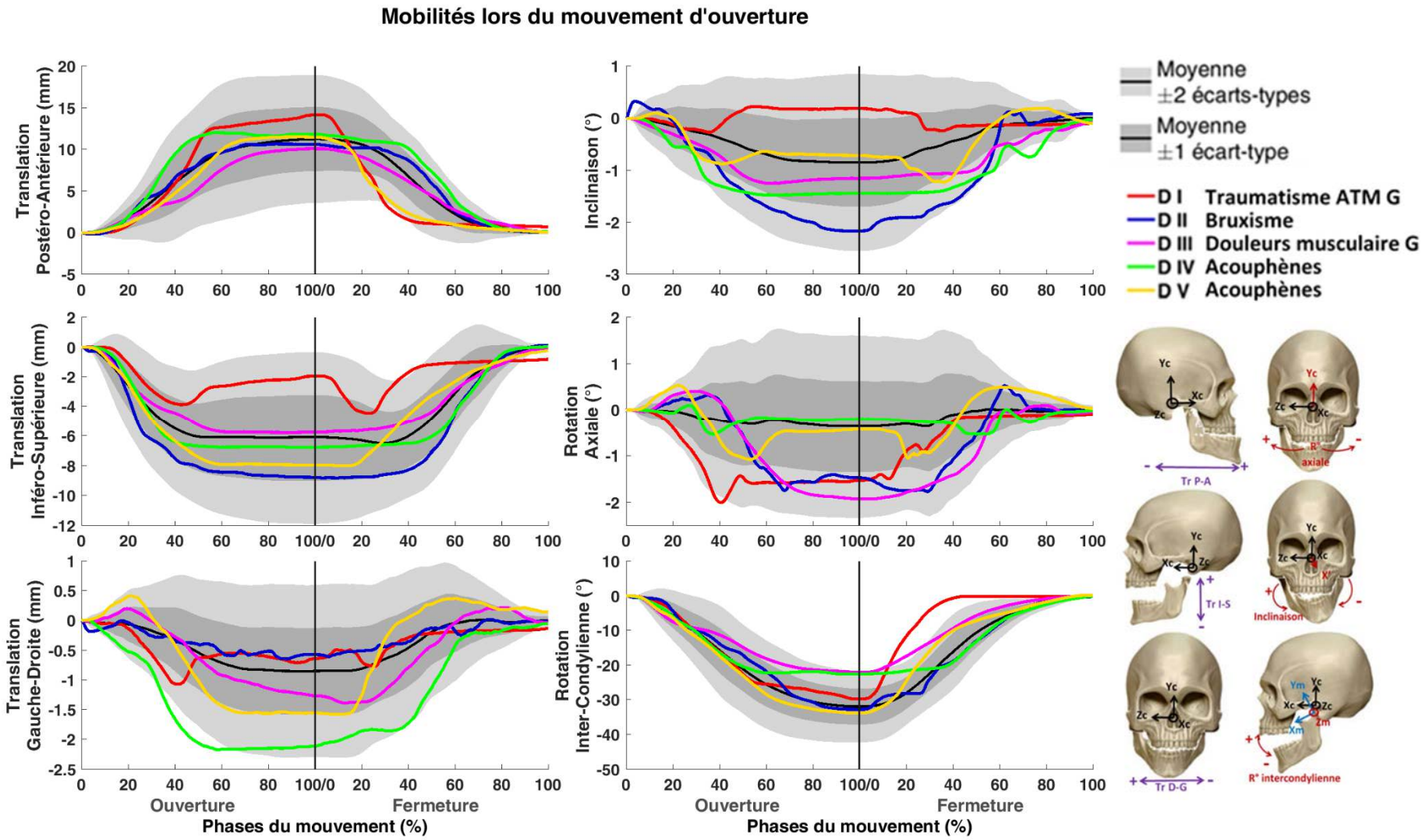


Figure 74 : Comparaison des 6 mobilités pendant le mouvement d'ouverture des cinq premiers sujets avec dysfonctions mineures (courbes colorées) par rapport aux corridors issus de l'étude du groupe de référence (courbe moyenne en noir et corridors gris foncé pour 1écart-type et gris clair pour 2écart-types)

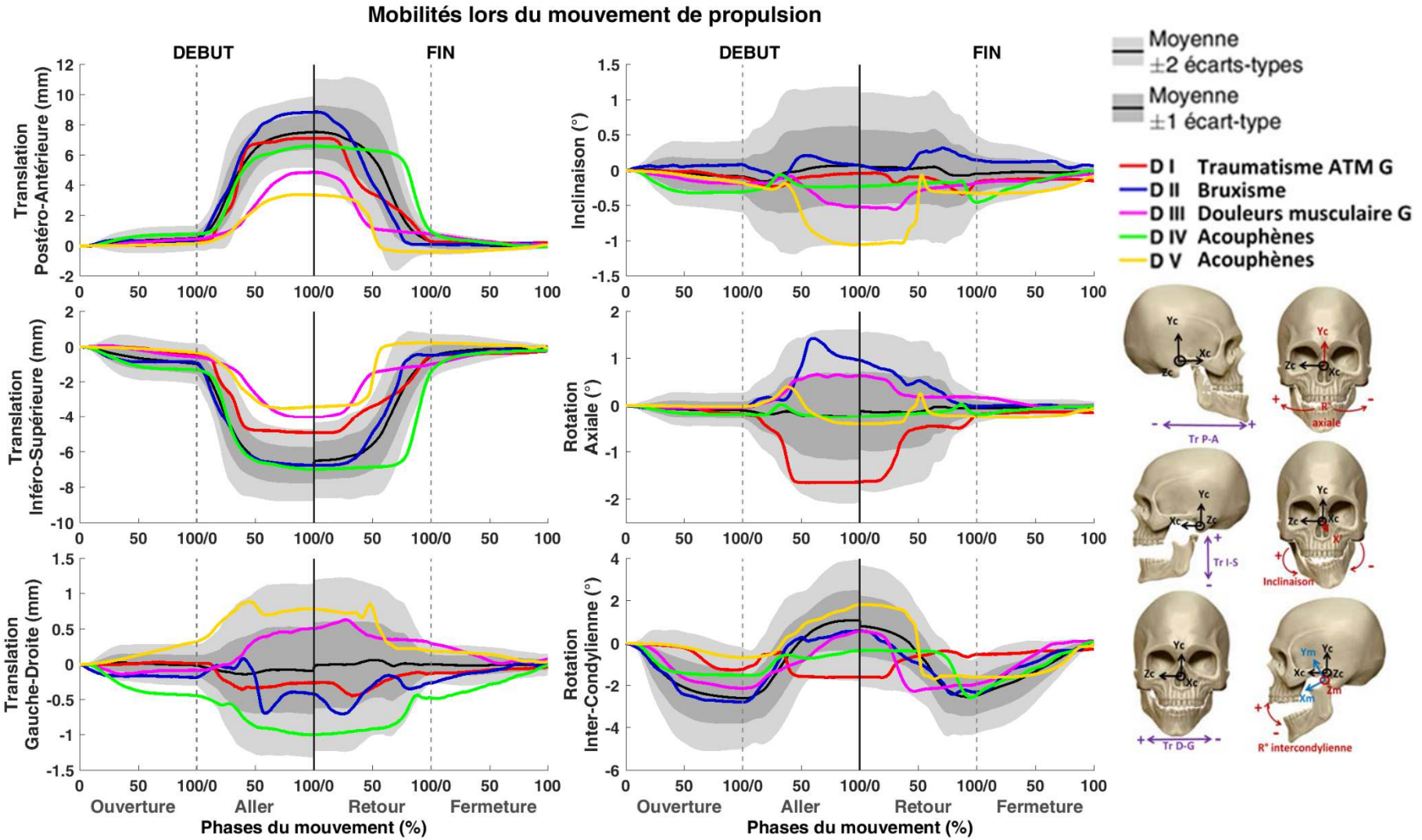


Figure 75 : Comparaison des 6 mobilités pendant le mouvement de propulsion des cinq premiers sujets avec dysfonctions mineures (courbes colorées) par rapport aux corridors issus de l'étude du groupe de référence (courbe moyenne en noir et corridors gris foncé pour 1écart-type et gris clair pour 2écart-types)

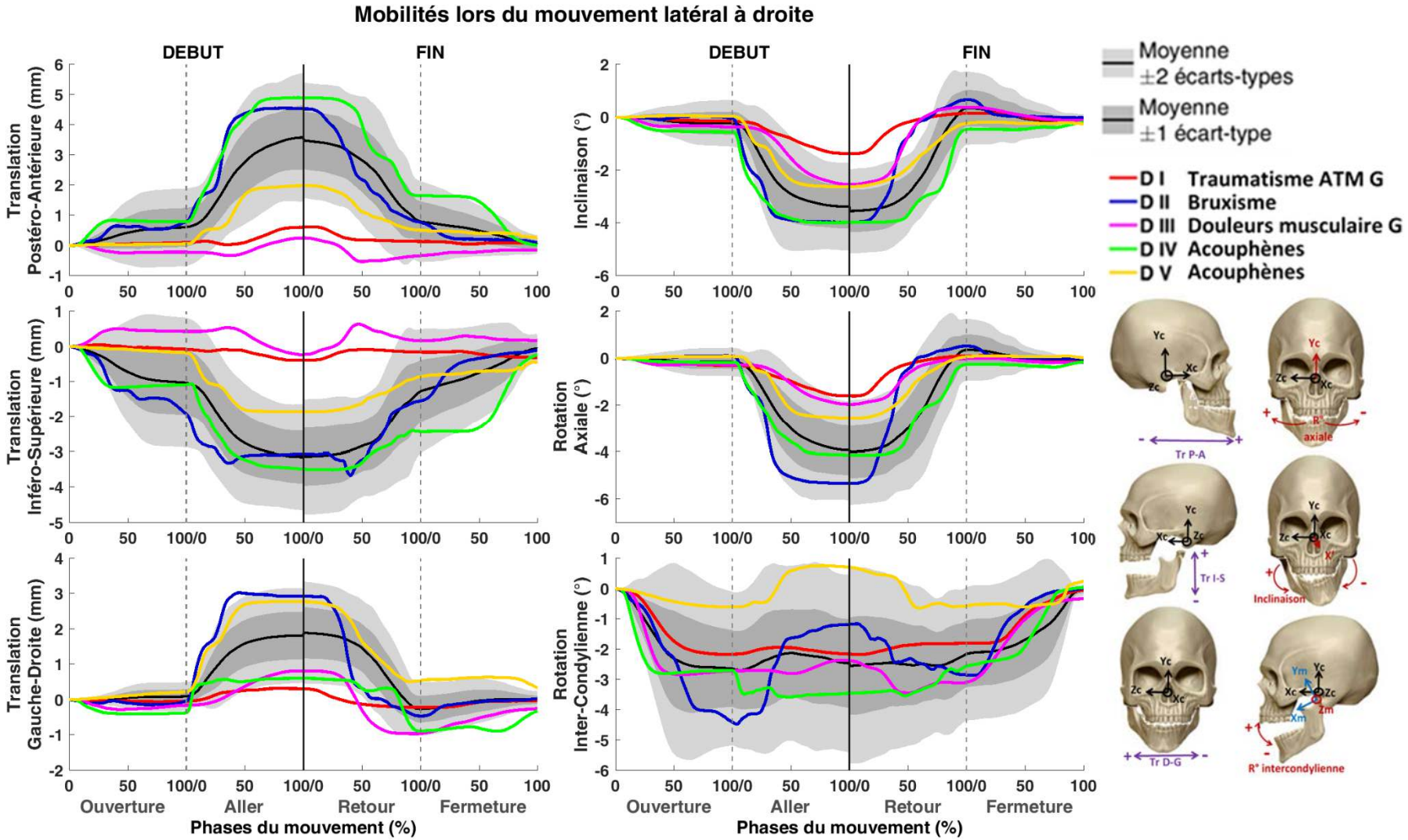


Figure 76 : Comparaison des 6 mobilités pendant le mouvement latéral vers la droite des cinq premiers sujets avec dysfonctions mineures (courbes colorées) par rapport aux corridors issus de l'étude du groupe de référence (courbe moyenne en noir et corridors gris foncé pour 1écart-type et gris clair pour 2écart-types)

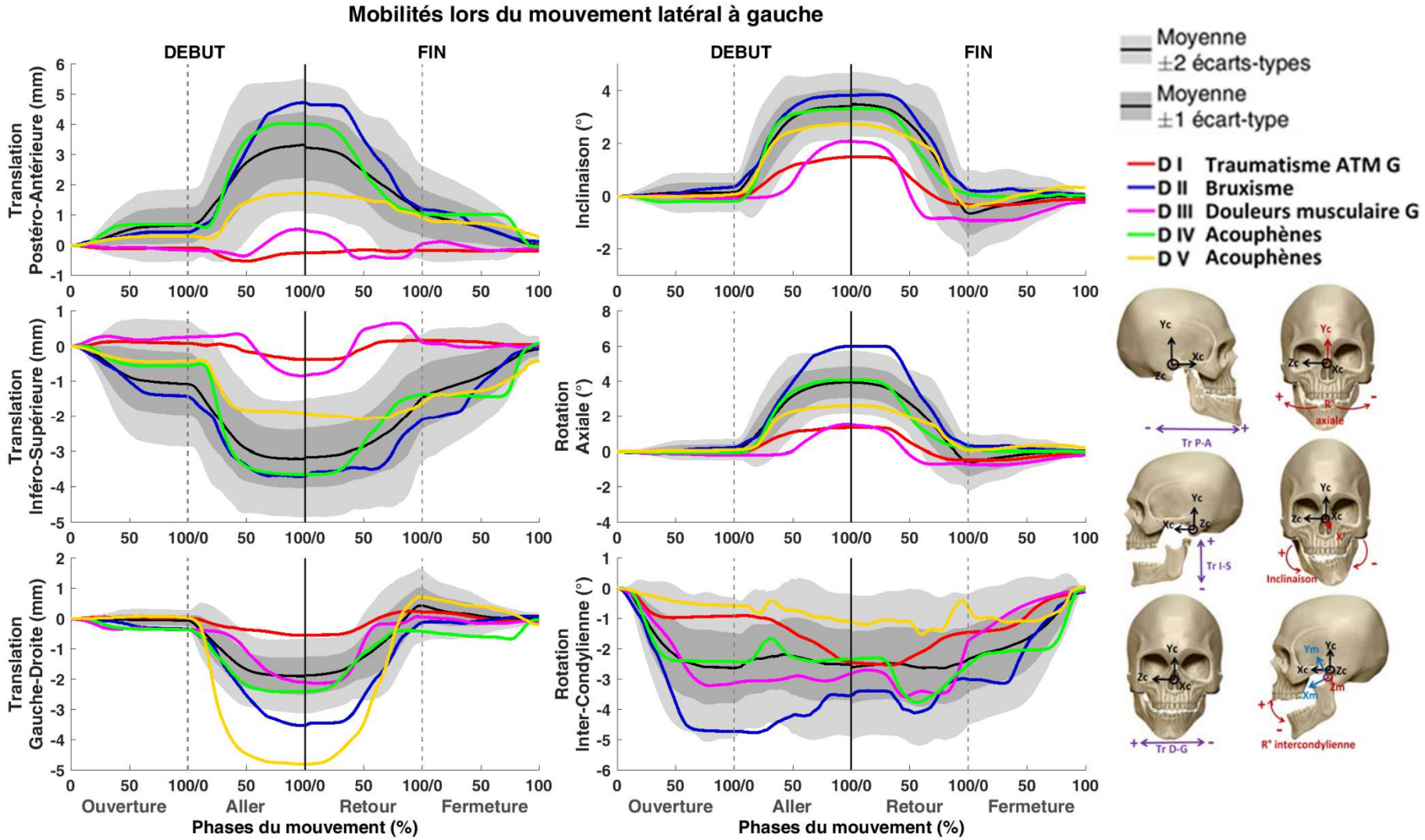


Figure 77 : Comparaison des 6 mobilités pendant le mouvement latéral vers la gauche des cinq premiers sujets avec dysfonctions mineures (courbes colorées) par rapport aux corridors issus de l'étude du groupe de référence (courbe moyenne en noir et corridors gris foncé pour 1écart-type et gris clair pour 2écart-types)

Le sujet DI, avec traumatisme sur l'articulation gauche présente, lors du mouvement d'ouverture, une activation précoce des mobilités principales (R IC, Tr P-A et Tr I-S) lors de la fermeture (à environ 20% de cette phase). Néanmoins cette information est à prendre avec précaution car pour ce sujet, un seul cycle était exploitable, nous n'avons donc pas de moyen de vérifier cette caractéristique. Lors du mouvement de propulsion nous pouvons voir que la totalité des mobilités se trouve dans les corridors asymptomatiques pour ce sujet, en dehors de R IC plutôt limitée. Lors des deux mouvements latéraux, il existe une limitation de 5 mobilités sur 6 aussi bien à gauche qu'à droite : la translation postéro-antérieure, la translation inféro-supérieure, la translation latérale, l'inclinaison et la rotation axiale.

Le sujet DII, avec bruxisme traité par gouttière occlusale, montre des mobilités dans le corridor asymptomatique en ouverture, en propulsion. Pour les mouvements latéraux, nous pouvons voir des valeurs de translation latérale et de rotation axiale assez élevées (soit en dehors, soit dans les extrémités des corridors asymptomatiques), avec des valeurs plus importantes pour le mouvement vers la gauche.

Le sujet DIII, souffrant de douleurs musculaires du côté gauche de la face, ne montre pas de particularité sur les mobilités en ouverture. En propulsion, nous pouvons voir une limitation des translations postéro-antérieure et inféro-supérieure. Pour le mouvement vers la droite, Tr P-A et Tr I-S sont clairement limitées et nous pouvons également voir que Tr G-D et Raxiale montrent des valeurs situées dans le bas du corridor asymptomatique. Pour le mouvement vers la gauche, Tr P-A, Tr I-S, Inclinaison et Raxiale sont limitées.

Concernant les deux sujets avec acouphènes, nous ne pouvons pas dire que le sujet DIV bouge sa mandibule de façon particulière. En effet, les faibles différences pouvant être observées avec le groupe asymptomatique se situent dans les extrémités du corridor. Pour le sujet DV, nous ne remarquons pas de réalisation particulière en ouverture et en latéralité droite. Cependant, lors du mouvement de propulsion, ce sujet présente une limitation des translations postéro-antérieure et inféro-supérieure et lors du mouvement vers la gauche, sa translation latérale est nettement supérieure aux valeurs moyennes de référence (avec des valeurs proches de 5mm contre environ 2mm en moyenne asymptomatique).

Nous pouvons récapituler toutes les informations cinématiques dans le tableau suivant :

Tableau 17 : Récapitulatif de l'étude cinématique des cinq premiers sujets à dysfonctions. En rouge : valeurs inférieures aux résultats asymptomatiques et en bleu valeurs supérieures aux résultats asymptomatiques. Pour le groupe asymptomatique : rappel des valeurs moyennes±1 écart-type

Sujets	*Mouvement*	*Amplitude (mm)*	*Vitesse (mm/s)*	*Mobilités*
DI Traumatisme ATM gauche	Ouverture	36,7	28,1	Activation précoce des mobilités principales à 20% de la fermeture, mais valeurs dans tendances asymptomatiques
	Propulsion	5,5	5,5	R IC limitée
	Lat à droite	3,9	7,6	Limitation toutes mobilités sauf R IC
	Lat à gauche	3,8	8,0	Limitation toutes mobilités sauf R IC
DII Bruxisme	Ouverture	42,6	18,1	Dans le corridor asymptomatique
	Propulsion	9,4	6,5	Dans le corridor asymptomatique
	Lat à droite	13,2	7,9	Tr G-D et Raxiale limite haute
	Lat à gauche	14,4	10,1	Tr G-D et Raxiale exagérées
DIII Douleurs muscles à gauche	Ouverture	34,6	45,5	Dans le corridor asymptomatique
	Propulsion	5,4	16,5	Tr P-A et Tr I-S limitées
	Lat à droite	6,0	18,7	Tr P-A et Tr I-S limitées & Tr G-D et Raxiale limite basse
	Lat à gauche	5,9	20,2	Tr P-A, Tr I-S, Inclinaison, Raxiale limitées
DIV Acouphènes	Ouverture	32,5	28,3	Dans le corridor asymptomatique
	Propulsion	7,1	10,6	Dans le corridor asymptomatique
	Lat à droite	11,8	12,7	Dans le corridor asymptomatique
	Lat à gauche	11,7	15,1	Dans le corridor asymptomatique
DV Acouphènes	Ouverture	44,1	51,3	Dans le corridor asymptomatique
	Propulsion	4,7	8,3	Tr P-A et Tr I-S limitées
	Lat à droite	7,9	10,9	Dans le corridor asymptomatique
	Lat à gauche	10,2	13,0	Tr G-D exagérée
Asymptomatiques	Ouverture	39,5±5,7	47,4±14,4	
	Propulsion	7,9±1,9	13,3±5,2	
	Lat à droite	10,7±2,2	13,8±5,1	
	Lat à gauche	10,2±1,8	14,1±4,4	

Concernant les mobilités, nous voyons donc qu'un seul sujet montre des particularités en ouverture, qui restent cependant dans les valeurs asymptomatiques. A l'inverse les mouvements latéraux et de propulsion montrent dans de nombreux cas des différences avec le groupe asymptomatique.

Le sujet avec traumatisme (DI) présente des limitations de cinq mobilités pour les mouvements latéraux et de la rotation intercondylienne en propulsion. Ces limitations se reflètent également par des amplitudes de mouvement limitées (MMP et MML). A l'instar du sujet avec douleurs (DIII) qui présente des limitations pour quatre mobilités lors des mouvements latéraux et deux mobilités en propulsion, qui se reflètent sur les amplitudes réduites en MMLr, MMLl et MMP. Cependant, pour ces deux sujets, le côté du traumatisme ou de la douleur ne semble pas

influencer la latéralité. La discussion des résultats pour ces deux sujets est limitée par le manque d'informations notamment sur les muscles touchés et sur le degré d'atteinte.

Le sujet avec bruxisme présente également des mobilités particulières, importantes cette fois, lors des mouvements latéraux. Les deux mêmes mobilités se retrouvent impactées : la translation gauche-droite et la rotation axiale. Le bruxisme est une dysfonction musculaire qui apparait lors de contraction involontaire des muscles masticateurs. Or, des activités musculaires plus importantes peuvent entrainer des amplitudes plus grandes selon le muscle impliqué dans le mouvement et sa ligne d'action.

Les deux sujets avec acouphènes ne présentent pas de particularités communes.

Le sujet DI montre des mobilités perturbées ainsi que des vitesses et des amplitudes limitées pour l'ensemble des mouvements. En dehors de ce sujet, nous pouvons voir que des particularités sur les paramètres du point IP (amplitude ou vitesse, limitée ou exagérée) n'entrainent pas nécessairement de caractéristiques particulières sur les mobilités et inversement.

Bien qu'uniquement le mouvement d'ouverture soit étudié dans la littérature en termes de mobilités mandibulaires, nous avons pu montrer que la visualisation du mouvement d'ouverture ne permet pas de dégager des informations sur les dysfonctionnements.
Même si l'analyse des mobilités en latéralité et propulsion n'a pas révélé d'éléments spécifiques pour un sujet sur les cinq étudiés (le sujet avec acouphènes DIV), nous voyons néanmoins bien l'intérêt d'une étude poussée de ces mouvements pour l'éventuelle détection de dysfonctions.
Notre étude, basée sur 5 sujets, doit donc être renforcée.

Etudions donc à présent la deuxième partie des sujets à dysfonctions : les 10 sujets avec bruits articulaires (claquement, craquement).

3. Sujets avec bruits articulaires

Etudions dans un premier temps les amplitudes maximales et les vitesses de mouvements.

Tableau 18 : Amplitudes de mouvements (mm) et vitesse de mouvement (mm.s^{-1}) : sujets à dysfonctions avec bruits articulaires et comparaison au groupe asymptomatique (Asympt). Valeur en rouge : limitation, valeur en bleu : exagération en comparaison des valeurs asymptomatiques. MMO=amplitude maximale lors de l'ouverture selon la direction inféro-supérieure ; MMP= amplitude maximale lors de la propulsion selon la direction postéro-antérieure ; MML= amplitude maximale lors des mouvements de latéralité à droite (MMLr) et à gauche (MMLl) selon la direction transversale

		Amplitudes (mm)				*Vitesses (mm.s^{-1})*			
	SUJETS	MMO	MMLr	MMLl	MMP	OUV	LAT R	LAT L	PROP
Bruits	DVI	39.2	10.7	12.3	7.5	50,1	13,9	19,2	14,4
	DVII	45.8	11.5	14.0	8.6	71,0	17,2	14,1	17,3
	DVIII	43.1	14.1	6.1	9.4	74,9	23,3	11,1	12,1
	DIX	41.2	10.8	12.6	5.2	40,2	18,6	16,8	18,6
	DX	40.0	12.3	10.1	6.7	25,3	9,5	16,8	9,8
	DXI	30.7	11.6	10.9	8.1	47,2	21,7	25,3	25,1
	DXII	35.5	9.6	9.0	7.3	53,7	11,7	12,1	9,0
	DXIII	35.6	14.5	12.7	10.1	46,3	19,5	20,1	21,5
	DXIV	43.1	10.1	11.9	9.0	45,3	18,2	23,5	14,0
	DXV	32.1	14.6	12.1	7.6	46,8	21,1	21,9	22,2
	Moyenne	**38.6**	**12.0**	**11.2**	**7.9**	**50,1**	**17,5**	**18,1**	**16,4**
	Ecart-type	**5.0**	**1.8**	**2.3**	**1.4**	**14,3**	**4,5**	**4,8**	**5,5**
Asympt	**Moyenne**	**39.5**	**10.7**	**10.2**	**7.9**	**47,4**	**13,8**	**14,1**	**13,3**
	Ecart-type	**5.7**	**2.2**	**1.8**	**1.9**	**14,4**	**5,1**	**4,4**	**5,2**

Nous pouvons voir que de nombreux sujets sortent des valeurs moyennes (±1 écart-type) asymptomatiques pour les amplitudes de mouvement et les vitesses. Pour la majorité, ces résultats sont supérieurs aux valeurs asymptomatiques. Néanmoins nous ne voyons pas de tendance générale de surestimation ou de sous-estimation pour un sujet donné ou un mouvement donné. En utilisant un test de Mann-Whitney pour comparer ces sujets avec bruits articulaires avec les sujets asymptomatiques, il ressort qu'il n'existe pas de différences significatives entre ces deux groupes pour les amplitudes maximales. Cependant ces sujets avec bruits articulaires présentent des vitesses de réalisation statistiquement différentes du groupe asymptomatique pour les mouvements latéraux ($p=0.035<0.05$) à droite et ($p=0.038<0.05$) à gauche, avec des vitesses plus importantes pour les sujets présentant cette dysfonction.

Concernant les études de mobilités, comme précédemment, nous visualisons, pour les différents mouvements, les courbes des sujets avec bruits articulaires par rapport aux corridors issus de l'étude des sujets asymptomatiques. La Figure 78 présente le mouvement d'ouverture, la Figure 79 le mouvement de propulsion et les Figure 80 et Figure 81 respectivement la latéralité droite et la latéralité gauche.

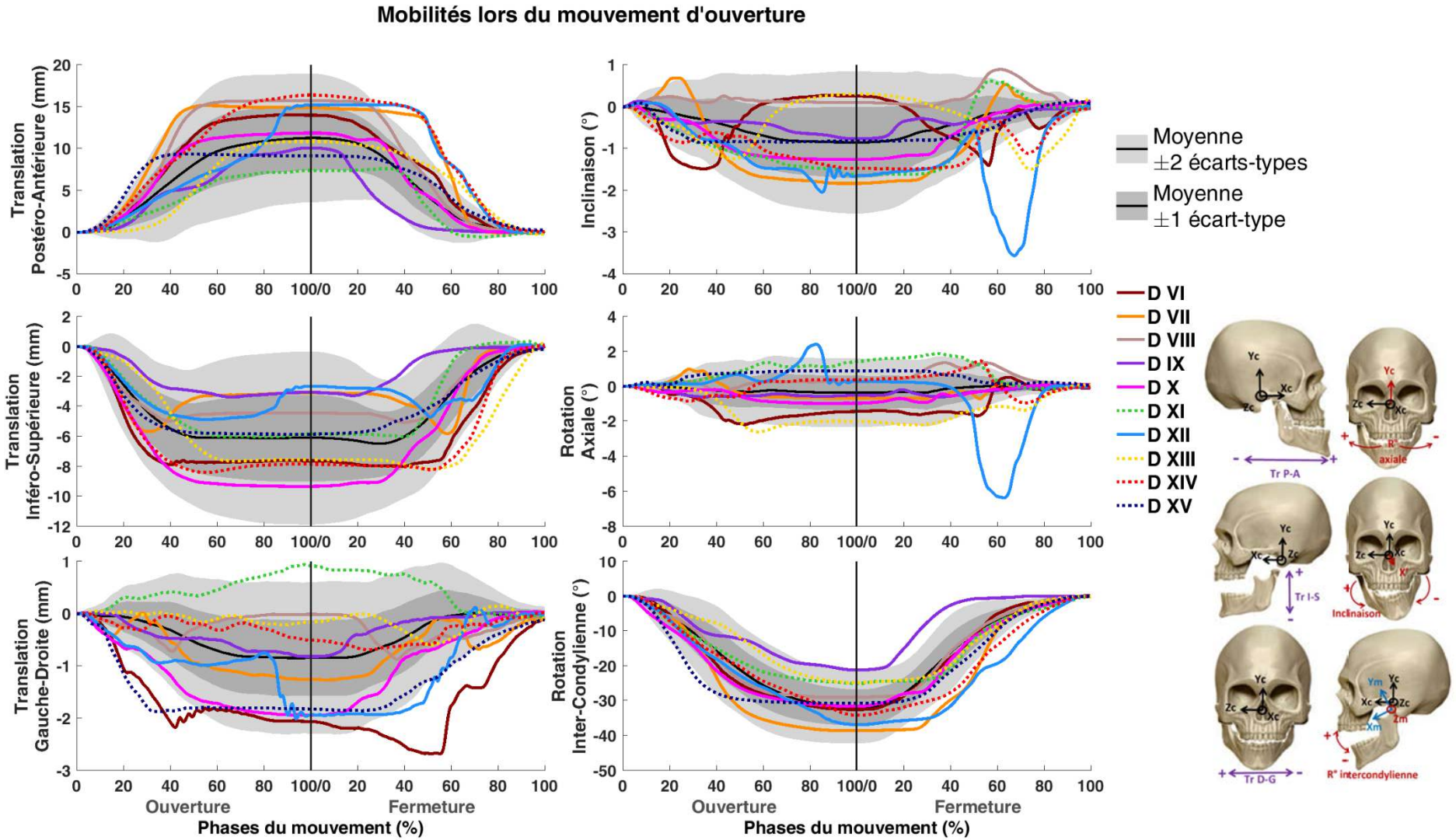


Figure 78 : Comparaison des 6 mobilités pendant le mouvement d'ouverture des sujets avec bruits articulaires (courbes colorées) à gauche (en trait plein) et à droite (en pointillés) par rapport aux corridors issus de l'étude du groupe de référence (courbe moyenne en noir et corridors gris foncé pour 1écart-type et gris clair pour 2écart-types)

Pour le mouvement d'ouverture (Figure 78), il existe peu de différences entre ces sujets et le groupe de référence.
La plus flagrante est observable pour le sujet DXII présentant des variations brusques des mobilités, avec l'apparition d'un premier pic à environ 80% de la phase d'ouverture et un autre à environ 50% de la phase de fermeture, c'est-à-dire pour une rotation intercondylienne d'environ 30°. Les pics se retrouvent sur toutes les mobilités avec une visibilité plus forte sur les mobilités secondaires (Inclinaison et Raxiale puis Tr G-D), seule la rotation intercondylienne ne parait que peu impactée. Ce sujet est le sujet pour lequel les claquements ont été les plus bruyants, mais surtout le seul sujet pour lequel la déviation mandibulaire a été visible lors de nos mesures. C'est cette déviation brutale que nous voyons sur ces mobilités secondaires.

Nous remarquons également que, pour le sujet DVI, l'inclinaison mandibulaire montre un comportement particulier avec une première inclinaison vers la gauche dans les 30 premiers pourcents de la phase d'ouverture, puis vers la droite pour arriver à l'ouverture maximale, et enfin à nouveau vers la gauche, alors que la tendance asymptomatique montre une inclinaison sans brusque changement de sens au cours du mouvement. Cette inclinaison particulière est accompagnée d'une translation vers la gauche pendant tout le mouvement, avec des valeurs supérieures au corridor asymptomatique. Il y a donc une déviation de la mandibule lors du mouvement d'ouverture pour ce sujet.

Si nous observons à présent le groupe dans son ensemble, nous ne pouvons pas noter de caractéristique particulière globale de la dysfonction pour ces 10 sujets avec bruits articulaires lors du mouvement d'ouverture.

Observons à présent le mouvement de propulsion (Figure 79).

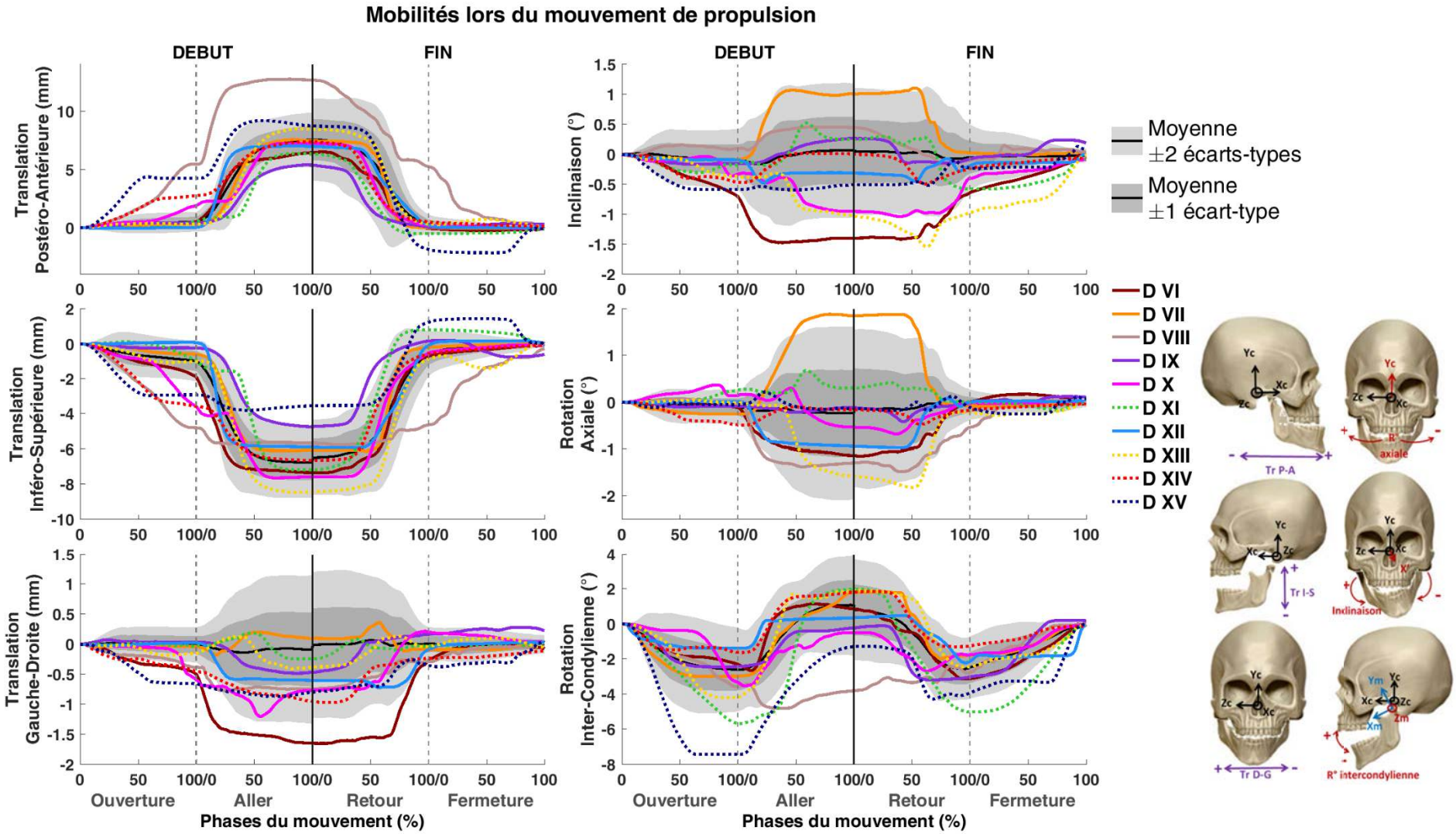


Figure 79 : Comparaison des 6 mobilités pendant le mouvement de propulsion des sujets avec bruits articulaires (courbes colorées) à gauche (en trait plein) et à droite (en pointillés) par rapport aux corridors issus de l'étude du groupe de référence (courbe moyenne en noir et corridors gris foncé pour 1écart-type et gris clair pour 2écart-types)

Nous pouvons observer des particularités pour les sujets avec bruits articulaires sur ce mouvement de propulsion.
Nous pouvons notamment repérer certains sujets qui ne respectent pas correctement les consignes de distinction des différentes phases de mouvement. L'ouverture est alors réalisée en parallèle de l'avancée mandibulaire et la fermeture en parallèle du recul mandibulaire. Nous visualisons cette caractéristique sur les Tr P-A et Tr I-S qui sont activées fortement lors ces phases d'ouverture et de fermeture, alors qu'elles ne devraient s'activer qu'avec les phases aller et retour si l'on suit la tendance du corridor asymptomatique.
Les sujets concernés par ce non-respect des consignes sont les sujets DX et DXIV (pour le début du mouvement uniquement). Nous pouvons également mettre dans cette catégorie le sujet DXV dont les phases sont peu dissociées mais qui présente en plus une R IC importante en début de mouvement. Par ailleurs, le sujet DVIII présente également ce non-respect des consignes lors des phases d'ouverture et de fermeture, mais montre d'autres particularités lors des phases aller et retour, avec une translation postéro-antérieure très marquée et une R IC activée tout au long du mouvement à une valeur d'environ -4° alors que la tendance asymptomatique montre une rotation dans le sens inverse (2°) lors de ces phases, ce qui reflète la nécessité d'une ouverture mandibulaire pour permettre le mouvement aller-retour.

Par ailleurs nous remarquons que, comme pour le mouvement d'ouverture, le sujet DVI présente les deux mêmes mobilités particulières avec une translation vers la gauche importante et une inclinaison, qui cette fois se fait uniquement vers la gauche mais avec des valeurs plus grandes que le groupe de référence.

D'autres sujets présentent des particularités pour une seule mobilité. Le sujet DVII montre une rotation axiale marquée vers la droite, avec des valeurs (1.9°) qui restent cependant très proches de nos seuils de significativité (1.8°). Le sujet DXI présente une rotation intercondylienne importantes au début de la phase aller et de la phase de fermeture. Le sujet DXIII montre une inclinaison hors corridors asymptomatiques lors de la fin de mouvement (retour-fermeture).

En dehors de ces particularités de chaque sujet, si nous considérons à présent le groupe dans son ensemble, nous pouvons observer que la translation latérale s'effectue principalement vers la gauche, que ce soit pour les sujets avec claquement du côté droit (courbes en pointillés sur la figure) ou du côté gauche (courbes en trait plein), mais il n'y a pas d'autre caractéristique générale liée à la dysfonction étudiée pour ce mouvement de propulsion.

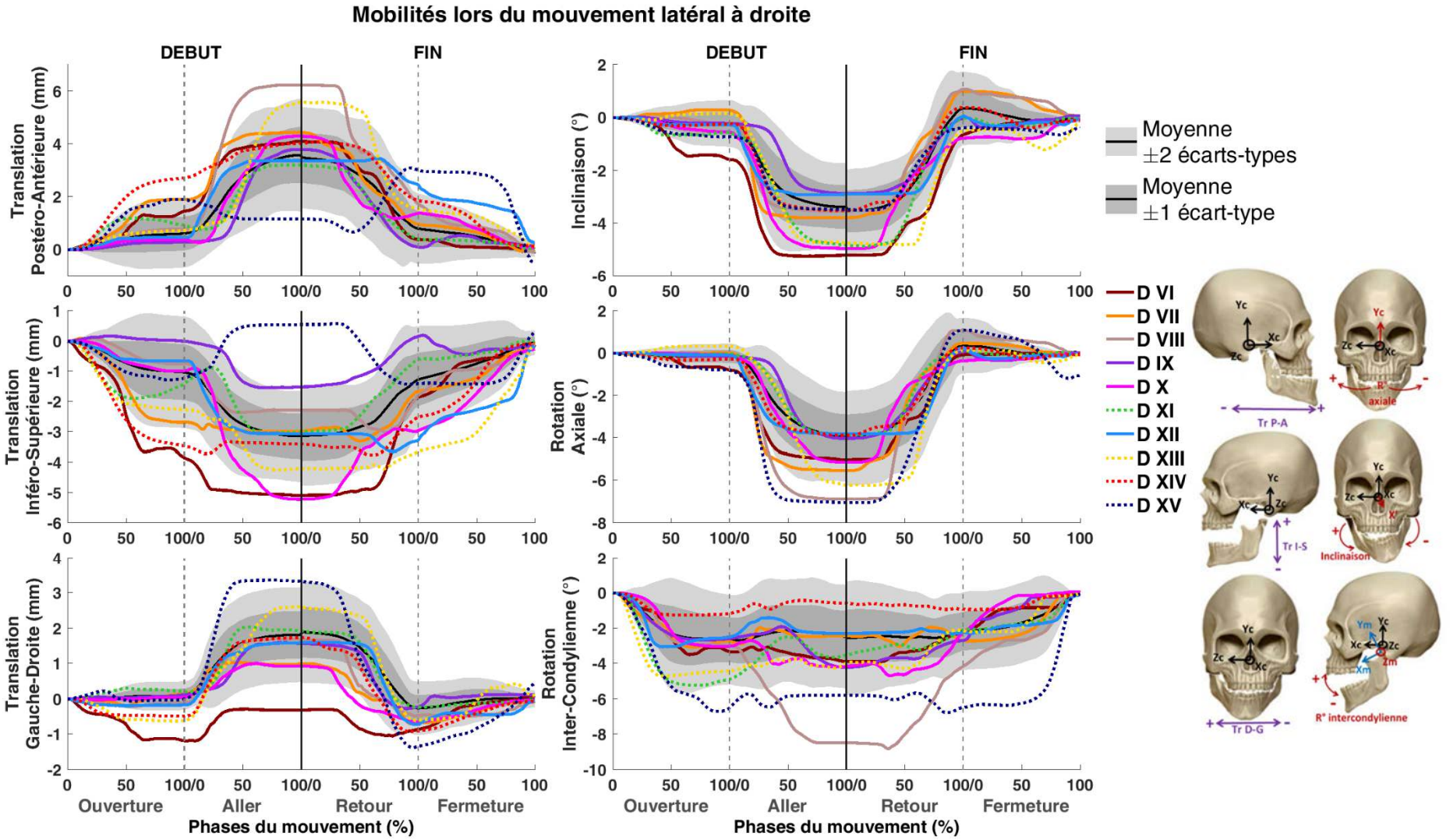


Figure 80 : Comparaison des 6 mobilités pendant le mouvement latéral à droite des sujets avec bruits articulaires (courbes colorées) à gauche (en trait plein) et à droite (en pointillés) par rapport aux corridors issus de l'étude du groupe de référence (courbe moyenne en noir et corridors gris foncé pour 1écart-type et gris clair pour 2écart-types)

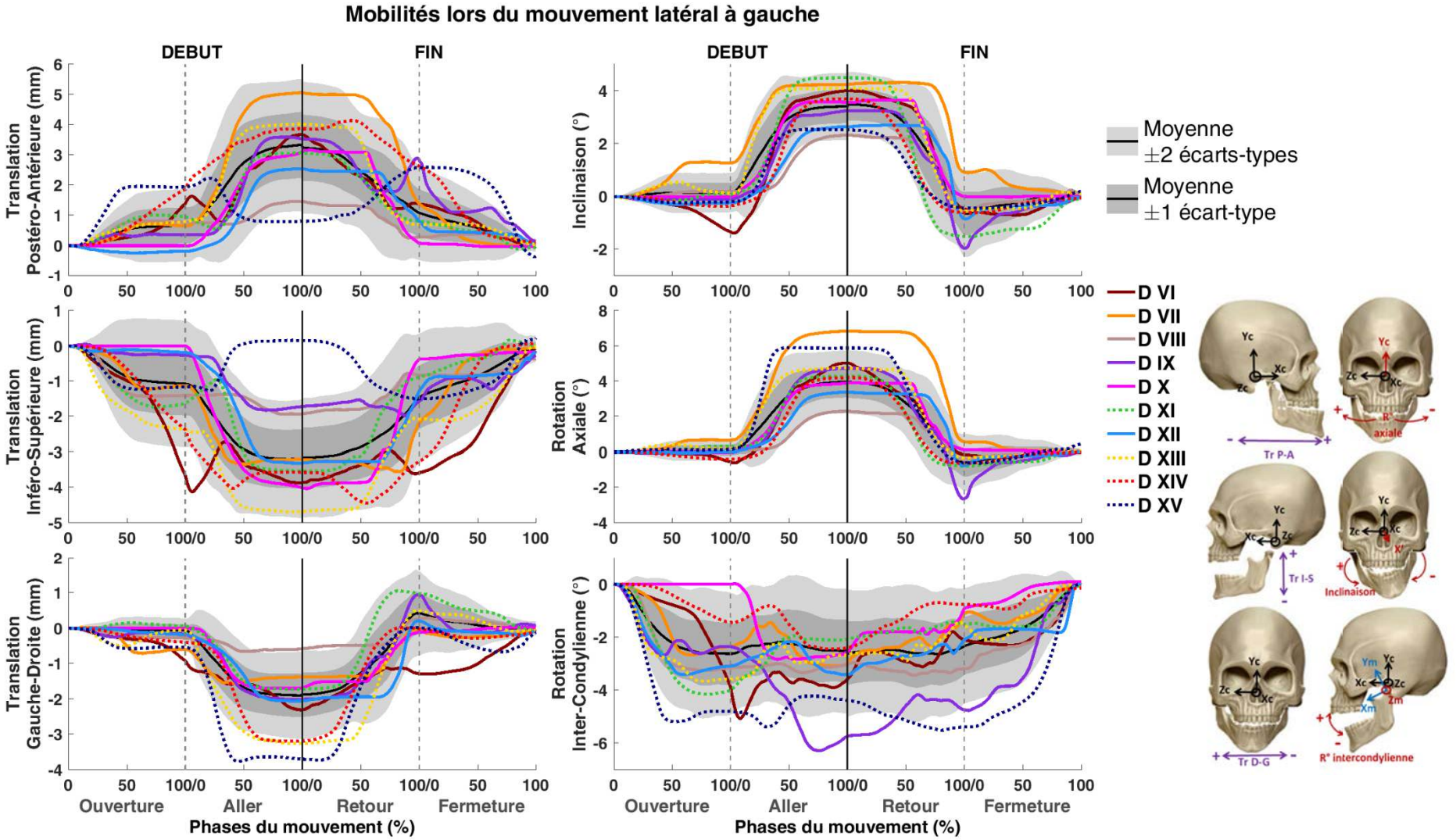


Figure 81 : Comparaison des 6 mobilités pendant le mouvement latéral à gauche des sujets avec bruits articulaires (courbes colorées) à gauche (en trait plein) et à droite (en pointillés) par rapport aux corridors issus de l'étude du groupe de référence (courbe moyenne en noir et corridors gris foncé pour 1écart-type et gris clair pour 2écart-types)

Pour les mouvements latéraux (Figure 80 & Figure 81), nous pouvons également repérer des différences en comparaison du groupe de référence.

Comme pour le mouvement de propulsion, nous pouvons repérer des sujets qui ne respectent pas les consignes de distinction des phases de mouvements. C'est le cas des sujets DXIV, DXII et DXIII lors du mouvement vers la droite et du sujet DXIV lors du mouvement vers la gauche.

Par ailleurs, le sujet DXV se démarque par sa réalisation. Lors des phases d'ouverture et de fermeture, il montre une rotation intercondylienne et une translation postéro-antérieure hors corridors. Puis, lors des phases de latéralité aller et retour, les mobilités montrent des différences de réalisation par rapport au corridor de référence. En effet, nous pouvons voir que ce sujet présente une translation latérale et une rotation axiale très marquées, qui sont en accord avec les valeurs importantes de MMLl et MMLr calculées précédemment. Cependant, afin d'arriver à cette latéralité élevée, ce sujet effectue une translation vers l'arrière et vers le haut, ce qui est opposé au mouvement asymptomatique. Ce fonctionnement inhabituel peut être le signe d'une réadaptation anatomique à la suite d'un éventuel blocage par le disque articulaire lors de la sortie du condyle de la fosse temporale. Ce sujet souffre de claquements non réguliers du côté droit, cependant ses mobilités particulières sont retrouvées pour les deux mouvements latéraux.

Le sujet DVI ressort également pour les deux mouvements latéraux. Lors du mouvement à droite, il présente une translation inférieure et une inclinaison importantes alors que la translation gauche-droite est limitée. Pour le mouvement à gauche, il présente des pics lors des changements de phases, visibles sur Tr, P-A, Tr I-S, Inclinaison et R IC avec cependant des tendances dans le corridor asymptomatique en dehors de ces pics et des valeurs plus importantes pour Tr I-S et Tr G-D lors de la phase de fermeture.
Le sujet DVIII montre pour le mouvement à droite, des valeurs importantes pour la translation antérieure, la rotation axiale et la rotation intercondylienne lors des phases de latéralité aller et retour. Alors que pour le mouvement à gauche, toutes ses mobilités sont dans les tendances asymptomatiques.

Pour ces deux sujets (DVI et DVIII), le bruit articulaire est situé du côté gauche. C'est lors du mouvement du côté opposé à ce bruit que les mobilités montrent le plus de valeurs hors corridors. Cette observation semble logique. En effet, lors du mouvement vers la droite c'est le condyle gauche (condyle non travaillant) qui effectue les déplacements les plus importants alors

que le condyle droit (condyle travaillant) reste dans la fosse pour effectuer essentiellement des rotations et inversement lors du mouvement à gauche. De ce fait, un problème au condyle gauche ne limitera pas (ou peu) le mouvement vers la gauche, mais impactera le mouvement vers la droite.

D'autres sujets présentent des valeurs extrêmes pour certaines mobilités. C'est le cas de DIX et DX sur Tr I-S du mouvement vers la droite, DVII pour Raxiale du mouvement vers la gauche (jusqu'à 7° contre une valeur moyenne asymptomatique de 4°) ainsi que DXIII et DXIV en translation gauche-droite du mouvement vers la gauche.

Par ailleurs, le sujet DIX avec claquement à gauche, ne présente pas de particularité marquée pour le mouvement latéral à droite. Alors que vers la gauche, sa rotation intercondylienne est importante et nous pouvons voir un pic sur les autres mobilités à la fin du mouvement retour : sa mandibule avance et dévie pour se remettre en position de vis-à-vis des arcades dentaires. Ceci pourrait révéler un repositionnement du disque articulaire.

De plus, nous pouvons voir que pour ces deux mouvements latéraux, les sujets avec bruits articulaires du côté droit (en pointillés sur les figures) présentant les valeurs les plus importantes pour la translation gauche-droite. Cette différence sur Tr G-D est significative pour les deux mouvements latéraux (test de Mann Whitney $p=0.005$ à droite et $p=0.02$ à gauche).

Nous pouvons conclure par l'ensemble de ces observations que nous ne pouvons pas donner de tendance générale sur les mouvements de latéralité pour ces sujets avec bruits articulaires.

Récapitulons les descriptions de chaque sujet avec bruits articulaires pour l'étude cinématique (Tableau 19).

Tableau 19 : Récapitulatif de l'étude des sujets avec bruits articulaires. Amplitudes (Ampl) et Vitesse (Vit) : +/- = amplitude et vitesse avec valeur supérieure/inférieure aux valeurs asymptomatiques, description des mobilités

Sujets	*Dysfonction*	*Mouvement*	*Ampl*	*Vit*	*Mobilités*
DVI	**Bruit à gauche**	Ouverture			Inclinaison avec variations et Tr-G-D importante
		Propulsion			Inclinaison et Tr-G-D importantes
		Latéral Right			Tr I-S et Inclinaison importantes & Tr G-D limitée
		Latéral Left	+	+	Pic en fin d'ouverture sur Tr P-A, Tr I-S, Inclinaison et R IC & en fermeture pour Tr I-S et Tr G-D
DVII	**Bruit à gauche +douleurs ATM**	Ouverture	+	+	Dans le corridor asymptomatique
		Propulsion			Raxiale importante
		Latéral Right			Dans le corridor asymptomatique
		Latéral Left	+		Raxiale importante
DVIII	**Bruit à gauche**	Ouverture		+	Dans le corridor asymptomatique
		Propulsion			Non-respect des consignes (début et fin de mouvement) + R IC stagne lors des phases aller-retour alors que les sujets asymptomatiques effectuent un angle inverse
		Latéral Right	+	+	Tr P-A, Raxiale et R IC importantes en aller et retour
		Latéral Left	-		Dans le corridor asymptomatique
DIX	**Bruit à gauche**	Ouverture			Dans le corridor asymptomatique
		Propulsion	-		Dans le corridor asymptomatique
		Latéral Right			Tr I-S importante
		Latéral Left	+		R IC importante et pic en fin de la phase de retour visible sur Tr P-A, Tr G-D, Inclinaison et Raxiale
DX	**Bruit à gauche**	Ouverture		-	Dans le corridor asymptomatique
		Propulsion			Non-respect des consignes (début du mouvement)
		Latéral Right			Tr I-S importante
		Latéral Left			Dans le corridor asymptomatique
DXI	**Bruit à droite**	Ouverture	-		Dans le corridor asymptomatique
		Propulsion		+	R IC importante
		Latéral Right		+	Dans le corridor asymptomatique
		Latéral Left		+	Dans le corridor asymptomatique
DXII	**Bruit à gauche**	Ouverture			Déviation mandibulaire brusque quand R IC = 30° visible surtout sur Inclinaison et Raxiale, mais aussi sur les autres mobilités
		Propulsion			Dans le corridor asymptomatique
		Latéral Right			Non-respect des consignes (fin de mouvement)
		Latéral Left			Dans le corridor asymptomatique
DXIII	**Bruit à droite**	Ouverture			Dans le corridor asymptomatique
		Propulsion	+	+	Inclinaison vers la gauche importante en fin de mouvement
		Latéral Right	+	+	Non-respect des consignes (fin de mouvement)
		Latéral Left	+	+	Tr G-D importante
DXIV	**Bruit à droite**	Ouverture			Dans le corridor asymptomatique
		Propulsion			Non-respect des consignes (début du mouvement)
		Latéral Right			Non-respect des consignes
		Latéral Left		+	Non-respect des consignes et Tr G-D importante
DXV	**Bruit à droite**	Ouverture	-		Dans le corridor asymptomatique
		Propulsion		+	Non-respect des consignes et R IC importante
		Latéral Right	+	+	Phases ouverture et fermeture : comportement asymptomatique mais R IC importante
		Latéral Left	+	+	Phase latéralité aller et retour : Raxiale et Tr G-D importantes & Tr P-A et Tr I-S inversées

Dans ce tableau, nous avons récapitulé toutes les particularités visualisées sur les mobilités pour l'ensemble des sujets avec bruits articulaires. Nous y avons laissé les sujets qui ne respectent pas les consignes, car il nous est impossible de savoir si ce non-respect peut être le reflet ou non de la dysfonction. A partir de ce tableau, nous voyons que tous les sujets peuvent être discriminés sur au moins une mobilité de l'un des mouvements élémentaires. Cependant, nous ne pouvons pas dégager une mobilité particulièrement plus touchée que les autres. Par ailleurs,

c'est sur le mouvement d'ouverture que les différences entre asymptomatiques et dysfonctions sont les moins présentes, avec seulement 2 sujets discriminés contre 8 en propulsion et latéralité droite et 6 en latéralité gauche. De plus, nous repérons que la majorité des sujets est discriminée pour plusieurs mouvements, avec un sujet pour les quatre mouvements, 3 sujets pour trois mouvements, 5 sujets pour deux mouvements et un seul sujet pour un mouvement.
Par cette étude des mobilités, plusieurs sujets se démarquent plus particulièrement. Le sujet DXII présente des claquements bruyants et une déviation mandibulaire importante lors de l'ouverture maximale, qui sont repérables par des variations brusques sur les mobilités secondaires en ouverture lorsque ces claquements opèrent. Nous trouvons également le sujet DXV car il présente, lors des deux mouvements latéraux, des courbes avec un comportement différent de l'asymptomatique (inversement des sens des mobilités), pouvant refléter une réadaptation du mouvement pour pallier les déficiences discales. Enfin, le sujet DVI peut également être mentionné, de manière moins certaine, mais c'est le seul sujet repéré sur l'ensemble des mouvements étudiés.

Pour compléter ces observations pour le groupe dans son ensemble, vérifions à présent s'il existe des différences significatives avec le groupe asymptomatique pour les valeurs de mobilités au point maximal du mouvement (Tableau 20).

Tableau 20 : test de Mann-Whitney entre les sujets asymptomatiques et les sujets souffrant de bruits articulaires sur les valeurs des mobilités au point maximal du mouvement : résultat de p. NS=non significatif ; BrG= sujets avec bruits à gauche ; BrD= sujets avec bruits à droite ; asympt= sujets asymptomatiques

	Tr P-A	*Tr I-S*	*Tr G-D*	*Inclinaison*	*Raxiale*	*R IC*
Ouverture	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Propulsion	NS	NS	BrG/asympt (p=0.004)	NS	NS	NS
Latéralité à droite	NS	NS	BrG/asympt (p=0.032)	NS	NS	NS
Latéralité à gauche	NS	NS	BrD/asympt (p=0.029)	NS	NS	BrG/asympt (p=0.014)

Nous voyons que les différences avec le groupe asymptomatique sont présentes principalement pour la translation gauche-droite. Ceci est vrai en propulsion (pour le groupe avec bruits à gauche) et pour les deux mouvements latéraux. Cette remarque est importante car elle semble indiquer que la mobilité de translation latérale pourrait jouer un rôle important dans la détection de dysfonction. Une différence existe également entre les sujets avec bruits du côté gauche et le groupe asymptomatique pour la rotation intercondylienne. Cependant, il est difficile de

comprendre, à l'heure actuelle, la raison de cette corrélation qui existe uniquement avec les bruits articulaires du côté gauche.

Par ailleurs, nous voyons que pour le mouvement vers la droite ce sont les sujets avec bruits articulaires à gauche qui présentent des différences avec les sujets asymptomatiques alors qu'à l'inverse, pour le mouvement latéral vers la gauche se sont les sujets avec bruits articulaires à droite qui sont différents de la base de données de référence. Ce sont donc les condyles non travaillants qui influencent cette mobilité gauche-droite lors des mouvements latéraux.

4. Discussion

Nous avons étudié les caractéristiques des sujets à dysfonctions au cours des différents mouvements mandibulaires. Pour cela, nous avons quantifié les amplitudes maximales de mouvements (MMO, MMP et MML), les vitesses de réalisation de ces mouvements et nous avons observé l'évolution des mobilités mandibulaires au cours de ces mouvements, ainsi que leur valeur au point extrême du mouvement. Nous les avons ensuite comparées aux résultats du groupe asymptomatique.

Les amplitudes de mouvement ont pu montrer des limitations pour le sujet avec douleurs musculaires et le sujet avec traumatisme lors de la latéralité. Les vitesses de réalisation des mouvements latéraux étaient significativement différentes entre les sujets avec bruits articulaires et le groupe asymptomatique. Concernant les mobilités, outre les valeurs au point maximal du mouvement, c'est également la manière de réaliser le mouvement qui renseigne sur les particularités du groupe. Par l'observation de ces mobilités, nous avons pu repérer des particularités pour 4 sujets sur les 5 sujets avec dysfonctions diverses, et pour la totalité des sujets avec bruits articulaires. La majorité des discriminations sont faites sur le mouvement de propulsion (73% des sujets à dysfonctions) et les mouvements latéraux (73% à droite et 67% à gauche), pour lesquels nous avons pu mettre en avant des différences significatives entre sujets avec bruits articulaires et sujets asymptomatiques sur la translation gauche-droite. Le mouvement d'ouverture présente peu de sujets discriminés, mais les sujets qui le sont montrent des particularités bien marquées avec notamment une déviation mandibulaire importante, reflet du claquement articulaire.

Cette étude préliminaire sur la comparaison des sujets à dysfonctions avec une population de référence asymptomatique montre qu'il semble possible de détecter la présence d'une dysfonction par le biais de l'analyse cinématique tridimensionnelle. Cependant, ces premiers résultats ne permettent pas encore, à l'heure actuelle, de pouvoir diagnostiquer une dysfonction particulière à l'aide de cet outil.

5. Conclusions

Même si nous devons rester prudents sur nos résultats, compte tenu du nombre de sujets limité et du faible nombre de mobilités discriminantes pour certains sujets, nous avons pu réaliser une discrimination des sujets avec dysfonctions dans 93% des cas étudiés (14 sujets sur 15 sujets) par l'étude des mobilités mandibulaires. Les mouvements de propulsion et de latéralité (gauche et droite) s'avèrent être les mouvements les plus utiles car révélateurs, reflétant alors l'importance de leur étude.

Au-delà des discriminations sujet par sujet, nous n'avons pas pu mettre en avant un critère unique de diagnostic selon la dysfonction. Mais nos résultats sont encourageants. Cette étude doit donc être renforcée par une analyse incluant plus de sujets et des patients dont la dysfonction est bien connue, quel que soit son degré de gravité. Cela permettra de confirmer nos premières constatations concernant le lien entre la cinématique et les dysfonctionnements.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette thèse, consacrée à l'étude de la cinématique tridimensionnelle de la mandibule, a permis la création d'une base de données de référence de ses six mobilités pour des mouvements simples de la bouche : l'ouverture maximale, la propulsion, la latéralité à droite et à gauche. Cette base de données, constituée de 29 sujets asymptomatiques, est la première base de données consacrée à l'ensemble de ces mouvements élémentaires.

Le manque de référentiel scientifique commun pour l'analyse cinématique de la mandibule oblige la mise en place et l'évaluation d'une méthodologie d'étude précise. Notre étude cinématique a donc été validée au préalable, par la quantification de la précision du système utilisé (Zebris CMS20-JMA) et par l'étude de la répétabilité du protocole, et plus précisément du pointage des points anatomiques. Nous avons ensuite pu proposer une méthodologie pour l'analyse de la cinématique mandibulaire. Basée sur l'hypothèse des solides rigides pour le crâne et la mandibule, la méthode des positions successives permet de quantifier les mobilités du repère lié à la mandibule à chaque instant par rapport à un repère de référence lié au crâne. Le repère crâne a été créé en se basant sur l'utilisation d'un plan anatomique proche de celui des études cliniques traditionnelles, alors que le repère mandibule a été construit à partir des points les plus répétables issus de notre étude de répétabilité. Nous avons ensuite pu quantifier l'influence de la variabilité du pointage de ces points anatomiques sur la création du repère mandibule.

La base de données des mesures cinématiques des sujets asymptomatiques est donc basée sur une méthodologie dont nous avons pu estimer la robustesse. Cette base de données quantifie, non seulement, les valeurs maximales de déplacement du point interincisif, ainsi que sa vitesse de déplacement, mais également les six mobilités mandibulaires lors de différents mouvements élémentaires. Ces mobilités sont décrites en termes de valeur au point maximal du mouvement mais surtout en termes de comportement tout au long du mouvement. Nous avons pu valider l'hypothèse selon laquelle la mandibule montre une combinaison complexe de rotations et de translations pour tous ses mouvements. Nous avons également pu montrer que les mouvements d'ouverture et de propulsion présentent trois mobilités prédominantes (rotation

intercondylienne, translation inféro-supérieure et translation postéro-antérieure) et trois mobilités secondaires (translation latérale, rotation axiale et inclinaison mandibulaire). Les mouvements latéraux présentent les six mobilités qui s'activent avec des valeurs semblables. De plus, nous avons pu mettre en avant l'absence de différence sur les mobilités de la mandibule entre les hommes et les femmes de cette population asymptomatique. Cette base de données ainsi créée nous a donc permis d'effectuer une description précise et détaillée du comportement de la mandibule asymptomatique lors des différents mouvements élémentaires.

Sur la base de ces descriptions asymptomatiques, nous avons comparé des sujets présentant des dysfonctions mineures. Quinze sujets ont été repérés dans notre population grâce à un questionnaire, que nous avons mis au point afin de calculer un score de détection de ces dysfonctions. Ainsi, nous avons pu étudier dix sujets avec claquement articulaire et/ou craquement à la palpation, deux sujets avec acouphènes, un sujet avec antécédents de traumatisme articulaire, un sujet pris en charge pour bruxisme et enfin un sujet avec douleurs musculaires. Nous avons comparé l'ensemble de ces sujets à la base de données des sujets asymptomatiques pour les différents mouvements élémentaires. Les tendances principales qui ressortent de cette étude sont la présence de limitation de certaines mobilités pour les sujets avec douleurs ou traumatismes ainsi qu'une limitation des amplitudes maximales de mouvements latéraux (MML). Pour ces cinq sujets avec dysfonctions diverses (acouphènes, bruxisme, douleurs, traumatisme), un seul n'a pas pu être discriminé par l'étude cinématique. Alors que la totalité des sujets avec bruits articulaires a montré au moins une mobilité en dehors des corridors asymptomatiques. De ce fait, si nous considérons le groupe à dysfonctions dans sa globalité, 14 sujets sur les 15, soit 93% de cette population, ont pu être discriminés par au moins une des mobilités mandibulaires, et essentiellement sur les mouvements de propulsion et de latéralité.

Ces résultats sur la détection des dysfonctions de l'appareil manducateur sont encourageants mais ne restent qu'une première approche dans le diagnostic des dysfonctions, compte tenu du nombre de sujets limités pour les différents dysfonctionnements

Il serait alors intéressant de répéter les mesures dans le temps pour ces sujets dits « à dysfonction » pour confirmer ou non la détection de la dysfonction par l'analyse des mobilités mandibulaires. Il pourrait également être pertinent de réaliser des mesures cinématiques sur des sujets ayant des dysfonctions diagnostiquées et connues. Pour cela, des mesures identiques à notre protocole doivent être exécutées afin d'effectuer une comparaison identique au travail réalisé ici sur les sujets avec dysfonctions mineures. Idéalement, afin d'englober les dysfonctions de l'appareil manducateur, il faudrait recruter un nombre plus important de

patients dans chaque catégorie : problèmes articulaires, problèmes musculaires, traumatisme. Néanmoins, notre protocole risque de subir des modifications pour quelques sujets, pour lesquels certains mouvements seront impossibles à réaliser, compte tenu de leur dysfonction.

Ces différentes mesures pourront être complétées par des acquisitions de l'activité musculaire par électromyographie (EMG), ainsi que des mesures de la morsure ou de la mastication, avec l'enregistrement d'écrasements sur dynamomètres pour quantifier les forces engendrées lors de ces actions. Ces résultats, associés aux mesures anthropométriques de notre étude ainsi qu'aux données cinématiques, pourrait alors permettre la création d'un modèle paramétré précis de la mandibule.

Par ailleurs il serait intéressant d'effectuer, pour certains sujets, des mesures par imagerie médicale, afin de confirmer notre localisation des points anatomiques. Cette étape devra résulter de la mise en place d'une méthode précise concernant le passage entre la position du sujet lors de nos mesures et sa position lors de l'acquisition IRM, incluant par exemple le mouvement des tissus mous sur les structures osseuses.

Par ailleurs, d'autres mesures ont pu être discutées dans le cadre de cette thèse, et notamment concernant le suivi de patient par notre étude cinématique. Des mesures doivent être réalisées avant et après prise en charge chirurgicale. Ces mesures seront effectuées sur des patients avec luxation irréductible du disque articulaire nécessitant un repositionnement chirurgical, des atteintes du disque articulaire nécessitant une discectomie, ou encore des sujets avec ankylose mandibulaire ou arthrose sévère nécessitant une prise en charge chirurgicale par pose d'implants mandibulaires ou de prothèses de l'ATM. Ainsi, il s'agira de déterminer si la quantification de la cinématique tridimensionnelle de la mandibule est capable d'évaluer, de façon objective, l'effet de la prise en charge chirurgicale et postopératoire sur la recouvrance des fonctions de l'articulation temporo-mandibulaire.

Références bibliographiques

[1]. Yassine Mrabet. Axes.www.wikimedia.org/wiki/File:AxesPlansAnatomie.png, acces le 10/06/2017

[2]. Saemann M. (2015) Encyclopédie Larousse Medical.

[3]. Netter FH. (1997) Atlas d'anatomie humaine. 2ème.

[4]. CISSE MD. (2006) Les luxations récentes de l'articulation temporo-mandibulaire : à propos de 70 cas colligés à l'hôpital Aristide Le Dantec d'avril 2003 à juillet 2006.Thesis

[5]. Hebting J-M, Ferrand G. (2015) Anatomie de l'articulation temporo-mandibulaire.

[6]. Yatabe M, Zwijnenburg A, Megens CC, Naeije M. (1995) The kinematic center: a reference for condylar movements. *J. Dent. Res.*, 74(10), 1644–1648.

[7]. Mesnard M. (2005) Elaboration et validation d'un protocole de caractérisation de l'Articulation Temporo-Mandibulaire.Thesis

[8]. Kamina P. (2010) Carnet d'anatomie: Tête, cou, dos. Maloine. Paris.

[9]. Bonnefoy C, Chikhani L, Dichamp J. (2013) Anatomie descriptive et fonctionnelle de l'articulation temporo-mandibulaire. *Actual. Odontostomatol. (Paris).*, (265), 4–18.

[10]. Aoun M. (2010) Elaboration et validation d'un modèle de l'articulation temporo-mandibulaire par éléments finis.Thesis

[11]. Dargaud J, Vinkka-Puhakka H, Cotton F, Del Corso M, Bruy J, Vialle B, et al. (2007) Rapports de dissection sur la connaissance de l'articulation temporo-mandibulaire. *EMC - Odontol.*, 1–21.

[12]. Turmel S. (2013) L'hygiéniste dentaire en santé publique.

[13]. Lemay J. Malocclusions dentaires.https://www.orthodontisteenligne.com/cas-traites-2/classe1/ ; acces le 10/09/2016

[14]. Bennis M. (2011) Malocclusions et dysfonctions temporo-mandibulaires Étude épidémiologique.Thesis

[15]. Pechoux S. (2007) Incidence des habitudes de vie et des parafonctions dans les troubles algo-dysfonctionnels de l'appareil manducateur: etude effectiée sur une population d'adultes jeunes de la région de Cuenca (Equateur).Thesis

[16]. Vallee C. (2004) Déplacements discaux des ATM. Place du chirurgien dentiste dans la prise en charge thérapeutique.Thesis

[17]. Boudhraa W. (2011) Contribution à l'étude de la posture céphalique dans la physiologie et la physiopathologie de l'appareil manducateur.Thesis

[18]. Le Gall MG, Joerger R, Bonnet B. (2010) Où et comment situer l'occlusion ? *Cah. Prothese*, 150, 33–46.

[19]. Bumann A, Lotzmann U. (2002) TMJ Disorders and Orofacial Pain The Role of Dentistry in a Multidisciplinary Diagnostic Approach.

[20]. Chassagne JF, Chassagne S, Deblock L, Gillet P, Kahn J, Bussienne J, et al. (2003) Pathologie non traumatique de l'articulation temporomandibulaire. In *Encyclopédie Médico-Chirurgicale*, pp.22–56.

[21]. Le Gall MG, Lauret JF. (1998) The function of Mastication: Implications for Occlusal Therapy. *Pract. periodontics aesthetic Dent.*, 10(2).

[22]. Le Berre M. (2005) Approche rationnelle de l'utilisation des articulateurs en omnipratique.Thesis

[23]. Schiffman E, Ohrbach R, Truelove E, Look J, Anderson G, Goulet J-P, et al. (2014) Diagnostic Criteria for Temporomandibular Disorders (DC/TMD) for Clinical and Research Applications: Recommendations of the International RDC/TMD Consortium Network and Orofacial Pain Special Interest Group. *J. oral facial pain headache*, 28(1), 6–27.

[24]. Said P. (2015) Dysfonctionnements de l'appareil manducateur : les bases actuelles du diagnostic.
[25]. Laplanche O, Ehrmann E, Pedeutour P, Duminil G. (2012) TMD clinical diagnostic classification (Temporo Mandibular Disorders). *J. Dentofac. Anomalies Orthod.*, 15(2), 202.
[26]. Bloche S. (2013) Prise en charge comportementale dans le cadre des dysfonctions de l'appareil manducateur.Thesis
[27]. Abou-khalil C. (2007) Traitements non invasifs des dysfonctionnements de l'appareil manducateur.Thesis
[28]. Goulet J, Lavigne G. (2004) Mieux comprendre et traiter les problèmes temporomandibulaires. *Le Med. du Québec*, 39(7), 37–48.
[29]. Carolina TMJ & Facial Pain center. TMJ Pain.https://carolinatmj.com/tmj-pain-dentistry/tmj-pain/ ; acces le 10/04/2017
[30]. Ohrbach R, Gonzales Y, List T, Michelotti A, Schiffman E. (2014) Diagnostic Criteria for Temporomandibular Disorders (DC/TMD) Clinical Examination Protocol : Version 02June2013. 1–122.
[31]. Cazals G, Fleiter B. (2017) Dépistage des Dysfonctionnements de l'Appareil Manducateur et leurs facteurs de risque. *Inf. Dent. Mag.*, 4, 42–49.
[32]. Kai S, Kai H, Tabata O, Shiratsuchi Y, Ohishi M. (1998) Long-term outcomes of nonsurgical treatment in nonreducing anteriorly displaced disk of the temporomandibular joint. *Oral Surgery, Oral Med. Oral Pathol. Oral Radiol. Endodontology*, 85(3), 258–267.
[33]. Munier F. (2013) Traitement des dysfonctions cranio-mandibulaires : un carrefour multidisciplinaire.Thesis
[34]. Orthlieb JD, Ré JP, Jeany M, Giraudeau A. (2016) Articulation temporo-mandibulaire, occlusion et bruxisme. *Rev. Stomatol. Chir. Maxillofac. Chir. Orale*, 117(4), 207–211.
[35]. Fricton JR, Schiffman EL. (1987) The craniomandibular index : Validity. *J. Prosthet. Dent.*, 58(2).
[36]. Gsellmann B, Schmid-Schwap M, Piehslinger E, Slavicek R. (1998) Lengths of condylar pathways measured with computerized axiography (CADIAX) and occlusal index in patients and volunteers. *J. Oral Rehabil.*, 25(2), 146–52.
[37]. Pehling J, Schiffman E, Look J, Shaefer J, Lenton P, Fricton J. (2002) Interexaminer reliability and clinical validity of the temporomandibular index: a new outcome measure for temporomandibular disorders. *J. Orofac. Pain*, 16(4), 296–304.
[38]. Ajanović M, Bejtović B. (2009) Correlation Between Values of the Helkimo Anamnestic and Clinical Dysfunction Index in Patients Suffering from Post Traumatic Stress Disorder. *Mater. Socio Medica*, 21(2), 85–91.
[39]. Vojdani M, Bahrani F, Ghadiri P. (2012) The study of relationship between reported temporomandibular symptoms and clinical dysfunction index among university students in Shiraz. *Dent Res J*, 9(2), 221–225.
[40]. Clark GT, Delcanho RE, Goulet JP. (1993) The utility and validity of current diagnostic procedures for defining temporomandibular disorder patients. *Adv. Dent. Res.*, 7(2), 97–112.
[41]. Campos JADB, Carrascosa AC, Bonafé FSS, Maroco J. (2013) Severity of temporomandibular disorders in women: validity and reliability of the Fonseca Anamnestic Index. *Braz. Oral Res.*, 28(1), 16–21.
[42]. van der Weele LT, Dibbets JM. (1987) Helkimo's index: a scale or just a set of symptoms? *J. Oral Rehabil.*, 14(3), 229–237.
[43]. Kataoka T, Kawanabe N, Shiraga N, Hashimoto T, Deguchi T, Miyawaki S, et al. (2013) The influence of craniofacial morphology on mandibular border movements. *Cranio*, 31(1), 14–22.
[44]. Lewis RP, Buschang PH, Throckmorton GS. (2001) Sex differences in mandibular movements during opening and closing. *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthop.*, 120(3), 294–303.
[45]. Pharaboz C, Carpentier P. (2009) Exploration en IRM des articulations temporo-mandibulaires. *J. Radiol.*, 90(5 C2), 642–648. Elsevier Masson SAS.
[46]. Salzmann JA. (1952) Studies in the mobility of the human mandible. *Acta Scand.*, 10(10), 471–473.

[47]. Ulrich J. (1959) The human temporomandibular joint: Kinematics and actions of the masticatory muscles. *J. Prosthet. Dent.*, 9(3), 399–406.

[48]. Ingervall B. (1970) Range of movement of mandible in children. *Scand. J. Dent. Res.*, 78(4), 311–322.

[49]. Kuwahara T, Miyauchi S, Maruyama T. (1993) Clinical classification of the patterns of mandibular movements during mastication in subjects with TMJ disorders. *Int. J. Prosthodont.*, 5(2), 122–9.

[50]. Lauret JF, Le Gall MG. (1994) La mastication: une réalité oubliée par l'occlusodontologie? *Cah. Prothese*, 85.

[51]. Lauret JF, Le Gall MG. (1996) The function of mastication: a key determinant of dental occlusion. *Pract. periodontics aesthetic Dent.*, 8(8).

[52]. Lauret JF, M.G. Le Gall. (1999) La mastication: un déterminant clé en occlusodontie. *Le point*, 138.

[53]. Gallo LM, Fushima K, Palla S. (2000) Mandibular helical axis pathways during mastication. *J. Dent. Res.*, 79(8), 1566–1572.

[54]. Travers KH, Buschang PH, Hayasaki H, Throckmorton GS. (2000) Associations between incisor and mandibular condylar movements during maximum mouth opening in humans. *Arch. Oral Biol.*, 45(4), 267–275.

[55]. Buschang PH, Hayasaki H, Throckmorton GS. (2000) Quantification of human chewing-cycle kinematics. *Arch. Oral Biol.*, 45(6), 461–474.

[56]. Miyawaki S, Tanimoto Y, Kawakami T, Sugimura M, Takano-Yamamoto T. (2001) Motion of the human mandibular condyle during mastication. *J. Dent. Res.*, 80(2), 437–442.

[57]. Naeije M, Hofman N. (2003) Biomechanics of the human temporomandibular joint during chewing. *J. Dent. Res.*, 82(7), 528–531.

[58]. Pinheiro AP, Andrade AO, Pereira AA, Bellomo D. (2008) A computational method for recording and analysis of mandibular movements. *J. Appl. Oral Sci.*, 16(5), 321–7.

[59]. Pinheiro AP, Pereira AA, Andrade AO, Bellomo D. (2011) Measurement of jaw motion: the proposal of a simple and accurate method. *J. Med. Eng. Technol.*, 35(3–4), 125–33.

[60]. Joerger R, Le Gall M, Baumann B. (2012) Mastication et déglutition tracés axiographiques. *Cah. Prothese*, 158, 45–54.

[61]. Reicheneder C, Proff P, Baumert U, Gedrange T. (2008) Comparison of maximum mouth-opening capacity and condylar path length in adults and children during the growth period. *Ann. Anat.*, 190(4), 344–350.

[62]. Coutant J-C, Mesnard M, Morlier J, Ballu A, Cid M. (2008) Discrimination of objective kinematic characters in temporomandibular joint displacements. *Arch. Oral Biol.*, 53(5), 453–461.

[63]. Celić R, Jerolimov V, Knezović Zlatarić D. (2004) Relationship of slightly limited mandibular movements to temporomandibular disorders. *Braz. Dent. J.*, 15(2), 151–154.

[64]. Reicheneder CA, Proff P, Baumert U, Gedrange T. (2009) Growth-related differences in maximum laterotrusion and retrusion between children and adults. *Angle Orthod.*, 79(2), 265–270.

[65]. Voiner J, Yu J, Deitrich P, Chafin C, Giannakopoulos H. (2011) Analysis of mandibular motion following unilateral and bilateral alloplastic TMJ reconstruction. *Int. J. Oral Maxillofac. Surg.*, 40(6), 569–571.

[66]. Mazzetto MO, Anacleto MA, Rodrigues CA, Bragança RMF, Paiva G, Valencise Magri L. (2016) Comparison of mandibular movements in TMD by means of a 3D ultrasonic system and digital caliper rule. *Cranio - J. Craniomandib. Pract.*, 9634(April), 1–6.

[67]. Talwar RM, Ellis E, Throckmorton GS. (1998) Adaptations of the masticatory system after bilateral fractures of the mandibular condylar process. *J. Oral Maxillofac. Surg.*, 56(4), 430–439.

[68]. Best N, Best S, Loudovici-Krug D, Smolenski UC. (2013) Measurement of Mandible Movements Using a Vernier Caliper -- An Evaluation of the Intrasession-, Intersession- and Interobserver Reliability. *CRANIO J. Craniomandib. Pract.*, 31(3), 176–180.

[69]. Soboļeva U, Lauriņa L, Slaidiņa A. (2005) Jaw tracking devices--historical review of methods development. Part II. *Stomatol. Balt. Dent. Maxillofac. J.*, 7(3), 72–76.

[70]. Hugger A, Hugger S, Ahlers MO, Schindler HJ. (2013) Movement function of the mandible : A concept for structuring criteria for analysis and for standardizing computer-assisted recordings Expert statement for developing Diagnostic Criteria for Dysfunction. *J. Craniomandib. Funct.*, 5(1), 41–53.

[71]. Roumigue D. (2016) Symptomatologies et etiologies des troubles de l'occlusion : analyse de plus de 650 questionnaires patients.Thesis

[72]. Piehslinger E, Celar AG, Celar RM, Slavicek R. (1991) Computerized axiography: principles and methods. *Cranio*, 9(4), 344–55.

[73]. Bigenzahn W, Piehslinger E, Slavicek R. (1991) Computerized axiography for functional diagnosis of orofacial dysfunctions. *Folia Phoniatr*, 43, 275–281.

[74]. Joerger R, Leize M. (1996) Imagerie des DTM et examen axiographique. *Réalités Clin.*, 7(2), 197–208.

[75]. Mauderli AP, Lundeen HC, Loughner B. (1988) Condylar movement recordings for analyzing TMJ derangements. *J. Craniomandib. Disord. Facial Oral Pain*, 2(3), 119–127.

[76]. Kraljević S, Pandurić J, Badel T, Dulcić N. (2003) Registration and measurement of opening and closing jaw movements and rotational mandibular capacity by using the method of electronic axiography. *Coll. Antropol.*, 27 Suppl 2, 51–59.

[77]. Ikeda M, Miyamoto JJ, Takada J, Moriyama K. (2017) Association between 3-dimensional mandibular morphology and condylar movement in subjects with mandibular asymmetry. *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthop.*, 151(2), 324–334.

[78]. Kijak E, Lietz-Kijak D, Frączak B, Śliwiński Z, Margielewicz J. (2015) Assessment of the TMJ Dysfunction Using the Computerized Facebow Analysis of Selected Parameters. *Biomed Res. Int.*, 2015, 508069.

[79]. Bhawsar S V, Jaybhay P V. (2014) Correlation of opening and closing path of mandible. *J. Indian Dent. Assoc.*, (11), 14–19.

[80]. Sadat-Khonsari R, Fenske C, Kahl-Nieke B, Kirsch I, Jüde HD. (2003) The helical axis of the mandible during the opening and closing movement of the mouth. *J. Orofac. Orthop.*, 64(3), 178–185.

[81]. Tuppy F, Celar R, Celar A, Piehslinger E, Jäger W. (1994) The reproducibility of condylar hinge axis positions in patients, by different operators, using the electronic mandibular position indicator. *J. Orofac. Pain*, 8(3), 315–320.

[82]. Bernhardt O, Küppers N, Rosin M, Meyer G. (2003) Comparative tests of arbitrary and kinematic transverse horizontal axis recordings of mandibular movements. *J. Prosthet. Dent.*, 89(2), 175–179.

[83]. Nagy W, Smithy TJ, Wirth CG. (2002) Accuracy of a predetermined transverse horizontal mandibular axis point. *J. Prosthet. Dent.*, 87(4), 387–394.

[84]. Reicheneder C, Kardari Z, Proff P, Fanghaenel J, Faltermeier A, Römer P. (2013) Correlation of condylar kinematics in children with gender, facial type and weight. *Ann. Anat.*, 195(3), 243–247.

[85]. Ferrario VF, Sforza C, Lovecchio N, Mian F. (2005) Quantification of translational and gliding components in human temporomandibular joint during mouth opening. *Arch. Oral Biol.*, 50(5), 507–515.

[86]. Tokutomi J, Saitoh I, Hayasaki H, Iwase Y, Yamasaki Y, Nonaka K. (2005) Correlations between Incisor and Condyle Motion during Protrusion in Children with Primary Dentition. *J. Japanese Soc. Stomatognathic Funct.*, 12(1), 37–44.

[87]. Mapelli A, Galante D, Lovecchio N, Sforza C, Ferrario VF. (2009) Translation and rotation movements of the mandible during mouth opening and closing. *Clin. Anat.*, 22(3), 311–318.

[88]. Naeije M. (2002) Local kinematic and anthropometric factors related to the maximum mouth opening in healthy individuals. *J. Oral Rehabil.*, 29(6), 534–539.

[89]. Muto T, Kanazawa M. (1996) The relationship between maximal jaw opening and size of skeleton: a cephalometric study. *J Oral Rehabil*, 23(1), 22–24.

[90]. Baqaien MA, Al-Salti FM, Muessig D. (2007) Changes in condylar path inclination during maximum protrusion between the ages of 6 and 12 years. *J. Oral Rehabil.*, 34(1), 27–33.

[91]. Buschang PH, Throckmorton GS, Travers KH, Hayasaki H. (2001) Incisor and mandibular condylar movements of young adult females during maximum protrusion and lateratrusion of the jaw. *Arch. Oral Biol.*, 46(1), 39–48.

[92]. Fukui T, Tsuruta M, Murata K, Wakimoto Y, Tokiwa H, Kuwahara Y. (2002) Correlation between facial morphology , mouth opening ability , and condylar movement during opening – closing jaw movements in female adults with normal occlusion. *Eur. J. Orthod.*, 24, 327–336.

[93]. Celić R, Jerolimov V, Knezović Zlatarić D, Klaić B. (2003) Measurement of mandibular movements in patients with temporomandibular disorders and in asymptomatic subjects. *Coll. Antropol.*, 27 Suppl 2(June 2014), 43–49.

[94]. De Felício CM, Mapelli A, Sidequersky FV, Tartaglia GM, Sforza C. (2013) Mandibular kinematics and masticatory muscles EMG in patients with short lasting TMD of mild-moderate severity. *J. Electromyogr. Kinesiol.*, 23(3), 627–633.

[95]. Ishigaki S, Nakamura T, Akanishi M, Maruyama T. (1989) Clinical classification of maximal opening and closing movements. *Int. J. Prosthodont.*, 2(2), 148–154.

[96]. Mapelli A, Machado BCZ, Garcia DM, Rodrigues Da Silva MAM, Sforza C, de Felício CM. (2016) Three-dimensional analysis of jaw kinematic alterations in patients with chronic TMD - disc displacement with reduction. *J. Oral Rehabil.*, (2), 824–832.

[97]. Throckmorton GS, Ellis E. (2000) Recovery of mandibular motion after closed and open treatment of unilateral mandibular condylar process fractures. *Int. J. Oral Maxillofac. Surg.*, 29(6), 421–427.

[98]. Maladiere E. (1997) Articulations temporo-mandibulaires et polyarthrite rhumatoïde: Etude prospective de la demande de soins chez 43 patients.Thesis

[99]. PocketDentistry. The temporomandibular joint. https://pocketdentistry.com/30-the-temporomandibular-joint/ ; acces le 04/01/2017

[100]. Courtieu K. (2004) Etude de la reproductibilité d'un système de mesure de la cinématique mandibulaire : KAVO ARCUS Digma.Thesis

[101]. Kardari Z. (2011) Mandibular and condylar movements in children and adults– a trial on kinematic parameters and their association with individual characteristics.Thesis

[102]. Gaszner, Hollosy, Toth. Temporo Mandibular joint.www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011-0095_fogaszat_angol/ch07s02.html

[103]. Mapelli A. (2011) Temporomandibular joint in health and disease. A 3D morphofunctional analysis.Thesis

[104]. Yatabe M, Zwijnenburg A, Megens CC, Naeije M. (1997) Movements of the mandibular condyle kinematic center during jaw opening and closing. *J. Dent. Res.*, 76(2), 714–719.

[105]. Airoldi RL, Gallo LM, Palla S. (1994) Precision of the Jaw Tracking System JAWS-3D. *J. Orofac. Pain*, 8(2), 155–164.

[106]. Buschang PH, Throckmorton GS, Austin D, Wintergerst AM. (2007) Chewing cycle kinematics of subjects with deepbite malocclusion. *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthop.*, 131(5), 627–634.

[107]. Baeyens J-P, Gilomen H, Erdmann B, Clijsen R, Cabri J, Vissers D. (2013) In vivo measurement of the 3D kinematics of the temporomandibular joint using miniaturized electromagnetic trackers: technical report. *Med. Biol. Eng. Comput.*, 51(4), 479–484.

[108]. Chèze L. (2014) Biomécanique du mouvement et modélisation musculo-squelettique. *Tech. l'ingénieur*, med8050.

[109]. Westling L, Helkimo E. (1992) Maximum jaw opening capacity in adolescents in relation to general joint mobility. *J. Oral Rehabil.*, 19(5), 485–94.

[110]. Mapelli A, Garcia DM, Machado BCZ, Sidequersky F V, Giglio LD, Sforza C, et al. (2014) 3d analysis of jaw kinematics during mouth opening in healthy subjects and patients with temporomandibular disorders. In *XXIV Brazilian Congress on Biomedical Engineering – CBEB 2014*, pp.1290–1293.

[111]. Chen C-C, Lin C-C, Lu T-W, Chiang H, Chen Y-J. (2013) Feasibility of differential quantification of 3D temporomandibular kinematics during various oral activities using a cone-beam computed

tomography-based 3D fluoroscopic method. *J. Dent. Sci.*, 8(2), 151–159. Elsevier Taiwan LLC.

[112]. Wu G, Van Der Helm FCT, Veeger HEJ, Makhsous M, Van Roy P, Anglin C, et al. (2005) ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion - Part II: Shoulder, elbow, wrist and hand. *J. Biomech.*, 38(5), 981–992.

[113]. Wu G, Siegler S, Allard P, Kirtley C, Leardini A, Rosenbaum D, et al. (2002) ISB recommendation on definitions of joint coordinate system of various joints for the reporting of human joint motion—part I: ankle, hip, and spine. *J. Biomech.*, 35(4), 543–548.

[114]. Baker R. (2003) ISB recommendation on definition of joint coordinate systems for the reporting of human joint motion - Part I: Ankle, hip and spine. *J. Biomech.*, 36(2), 300–304.

[115]. Čimić S, Šimunković SK, Badel T, Dulčić N, Alajbeg I, Ćatić A. (2014) Measurements of the sagittal condylar inclination: Intraindividual variations. *Cranio - J. Craniomandib. Pract.*, 32(2), 104–109.

[116]. Coutant J-C. (2006) Détermination cinématique des déplacements de l'Articulation Temporo-Mandibulaire : étude statistique.Thesis

[117]. Kim D-S, Hwang S-J, Choi S-C, Lee S-S, Heo M-S, Heo K-H, et al. (2008) Quantitative analysis of the TMJ movement with a new mandibular movement tracking and simulation system. *Korean J. Oral Maxillofac. Radiol.*, 38, 203–208.

[118]. Leader J k., Boston J r., Debski R e., Rudy T e. (2003) Mandibular kinematics represented by a non-orthogonal floating axis joint coordinate system. *J. Biomech.*, 36(2), 275–281.

[119]. Della Croce U, Leardini A, Chiari L, Cappozzo A. (2005) Human movement analysis using stereophotogrammetry Part 4: Assessment of anatomical landmark misplacement and its effects on joint kinematics. *Gait Posture*, 21(2), 226–237.

[120]. Gallo LM, Gössi DB, Colombo V, Palla S. (2008) Relationship between kinematic center and TMJ anatomy and function. *J. Dent. Res.*, 87(8), 726–730.

[121]. Baqaien MA, Barra J, Muessig D. (2009) Computerized axiographic evaluation of the changes in sagittal condylar path inclination with dental and physical development. *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthop.*, 135(1), 88–94. American Association of Orthodontists.

[122]. Gallo LM, Airoldi GB, Airoldi RL, Palla S. (1997) Description of mandibular finite helical axis pathways in asymptomatic subjects. *J. Dent. Res.*, 76(2), 704–713.

[123]. Cid M, Coutant JC, Mesnard M, Morlier J, Ballu A. (2007) Mechanical modelling of the temporo-mandibular joint, a kinematic discrimination approach. *Comput. Methods Biomech. Biomed. Engin.*, 10(sup1), 189–190.

[124]. Mesnard M, Coutant JC, Aoun M, Morlier J, Cid M, Caix P. (2012) Relationships between geometry and kinematic characteristics in the temporomandibular joint. *Comput. Methods Biomech. Biomed. Engin.*, 15(4), 393–400.

[125]. HFDS. (2003) Anthropometry and biomechanics. 1.

[126]. Chateau H, Girard D, Degueurce C, Denoix JM. (2003) Analyse des contraintes méthodologiques liées à l'utilisation d'un système d'analyse cinématique tridimensionnelle fondé sur le principe de la triangulation ultrasonore. *Itbm-Rbm*, 24(2), 69–78.

[127]. Tang JW, Nicolle AD, Klettner CA, Pantelic J, Wang L, Suhaimi A Bin, et al. (2013) Airflow Dynamics of Human Jets: Sneezing and Breathing - Potential Sources of Infectious Aerosols. *PLoS One*, 8(4), e59970.

[128]. Hugger A, Bölöni E, Berntien U, Stüttgen U. (1999) Accuracy of an ultrasonic measurement system for jaw movement recording. In *35th Annual Meeting of the Continental European Division of the International Association for Dental Research*.

[129]. Yoon H-J, Zhao KD, Rebellato J, An K-N, Keller EE. (2006) Kinematic study of the mandible using an electromagnetic tracking device and custom dental appliance: Introducing a new technique. *J. Biomech.*, 39(12), 2325–2330.

[130]. Baltali E, Zhao KD, Koff MF, Durmuş E, An KN, Keller EE. (2008) A method for quantifying condylar motion in patients with osteoarthritis using an electromagnetic tracking device and computed tomography imaging. *J. Oral Maxillofac. Surg.*, 66(5), 848–857.

[131]. Brunato, Tran. Equilibre et symétrie du visage.http://emmanuelbrunato.com/equilibre-symetrie-visage/ ; acces le 20/05/2017

[132]. Stephan CN, Simpson EK, Byrd JE. (2013) Facial Soft Tissue Depth Statistics and Enhanced Point Estimators for Craniofacial Identification: The Debut of the Shorth and the 75-Shormax. *J. Forensic Sci.*, 58(6), 1439–1457.

[133]. Grenier B, Dubreuil M, Journois D. (2000) Comparaison de deux méthodes de mesure d'une même grandeur: méthode de Bland et Altman. *Ann. Fr. Anesth. Reanim.*, 19(2), 128–135.

[134]. Bhaskaracharya M, Memon SM, Whittle T, Murray GM. (2015) Jaw movements in patients with a history of pain: An exploratory study. *J. Oral Rehabil.*, 42(1), 18–26.

[135]. Hansdottir R, Bakke M. (2004) Joint tenderness, jaw opening, chewing velocity, and bite force in patients with temporomandibular joint pain and matched healthy control subjects. *J. Orofac. Pain*, 18(2), 108–113.

[136]. Micheau A. Anatomie du crâne : Illustrations anatomiques.https://www.imaios.com/fr/e-Anatomy/Tete-et-cou/Crane-Illustrations; acces le 10/07/2017

[137]. Theusner J, Plesh O, Curtis DA, Hutton JE. (1993) Axiographic tracings of temporomandibular joint movements. *J. Prosthet. Dent.*, 69(2), 209–215.

[138]. Peck CC, Murray GM, Johnson CWL, Klineberg IJ. (1997) The variability of condylar point pathways in open-close jaw movements. *J. Prosthet. Dent.*, 77(4), 394–404.

[139]. Sforza C, Tartaglia GM, Lovecchio N, Ugolini A, Monteverdi R, Giannì AB, et al. (2009) Mandibular movements at maximum mouth opening and EMG activity of masticatory and neck muscles in patients rehabilitated after a mandibular condyle fracture. *J. Cranio-Maxillofacial Surg.*, 37(6), 327–333. European Association for Cranio-Maxillofacial Surgery.

[140]. Chen C-CC, Lin C-CC, Chen Y-JJ, Hong SW, Lu T-WW. (2013) A method for measuring three-dimensional mandibular kinematics in vivo using single-plane fluoroscopy. *Dentomaxillofacial Radiol.*, 42(1), 95958184.

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Plans anatomiques de référence [1] 4
Figure 2 : Os temporal [2] et mandibule [3] 4
Figure 3 : Anatomie descriptive de l'articulation temporo-mandibulaire : vue sagittale [8] 5
Figure 4 : Muscles de l'appareil manducateur, vue sagittale & postérieure [8], vue inférieure [3] 6
Figure 5 : Numérotation des dents adultes[12] 7
Figure 6 : Classes d'occlusion : aspect théorique[13] 7
Figure 7 : Classes d'occlusion : aspect pratique, photographies prises sur les sujets lors de notre protocole d'essai 8
Figure 8 : Les positions du condyle dans la fosse [19] 8
Figure 9 : Luxation condylo-discale, d'après [29] 10
Figure 10 : Diagramme de Posselt et description des mouvements limites [71] 16
Figure 11 : Principe de l'axiographie [20] : tracé des trajectoires condyliennes lors de mouvements mandibulaires 17
Figure 12 : Comparaison hommes/femmes pour les valeurs moyennes d'amplitudes maximales d'ouverture de la bouche : résultats de différentes études avec leur nombre de sujets entre parenthèses (H=hommes et F=femmes) 20
Figure 13 : Fonctionnement de l'ATM lors de l'ouverture de la bouche [99] 24
Figure 14 : Mouvement latéral vers la gauche de la mandibule : faible translation arrière et externe et rotation du condyle gauche (condyle travaillant) autour d'un axe vertical et déplacement vers le bas, l'avant et la gauche du condyle droit (condyle non travaillant) [102] 25
Figure 15 : Mouvement de propulsion, vue sagittale. Images issues du logiciel WinJaw. Faible rotation mandibulaire pour effectuer une légère ouverture puis translation vers le bas et l'avant du complexe disque-mandibule 26
Figure 16 : Plans du crâne et point tragus 29
Figure 17 : Dispositif CMS-20-JMA (Jaw-Motion-Analysis) pour l'analyse cinématique de la mandibule. A) Mise en place des unités réceptrice et émettrice sur le sujet. B) Positionnement de l'attache dentaire sur les dents mandibulaires par collage de l'empreinte dentaire en silicone (en bleu). L'empreinte dentaire est réalisée en bouche fermée et ne doit pas gêner les contacts dentaires entre les mâchoires supérieure et inférieure. 36
Figure 18 : A) Enregistrement des coordonnées tridimensionnelles des points anatomiques à l'aide du dispositif CMS-20-JMA muni du pointeur. B) Quatre emplacements possibles du pointeur sur l'unité émettrice du système JMA. 37
Figure 19 : Dispositif de référence pour l'évaluation de la précision du dispositif CMS20-JMA de Zebris Medical. Les valeurs de translation ou de rotation calculées à partir des données du dispositif sont comparées à celles imposées à l'aide de la table micrométrique ou de la platine goniométrique. 38
Figure 20 : Positionnement du ventilateur pour l'étude de la respiration sur le dispositif de référence 40
Figure 21 : Evolution de la distance moyenne (sur les trois essais de chaque configuration) du centre du repère de l'unité émettrice entre l'instant considéré et l'instant initial de l'acquisition, en fonction du temps d'enregistrement pour différentes configurations de souffle étudiées et vitesses associées. Configuration C : contre la propagation des ultrasons; Configuration D : dans la direction de propagation des ultrasons; Configuration P : perpendiculairement à la direction de propagation des ultrasons 41
Figure 22 : Sphère englobant l'ensemble des points (en noir) issus des acquisitions de mouvements de rotation de l'unité émettrice. Calcul du centre de la sphère (en rouge) : $O_{sphère}$ 43
Figure 23 : Visualisation des angles de rotation calculés à partir du produit scalaire des positions linéaires successives de l'origine du repère mobiles (points noirs) 43
Figure 24 : Précision du dispositif CMS20-JMA lorsqu'on éloigne les deux unités du dispositif, dans la direction de propagation des ultrasons (translation longitudinale Ty). Visualisation des écarts (moyenne ± 1 écart-type) entre les déplacements fournis par le système CMS20-JMA et les translations imposées avec le

dispositif de référence pour trois mesures successives. Quatre incréments ΔY sont imposés (1mm, 2mm, 5mm et 10mm) à différentes positions du volume de mesure le long de l'axe de translation, en éloignant les unités (« aller ») puis en les approchant de nouveau (« retour »). 45
Figure 25 : Précision du dispositif CMS20-JMA lorsqu'on éloigne les deux unités du dispositif, perpendiculairement à la direction de propagation des ultrasons (translation transversale Tz). Visualisation des écarts (moyenne ± 1 écart-type) entre les déplacements fournis par le système CMS20-JMA et les translations imposées avec le dispositif de référence pour trois mesures successives. Quatre incréments ΔZ sont imposés (1mm, 2mm, 5mm et 10mm) à différentes positions du volume de mesure le long de l'axe de translation, en décalant les unités (« aller ») puis en les réalignant de nouveau (« retour »). 46
Figure 26 : Précision du dispositif CMS20-JMA lorsque l'on effectue une rotation de l'UE autour de l'axe transversal (Rotation Z) et de l'axe inféro-supérieur (Rotation X). Visualisation des écarts (moyenne ± 1 écart-type) entre les angles calculés à partir des données fournies par le système CMS20-JMA et les rotations imposées avec le dispositif de référence pour trois mesures successives. Quatre incréments ΔR sont imposés (1°, 2°, 5° et 10°) à différentes positions du volume de mesure autour de l'axe de rotation, dans deux sens différents (aller et retour) 48
Figure 27 : Protocole de mesure de répétabilité sur le mannequin calibré, 2 opérateurs effectuent sur 3 jours différents un certain nombre d'essais composés d'un nombre de pointage des points sur le mannequin. L'étude des 2 opérateurs permet de quantifier la reproductibilité inter-opérateur, sur le jour 14 nous quantifions la reproductibilité intra-opérateur sur un temps court et enfin pour l'ensemble des essais nous calculons la reproductibilité intra-opérateur sur un temps long. 50
Figure 28 : Cinq « points anatomiques » sélectionnés sur la tête en polystyrène : ExtD et ExtG représentent les points extrêmes droit et gauche, OrbiteD représente la position d'un point sous orbital droit, Nez représente le point sous nasal et Bouche représente un point situé entre les « lèvres » du mannequin… 51
Figure 29 : Répétabilité du pointage par opérateur et par point. Les points sont ici répartis comme leur localisation sur le mannequin de droite à gauche 52
Figure 30 : Points anatomiques de la mandibule utilisés pour le calcul de la répétabilité de l'identification de points sur 41 sujets, (figure vierge d'après [131]) 55
Figure 31 : Répétabilité du pointage par sujet..... 56
Figure 32 : Répartition des écarts de pointage en fonction des points anatomiques 57
Figure 33 : Répartition des écarts de pointage par point pour le pointage avec empreinte 59
Figure 34 : Etude par point de la variabilité de chaque pointage (en rouge avec l'empreinte, en bleu sans l'empreinte), valeur moyenne plus ou moins 1 écart-type et valeurs extrêmes..... 60
Figure 35 : Répartition par point anatomique de la distance entre le point barycentre obtenu lors d'un pointage sans empreinte dentaire et celui obtenu avec empreinte dentaire 61
Figure 36 : Points de l'étude, points du crâne en rouge et points de la mandibule en vert ; TG et TD points tragus gauche et droit, SoD point sous-orbital droit, SN point sous nasal, IPmx point interincisif maxillaire, PCD et PCG points condyliens droit et gauche, M point mentolabial sulcus (figure vierge d'après [131])..... 65
Figure 37 : Repère Crâne : points caractéristiques et axes ; TD et TG : points tragi supérieurs droit et gauche, SoD : point sous orbital droit, SN : point sous nasal, IPmx : point interincisif maxillaire (figure vierge d'après [131]) 66
Figure 38: Repère mandibule Rm : points caractéristiques et axes ; PCD et PCG points condyliens droit et gauche, M : point mentolabial sulcus, (figure vierge d'après [131])..... 68
Figure 39 : Variabilité du positionnement de l'origine du repère mandibule exprimée comme la distance autour d'un point barycentre pour 1000 points numériquement simulés par la méthode de Monte-Carlo : résultats pour 41 sujets 69
Figure 40 : Variabilité d'orientation de l'axe X du repère mandibule exprimé comme l'angle entre l'axe créé à partir des barycentres et les 1000 axes simulés numériquement par la méthode de Monte-Carlo : résultats pour 41 sujets 70

Figure 41 : Variabilité d'orientation de l'axe Y du repère mandibule exprimé comme l'angle entre l'axe créé à partir des barycentres et les 1000 axes simulés numériquement par la méthode de Monte-Carlo : résultats pour 41 sujets 71
Figure 42 : Variabilité d'orientation de l'axe Z du repère mandibule exprimé comme l'angle entre l'axe créé à partir des barycentres et les 1000 axes simulés numériquement par la méthode de Monte-Carlo : résultats pour 41 sujets 72
Figure 43 : Visualisation des amplitudes maximales (en rouge) de chaque mouvement, calculées à partir des valeurs maximales (en valeur absolue) des coordonnées du point interincisif mandibulaire (IP) ; MMO= maximal mouth opening, MMP= maximal mouth propulsion, MMLr= maximal mouth lateral movement to the right et MMLl= maximal mouth lateral movement to the left 74
Figure 44 : a) Séquence d'axes utilisée pour l'étude du mouvement et décomposition de la rotation : b) première rotation (β) autour de l'axe Yc ; c) deuxième rotation (α) autour d'un axe X' d'une base flottante (X', Yc, Z') issu de la première rotation autour de Yc ; d) troisième rotation (γ) autour de l'axe Zm 77
Figure 45 : Visualisation des mobilités de la mandibule par rapport au repère crâne ; Tr P-A= translation postéro-antérieure ; Tr I-S= translation inféro-supérieure ; Tr G-D= translation gauche droite ; R°= rotation ... 79
Figure 46 : Taille curviligne mandibulaire (en bleu) passant par les points caractéristiques de la mandibule (en rouge) : PCD&PCG (points condyliens droit et gauche), ApG (angle mandibulaire postérieur gauche), AiG (angle mandibulaire inférieur gauche), smD&smG (points de l'extrémité du sillon mentonnier à droite et à gauche), Pte (pointe du menton) (figure vierge d'après [131]) 81
Figure 47 : Volume mandibulaire à partir des données de pointage (en rouge) : visualisation de la triangularisation permettant le calcul du volume mandibulaire à partir de ces points pointés 82
Figure 48 : Réalisation du mouvement d'ouverture maximale, photo issue de notre protocole..... 83
Figure 49 : Réalisation des mouvements latéraux, photos issues de notre protocole 83
Figure 50 : Réalisation des mouvements de propulsion, photo issue de notre protocole 84
Figure 51 : Superposition des répétitions valides (courbes en couleur), moyenne et corridors (en rouge) des mobilités mandibulaires dans le cas du mouvement d'ouverture maximale du sujet XXIII 85
Figure 52 : Vitesses de réalisation des mouvements de la bouche en $mm.s^{-1}$ (vitesse de déplacement du point interincisif mandibulaire) et répartition des valeurs dans le groupe asymptomatique 94
Figure 53 : Trajectoires des points condyliens (PCD et PCG) dans le plan sagittal lors du mouvement d'ouverture et lors du mouvement de propulsion pour l'ensemble des sujets asymptomatiques 96
Figure 54 : Trajectoires des points condyliens (PCD et PCG) dans le plan sagittal lors des mouvements latéraux pour l'ensemble des sujets asymptomatiques..... 97
Figure 55 : Coupe sagittale de l'articulation temporo-mandibulaire. Le condyle longe la fosse mandibulaire pour les différents mouvements avant de passer sous le tubercule articulaire, pour le mouvement d'ouverture, d'après [136] 98
Figure 56 : Trajectoires des points condyliens droit (PCD) et gauche (PCG) dans les trois plans anatomiques lors du mouvement d'ouverture maximale pour le sujet-type du groupe asymptomatique (XVI)..... 99
Figure 57 : Trajectoires des points condyliens droit (PCD) et gauche (PCG) dans les trois plans anatomiques lors du mouvement de propulsion pour le sujet-type (XVI) du groupe asymptomatique 100
Figure 58 : Symétrie des condyles opposés pendant les mouvements latéraux, exemple pour le sujet XVI. A) pour les condyles travaillants (PCD lors du mouvement latéral à droite et PCG lors du mouvement latéral à gauche). B) pour les condyles non travaillants (PCD lors du mouvement latéral à gauche et PCG lors du mouvement latéral à droite) 101
Figure 59 : Visualisation des trajectoires des points condyliens droit (PCD) et gauche (PCG) (en mm) dans les trois plans anatomiques pour l'ensemble des mouvements du sujet type (XVI)..... 102
Figure 60 : Trajectoires des condyles (en rouge PCD et en bleu PCG) pour le mouvement d'ouverture dans le plan sagittal pour chaque sujet 104
Figure 61 : Mobilités mandibulaires lors du mouvement d'ouverture maximale pour l'ensemble des sujets asymptomatiques. Superposition des sujets pour chaque phase du mouvement (de 0 à 100% de l'ouverture et 0 à 100% de la fermeture) 108

Figure 62 : Mobilités en ouverture pour le groupe asymptomatique, visualisation des corridors représentant la valeur moyenne ±1 écart-type (gris foncé) ou ±2 écart-types (gris clair) issus de l'étude des 29 sujets de référence 110
Figure 63 : Comparaison des valeurs moyennes et corridors (à± 1 écart-type) des mobilités entre 18 hommes (en bleu) et 11 femmes (en rouge) pour la réalisation du mouvement d'ouverture 112
Figure 64 : Mobilités mandibulaires lors du mouvement de propulsion pour l'ensemble des sujets asymptomatiques. Superposition des sujets par normalisation des résultats pour chaque phase du mouvement (de 0 à 100% de l'ouverture, de 0 à 100% de la phase de mouvement « aller » vers l'avant, de 0 à 100% de la phase de retour en arrière et de 0 à 100% de la fermeture) 115
Figure 65 : Mobilités en propulsion pour le groupe asymptomatique, visualisation, par pourcentage de phase de mouvement, les corridors représentant la valeur moyenne ±1 écart-type (gris foncé) ou ±2 écart-types (gris clair) issus de l'étude des sujets respectant les consignes données pour la réalisation des mouvements soit 17 sujets pour les phases ouverture & aller et 23 sujets pour les phases retour & fermeture 117
Figure 66 : Comparaison des valeurs moyennes et corridors (à± 1 écart-type) des mobilités lors du mouvement de propulsion. Visualisation par phase de mouvement pour les sujets respectant les consignes soient 5 femmes (en rouge) & 12 hommes (en bleu) en ouverture-aller et 7 femmes & 16 hommes en retour-fermeture. 119
Figure 67 : Mobilités mandibulaires lors du mouvement latéral à droite pour l'ensemble des sujets asymptomatiques. Superposition des sujets par normalisation des résultats pour chaque phase du mouvement (de 0 à 100% de l'ouverture, de 0 à 100% de l'aller vers le côté, de 0 à 100% de la phase de retour et de 0 à 100% de la fermeture) 122
Figure 68 : Mobilités mandibulaires lors du mouvement latéral à gauche pour l'ensemble des sujets asymptomatiques. Superposition des sujets par normalisation des résultats pour chaque phase du mouvement (de 0 à 100% de l'ouverture, de 0 à 100% de l'aller vers le côté, de 0 à 100% de la phase de retour et de 0 à 100% de la fermeture) 123
Figure 69 : Superposition des valeurs absolues des mobilités mandibulaires des mouvements latéraux à droite (violet) et à gauche (vert), pour les sujets respectant les consignes données pour la réalisation des mouvements soient, pour les phases ouverture & aller 20 sujets en latéralité droite et 21 sujets en latéralité gauche et, pour les phases retour & fermeture 16 sujets en latéralité droite & 20 sujets en latéralité gauche. 125
Figure 70 : Comparaison des valeurs moyennes et corridors (à± 1 écart-type) des mobilités lors du mouvement latéral à droite. Visualisation par phase de mouvement pour les sujets respectant les consignes soient 6 femmes (en rouge) & 14 hommes (en bleu) en ouverture-aller et 6 femmes & 10 hommes en retour-fermeture 127
Figure 71 : Comparaison des valeurs moyennes et corridors (à± 1 écart-type) des mobilités lors du mouvement latéral à gauche. Visualisation par phase de mouvement pour les sujets respectant les consignes soient 6 femmes (en rouge) & 15 hommes (en bleu) en ouverture-aller et 7 femmes & 13 hommes en retour-fermeture 128
Figure 72 : Amplitudes maximales de mouvement : déplacement maximal du point IP. Valeurs moyenne ±1 écart-type et valeurs extrêmes en rouge pour le groupe de référence, et valeurs de chacun des 5 sujets à dysfonctions 133
Figure 73 : Vitesses de réalisation des mouvements pour chaque groupe : vitesse du point IP (valeurs moyenne ±1 écart-type et valeurs extrêmes) 134
Figure 74 : Comparaison des 6 mobilités pendant le mouvement d'ouverture des cinq premiers sujets avec dysfonctions mineures (courbes colorées) par rapport aux corridors issus de l'étude du groupe de référence (courbe moyenne en noir et corridors gris foncé pour 1écart-type et gris clair pour 2écart-types) 136
Figure 75 : Comparaison des 6 mobilités pendant le mouvement de propulsion des cinq premiers sujets avec dysfonctions mineures (courbes colorées) par rapport aux corridors issus de l'étude du groupe de

référence (courbe moyenne en noir et corridors gris foncé pour 1écart-type et gris clair pour 2écart-types) 137
Figure 76 : Comparaison des 6 mobilités pendant le mouvement latéral vers la droite des cinq premiers sujets avec dysfonctions mineures (courbes colorées) par rapport aux corridors issus de l'étude du groupe de référence (courbe moyenne en noir et corridors gris foncé pour 1écart-type et gris clair pour 2écart-types) 138
Figure 77 : Comparaison des 6 mobilités pendant le mouvement latéral vers la gauche des cinq premiers sujets avec dysfonctions mineures (courbes colorées) par rapport aux corridors issus de l'étude du groupe de référence (courbe moyenne en noir et corridors gris foncé pour 1écart-type et gris clair pour 2écart-types) 139
Figure 78 : Comparaison des 6 mobilités pendant le mouvement d'ouverture des sujets avec bruits articulaires (courbes colorées) à gauche (en trait plein) et à droite (en pointillés) par rapport aux corridors issus de l'étude du groupe de référence (courbe moyenne en noir et corridors gris foncé pour 1écart-type et gris clair pour 2écart-types) 144
Figure 79 : Comparaison des 6 mobilités pendant le mouvement de propulsion des sujets avec bruits articulaires (courbes colorées) à gauche (en trait plein) et à droite (en pointillés) par rapport aux corridors issus de l'étude du groupe de référence (courbe moyenne en noir et corridors gris foncé pour 1écart-type et gris clair pour 2écart-types) 146
Figure 80 : Comparaison des 6 mobilités pendant le mouvement latéral à droite des sujets avec bruits articulaires (courbes colorées) à gauche (en trait plein) et à droite (en pointillés) par rapport aux corridors issus de l'étude du groupe de référence (courbe moyenne en noir et corridors gris foncé pour 1écart-type et gris clair pour 2écart-types) 148
Figure 81 : Comparaison des 6 mobilités pendant le mouvement latéral à gauche des sujets avec bruits articulaires (courbes colorées) à gauche (en trait plein) et à droite (en pointillés) par rapport aux corridors issus de l'étude du groupe de référence (courbe moyenne en noir et corridors gris foncé pour 1écart-type et gris clair pour 2écart-types) 149

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Classification des DAM selon l'AAOP 9
Tableau 2 : Etudes d'amplitudes : référence, pays des mesures, population asymptomatique étudiée, mouvement étudié et amplitude maximales (moyenne ±1écart-type) 14
Tableau 3 : Récapitulatif des études cinématiques sur sujets asymptomatiques 18
Tableau 4 : Comparaison entre sujets asymptomatiques (=asympt) et sujets avec dysfonction (=dysf). Etude bibliographique 22
Tableau 5 : Création des repères anatomiques : étude bibliographique 31
Tableau 6 : Précision moyenne et intervalles de confiance du système CMS-20-JMA pour la mesure des mobilités en translation longitudinale (Ty) et latérale (Tz) et en rotation intercondylienne (Rz) et inclinaison (Rx). 49
Tableau 7 : Questionnaire pour la détection des dysfonctions et score associé 80
Tableau 8 : Données générales et anthropométriques des 29 sujets asymptomatiques 89
Tableau 9 : Valeurs de p pour le test de corrélation de Spearman (n=29, α=0.05) entre les différentes grandeurs morphologiques quantitatives sur les 29 sujets asymptomatiques ; valeur en rouge significative ; NS= non significatif 90
Tableau 10 : Etude ANOVA (n=29, α=0.05) sur les variables non continues pour les 29 sujets asymptomatiques, résultat du paramètre p ; NS=non significatif 90
Tableau 11 : Valeurs moyennes et écart-types (moy ± sd) calculés à partir de l'étude des 29 sujets de référence pour les amplitudes de mouvements (en mm) : valeurs maximales suivant la direction principale de chaque mouvement et normes maximales du point interincisif mandibulaire (IP) ; Comparaison avec les résultats majeurs de la littérature 92
Tableau 12 : Corrélation entre les paramètres morphologiques et les amplitudes maximales en ouverture (MMO), en propulsion (MMP), en latéralité à droite (MMLr) et à gauche (MMLl) (test de corrélation de Spearman pour âge et volume ; étude ANOVA pour occlusion et main dominante). Résultat du paramètre p, n=29 et α=0.05 ; NS=non significatif 93
Tableau 13 : Etude des coefficients de corrélations de Spearman entre les vitesses des différents mouvements sur les 29 sujets asymptomatiques. Résultats de p (α=0.05) 95
Tableau 14 : Valeurs des mobilités à la fin de la phase d'ouverture et à la fin de la phase de latéralité pour les deux mouvements latéraux, valeurs moyennes et écart-types issues de l'étude des sujets respectant les consignes 124
Tableau 15 : Caractéristiques des sujets à dysfonctions (G=gauche, D=droite) 132
Tableau 16 : Etude de corrélation de Spearman entre les grandeurs morphologiques ; Résultats du paramètre p. NS= non significatif 132
Tableau 17 : Récapitulatif de l'étude cinématique des cinq premiers sujets à dysfonctions. En rouge : valeurs inférieures aux résultats asymptomatiques et en bleu valeurs supérieures aux résultats asymptomatiques. Pour le groupe asymptomatique : rappel des valeurs moyennes±1 écart-type 141
Tableau 18 : Amplitudes de mouvements (mm) et vitesse de mouvement ($mm.s^{-1}$) : sujets à dysfonctions avec bruits articulaires et comparaison au groupe asymptomatique (Asympt). Valeur en rouge : limitation, valeur en bleu : exagération en comparaison des valeurs asymptomatiques. MMO=amplitude maximale lors de l'ouverture selon la direction inféro-supérieure ; MMP= amplitude maximale lors de la propulsion selon la direction postéro-antérieure ; MML= amplitude maximale lors des mouvements de latéralité à droite (MMLr) et à gauche (MMLl) selon la direction transversale 143
Tableau 19 : Récapitulatif de l'étude des sujets avec bruits articulaires. Amplitudes (Ampl) et Vitesse (Vit) : +/- = amplitude et vitesse avec valeur supérieure/inférieure aux valeurs asymptomatiques, description des mobilités 152

Tableau 20 : test de Mann-Whitney entre les sujets asymptomatiques et les sujets souffrant de bruits articulaires sur les valeurs des mobilités au point maximal du mouvement : résultat de p. NS=non significatif ; BrG= sujets avec bruits à gauche ; BrD= sujets avec bruits à droite ; asympt= sujets asymptomatiques..... 153

ANNEXES :

Annexe 1 : Amplitudes maximales de mouvement

Résultats de MMO, MMP, MMLr, MMLl et normes maximales de l'ensemble des sujets asymptomatiques pour l'ensemble des mouvements élémentaires étudiés

Annexe 2 : Trajectoires condyliennes

Superposition des trajectoires du condyle droit et du condyle gauche dans les différents plans anatomiques pour l'ensemble des mouvements élémentaires étudiés

Annexe 3 : Mobilités mandibulaires – Etude de la main dominante

Comparaison droitiers/gauchers pour l'ensemble des mouvements élémentaires étudiés

Annexe 4 : Mobilités mandibulaires – Etude de la classe d'occlusion

Comparaison des différentes classes d'occlusion pour l'ensemble des mouvements élémentaires étudiés

Annexe 1 :

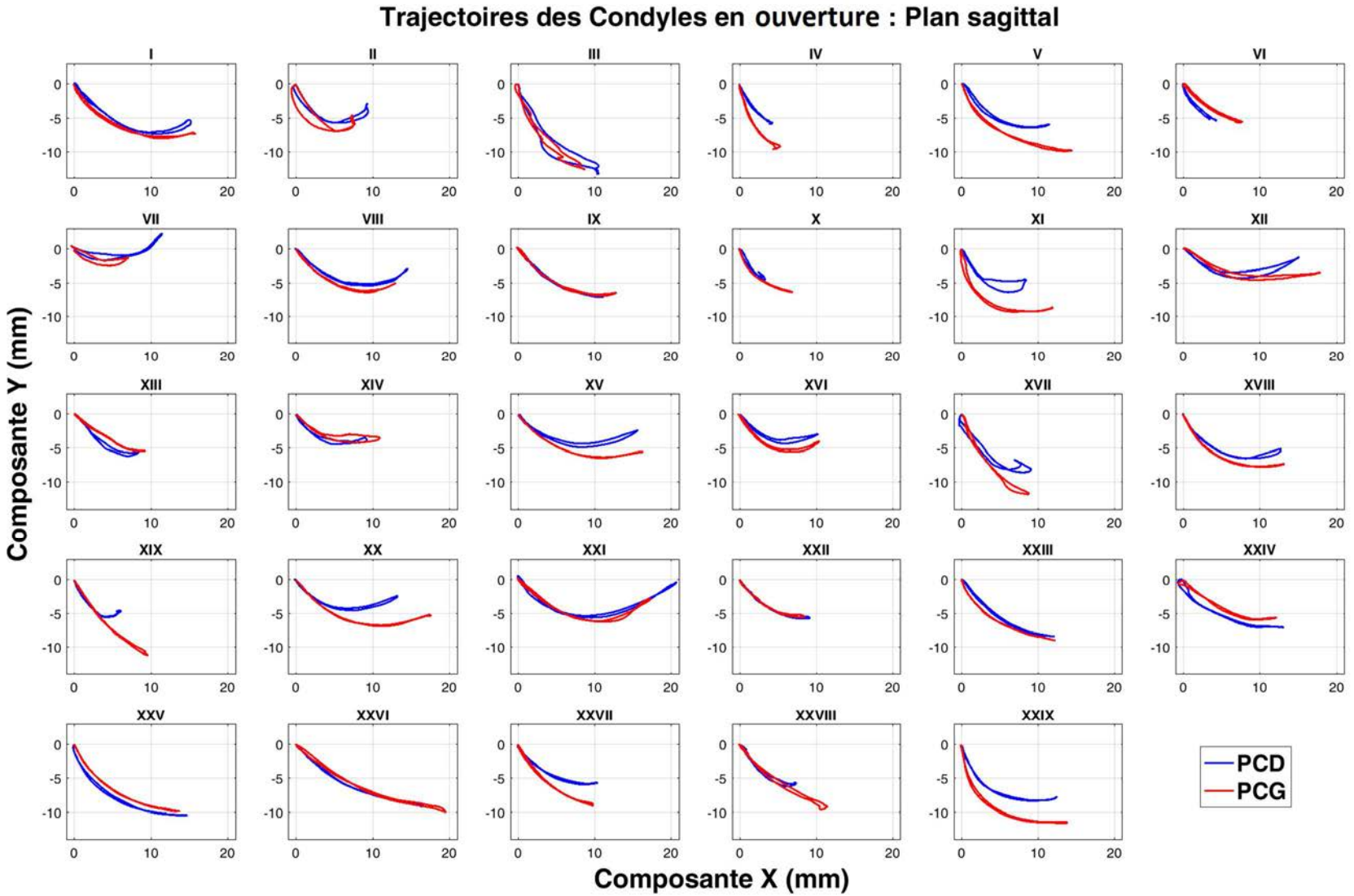
Amplitudes maximales de mouvement

Amplitudes de mouvements (en mm) pour les 29 sujets de référence et quantification des valeurs caractéristiques (moyenne, minimal, maximal, écart-type) dans les directions principales de chaque mouvement (étude 2D) et des normes (étude 3D) du point interincisif mandibulaire (IP) pour chaque mouvement étudié

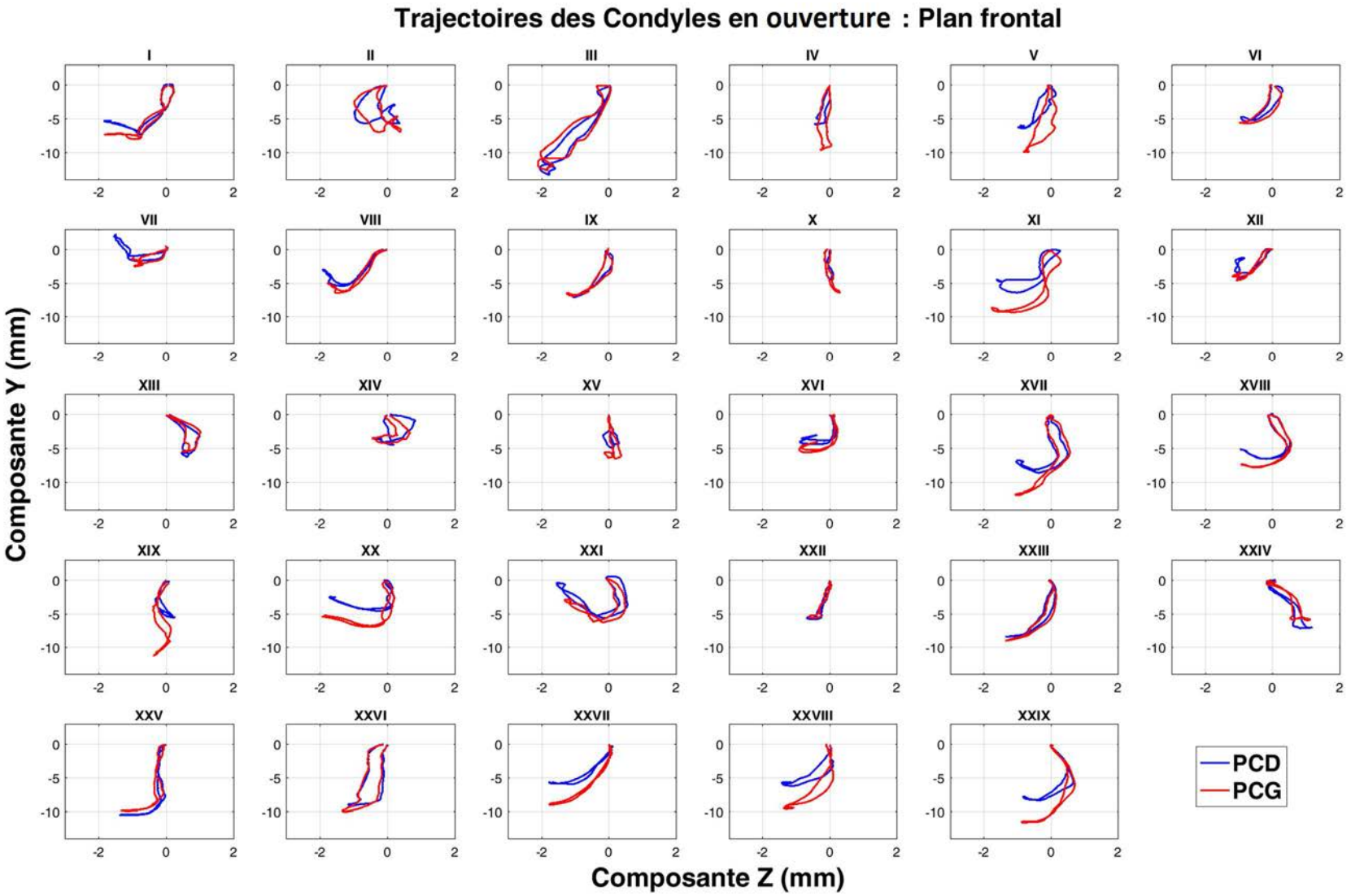
(mm)	OUVERTURE		LATERAL A DROITE		LATERAL A GAUCHE		PROPULSION	
SUJETS	**IP Y (MMO)**	**Norme**	**IP Z (MMLr)**	**Norme**	**IP Z (MMLl)**	**Norme**	**IP X (MMP)**	**Norme**
I	47.50	63.27	8.82	9.69	9.67	11.34	8.19	8.88
II	44.61	55.48	8.16	9.34	9.40	11.42	8.25	8.40
III	43.60	51.50	9.58	12.44	8.68	10.36	9.08	11.91
IV	32.51	41.96	8.10	9.40	7.60	9.25	5.24	8.32
V	46.03	56.47	14.17	15.99	13.02	14.91	9.44	11.28
VI	39.93	47.89	11.46	12.81	11.68	13.69	9.16	10.40
VII	31.41	42.32	9.18	13.46	9.20	11.03	3.33	7.48
VIII	39.47	50.14	10.17	13.25	10.36	13.98	7.48	8.67
IX	37.42	45.70	9.49	10.41	10.76	12.19	7.94	9.46
X	35.79	41.93	8.44	9.53	13.82	15.43	10.09	10.36
XI	38.76	49.00	13.12	14.87	7.85	10.45	6.86	11.24
XII	42.04	49.02	12.69	15.85	10.41	13.15	7.30	10.63
XIII	29.18	35.61	9.35	11.59	10.04	12.06	5.68	8.08
XIV	32.23	40.77	10.78	14.37	10.42	12.57	6.15	8.22
XV	30.91	40.30	7.02	10.24	9.25	10.92	8.59	10.59
XVI	37.27	41.51	8.52	9.48	8.41	9.98	7.21	7.63
XVII	45.40	54.88	12.96	15.01	14.75	17.62	9.53	12.14
XVIII	39.47	48.40	7.51	8.85	11.18	12.49	6.56	8.31
XIX	36.75	49.98	12.67	14.78	10.18	10.89	8.52	9.09
XX	38.50	52.53	12.75	15.54	12.23	14.89	8.70	13.03
XXI	49.11	60.33	13.22	15.66	8.69	11.06	8.51	9.29
XXII	47.07	54.24	12.80	14.82	9.86	11.60	8.36	10.41
XXIII	42.56	49.56	10.54	11.98	10.37	13.46	10.44	10.86
XXIV	44.62	55.85	9.77	14.11	7.92	9.73	5.79	8.63
XXV	42.04	51.27	11.46	12.53	9.87	12.01	10.22	12.32
XXVI	46.91	60.54	15.28	20.28	13.86	18.17	12.84	15.19
XXVII	33.13	45.74	8.39	10.29	8.85	10.62	6.78	8.50
XXVIII	32.98	50.49	11.34	13.03	9.08	11.66	6.72	9.49
XXIX	36.92	48.70	11.56	13.01	9.80	12.79	5.95	7.52
MIN	29.2	35.6	7.0	8.9	7.6	9.2	3.3	7.5
MAX	49.1	63.3	15.3	20.3	14.7	18.2	12.8	15.2
MOY	39.5	49.5	10.7	12.8	10.2	12.4	7.9	9.9
STD	5.7	6.7	2.2	2.7	1.8	2.2	1.9	1.9

Annexe 2 : Trajectoires condyliennes

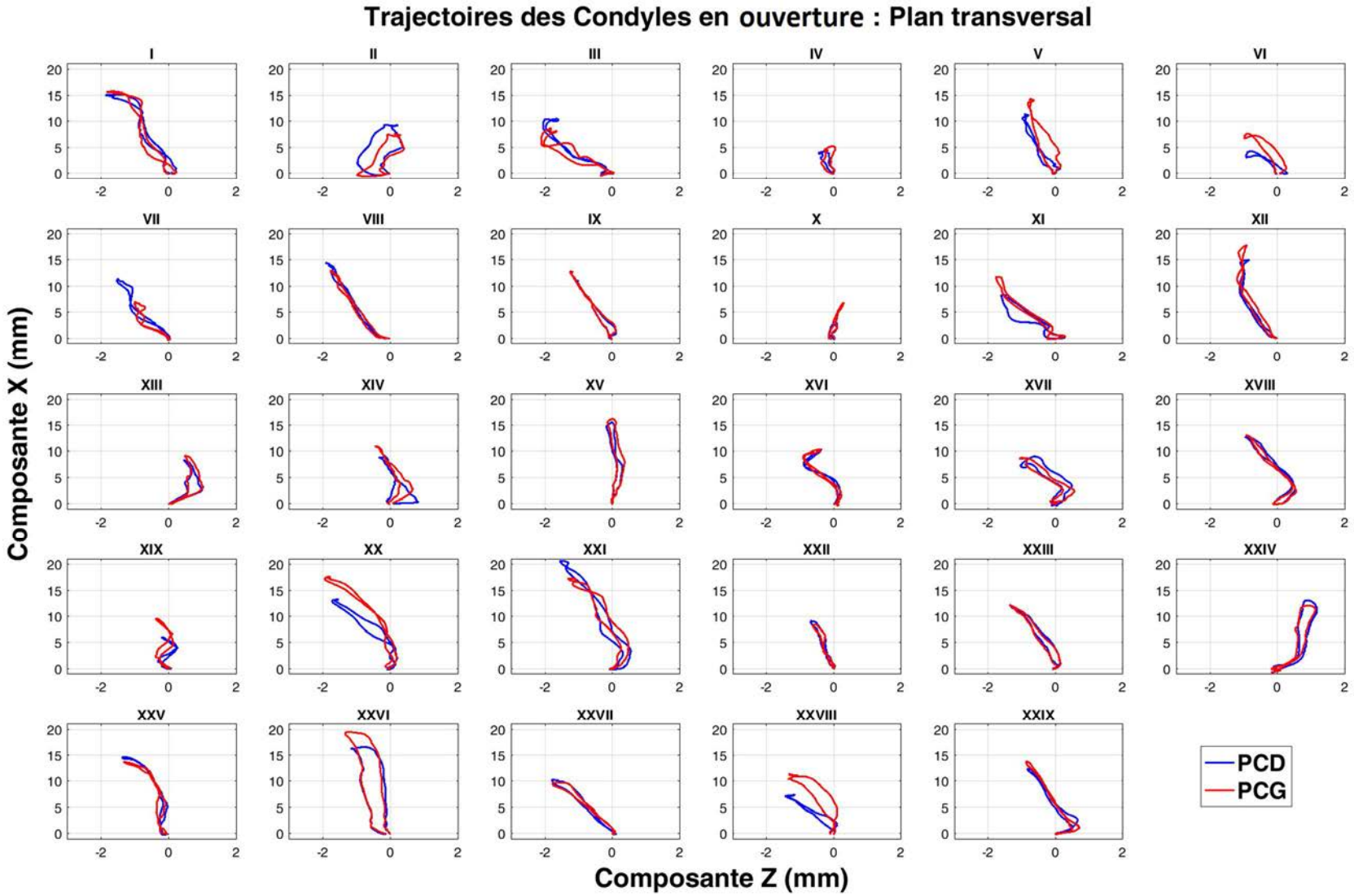
Superposition des trajectoires du condyle droit (PCD) et du condyle gauche (PCG) dans les différents plans anatomiques (sagittal, frontal et transversal) pour tous les sujets asymptomatiques (I à XXIX) durant l'ensemble des mouvements élémentaires étudiés (ouverture, propulsion et latéralité droite et gauche)



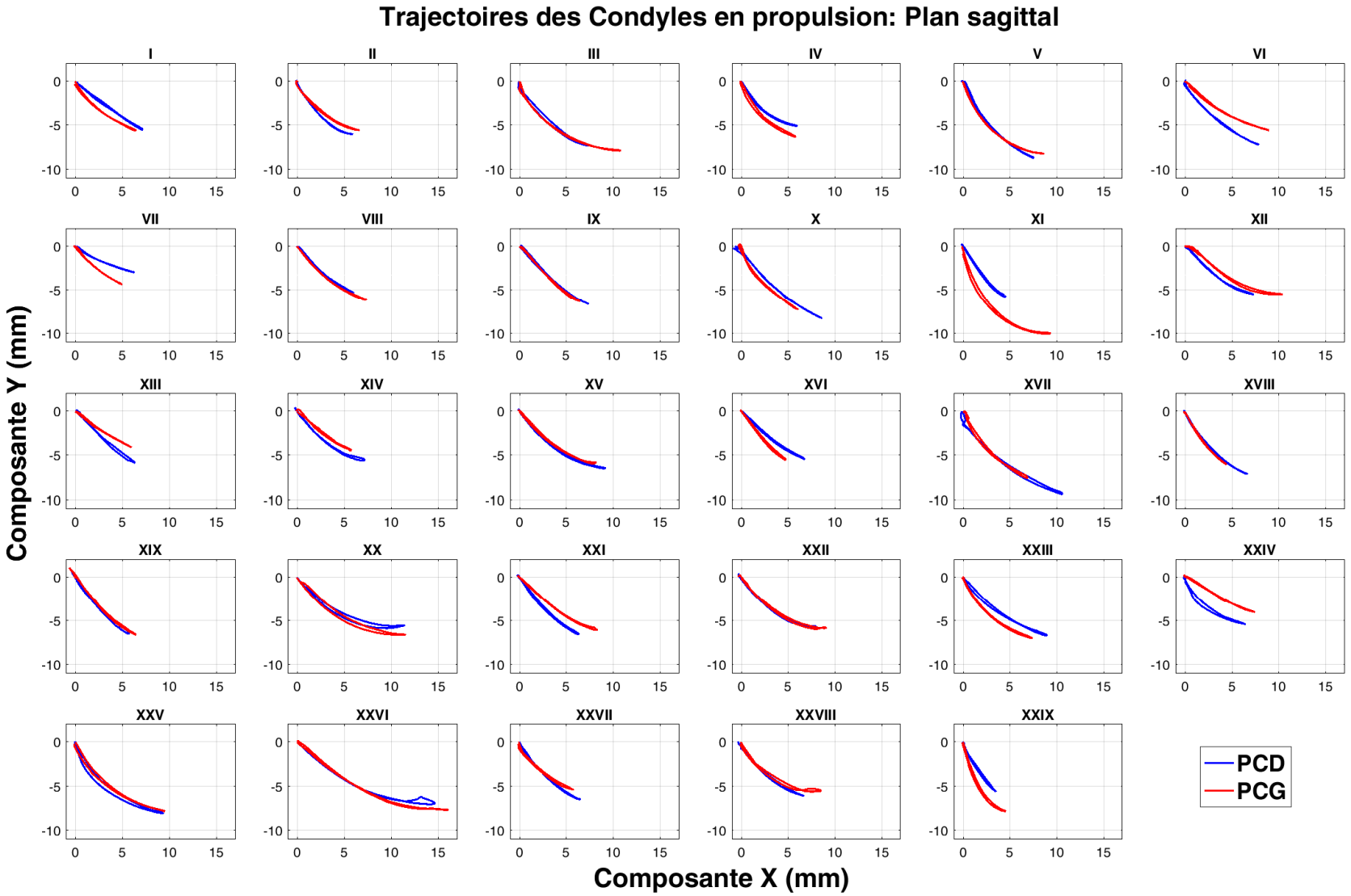
Comparaison des trajectoires du condyle gauche (PCG) avec les trajectoires du condyle droit (PCD) dans le plan sagittal lors du mouvement d'ouverture pour l'ensemble des sujets asymptomatiques



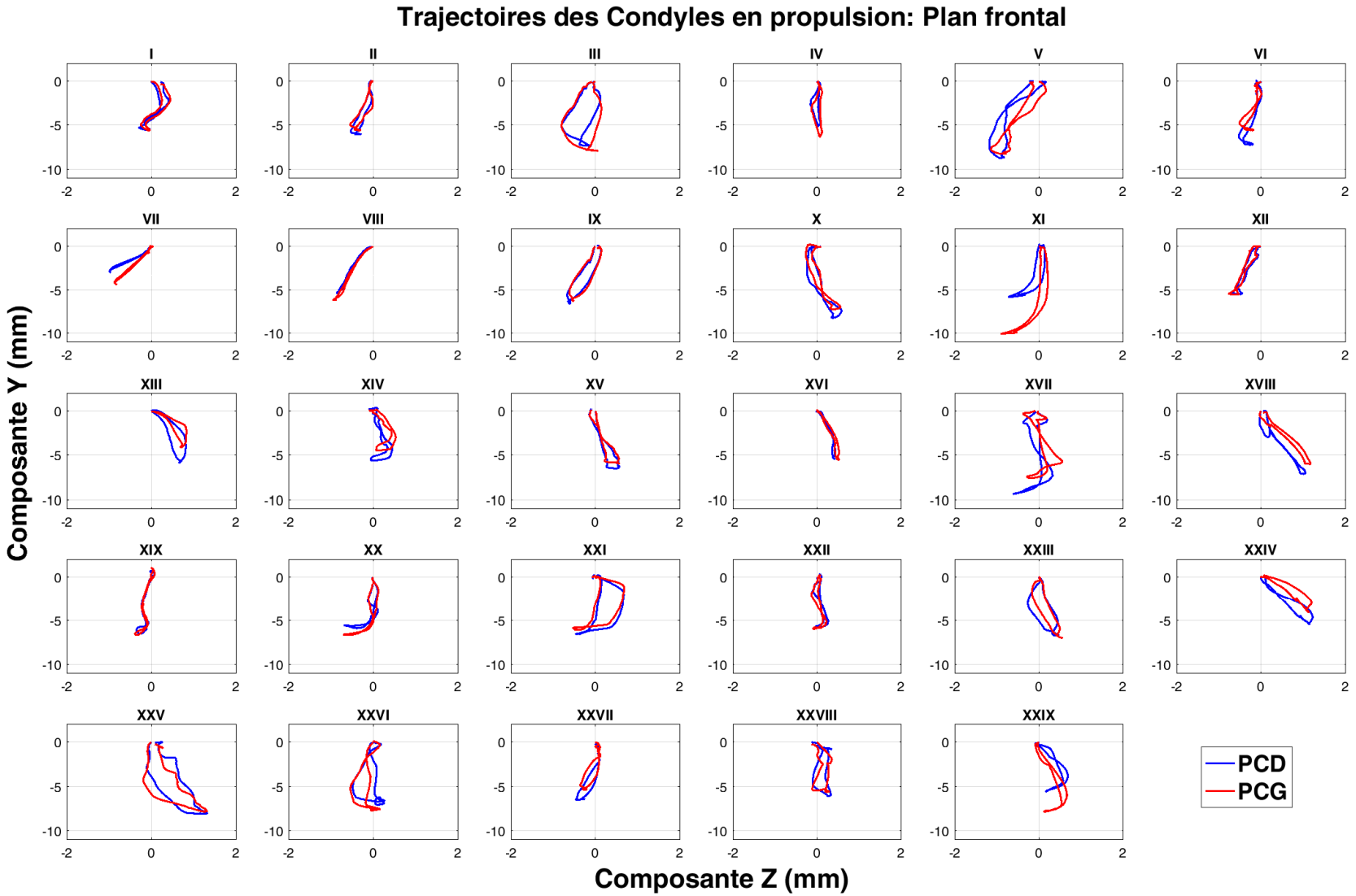
Comparaison des trajectoires du condyle gauche (PCG) avec les trajectoires du condyle droit (PCD) dans le plan frontal lors du mouvement d'ouverture pour l'ensemble des sujets asymptomatiques



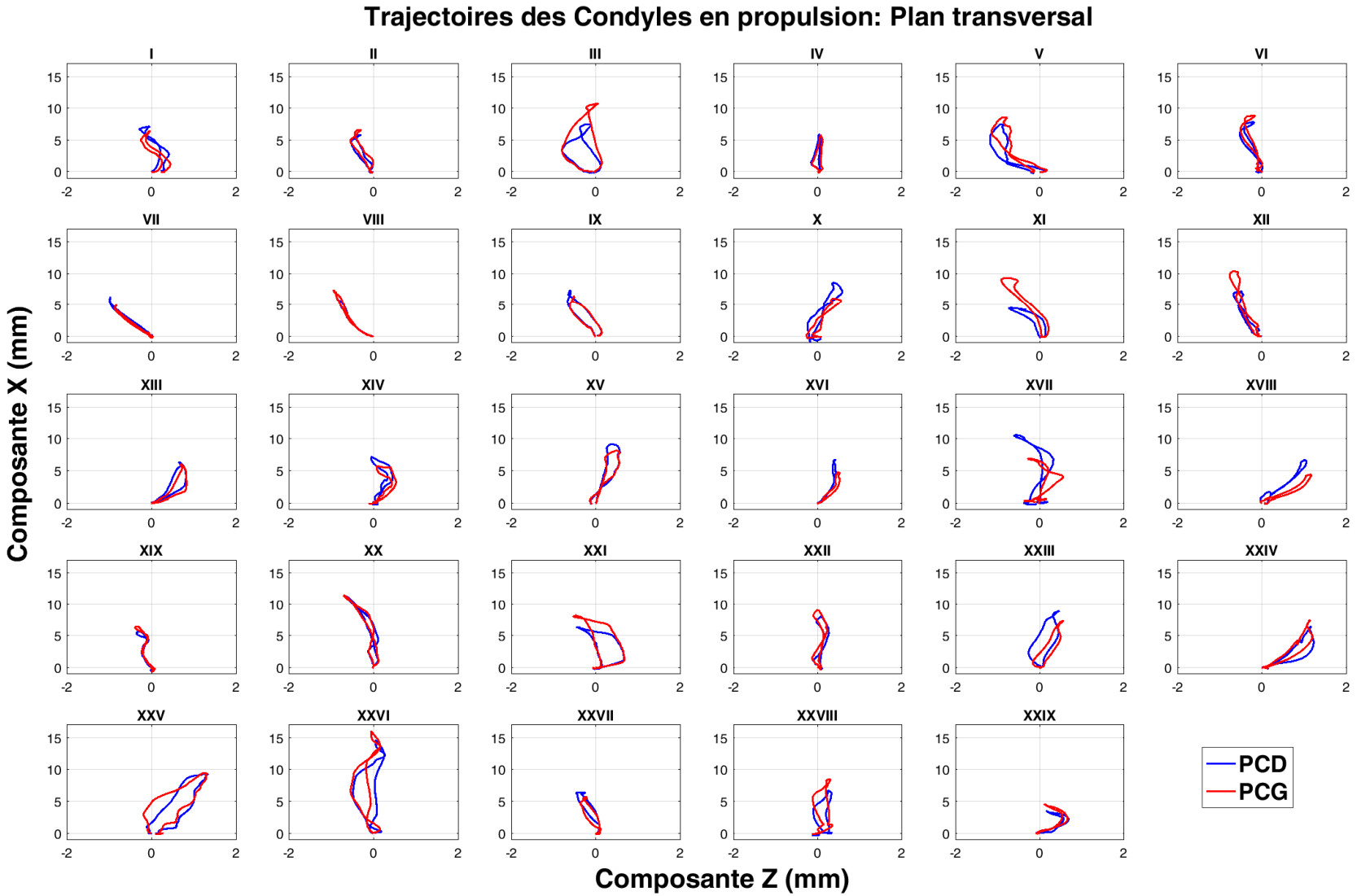
Comparaison des trajectoires du condyle gauche (PCG) avec les trajectoires du condyle droit (PCD) dans le plan transversal lors du mouvement d'ouverture pour l'ensemble des sujets asymptomatiques



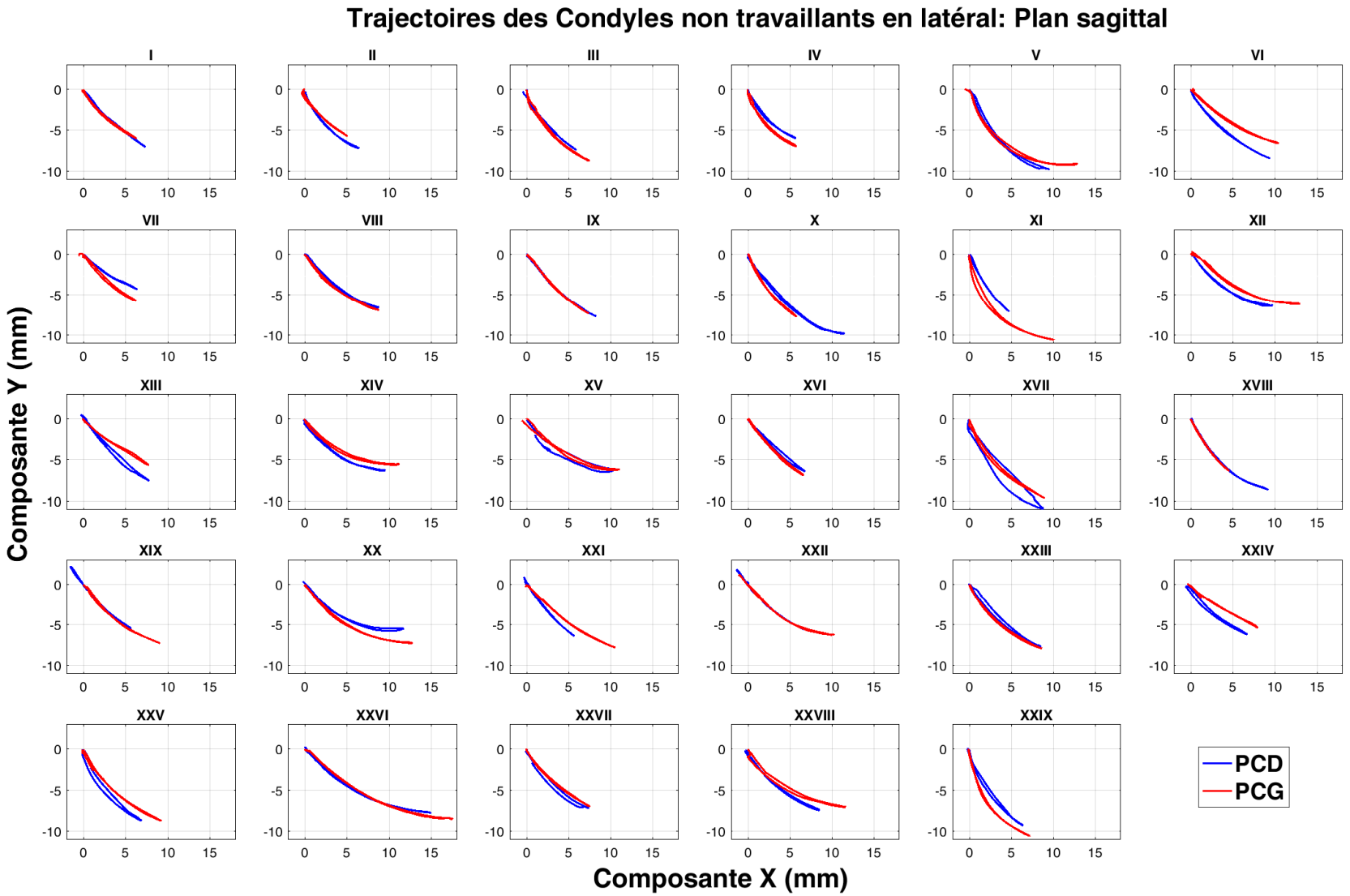
Comparaison des trajectoires du condyle gauche (PCG) avec les trajectoires du condyle droit (PCD) dans le plan sagittal lors du mouvement de propulsion pour l'ensemble des sujets asymptomatiques



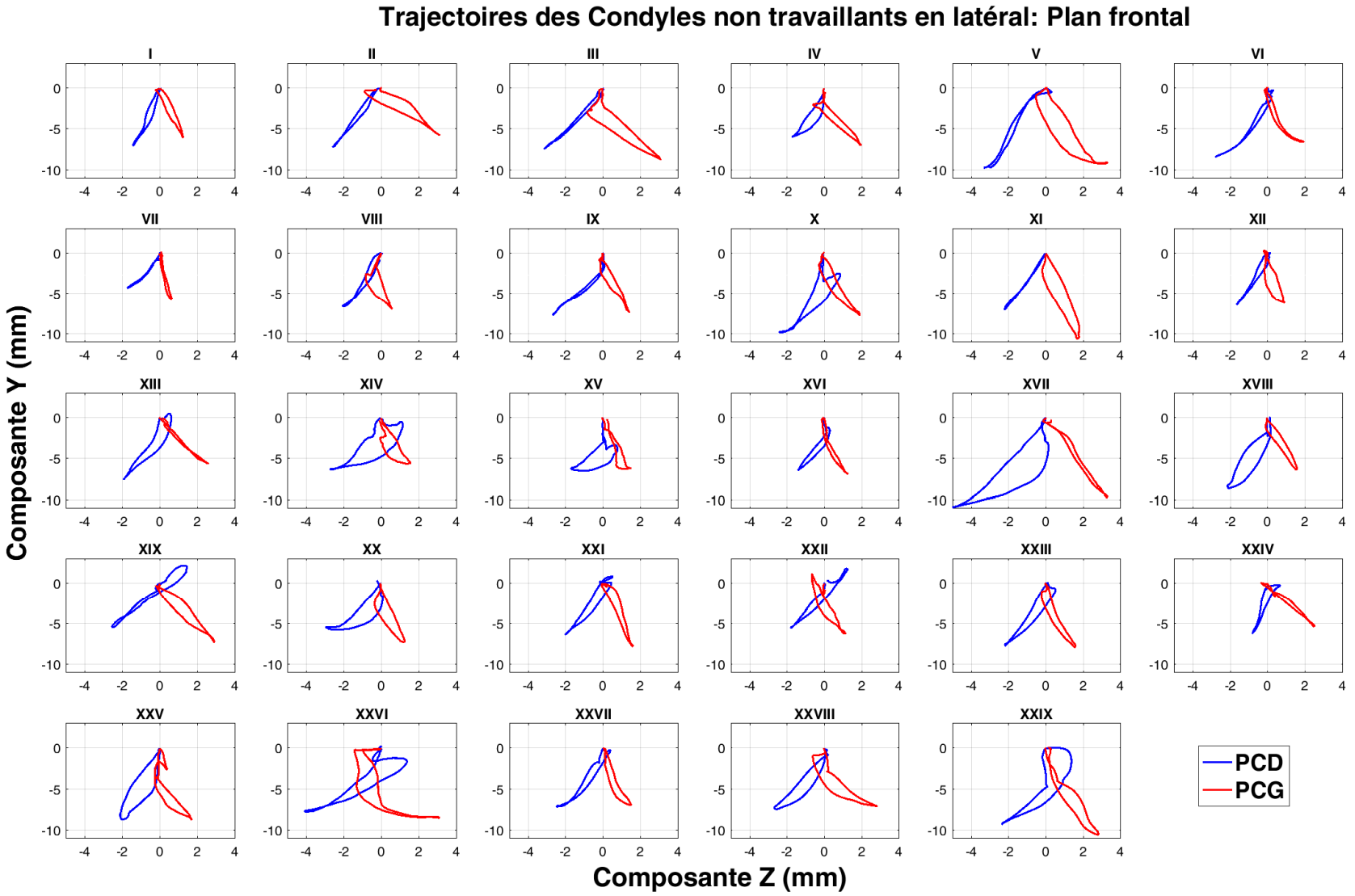
Comparaison des trajectoires du condyle gauche (PCG) avec les trajectoires du condyle droit (PCD) dans le plan frontal lors du mouvement de propulsion pour l'ensemble des sujets asymptomatiques



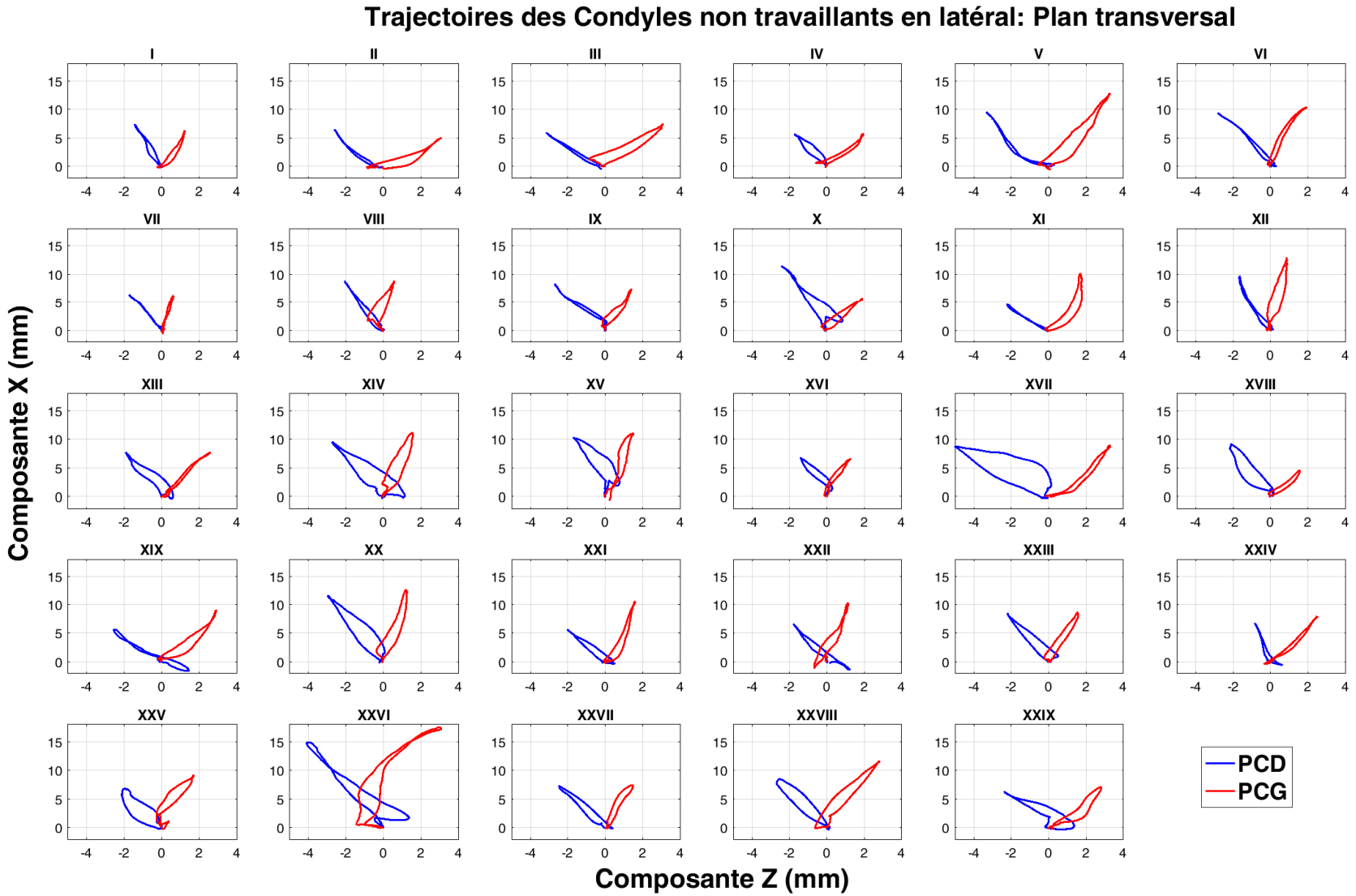
Comparaison des trajectoires du condyle gauche (PCG) avec les trajectoires du condyle droit (PCD) dans le plan transversal lors du mouvement de propulsion pour l'ensemble des sujets asymptomatiques



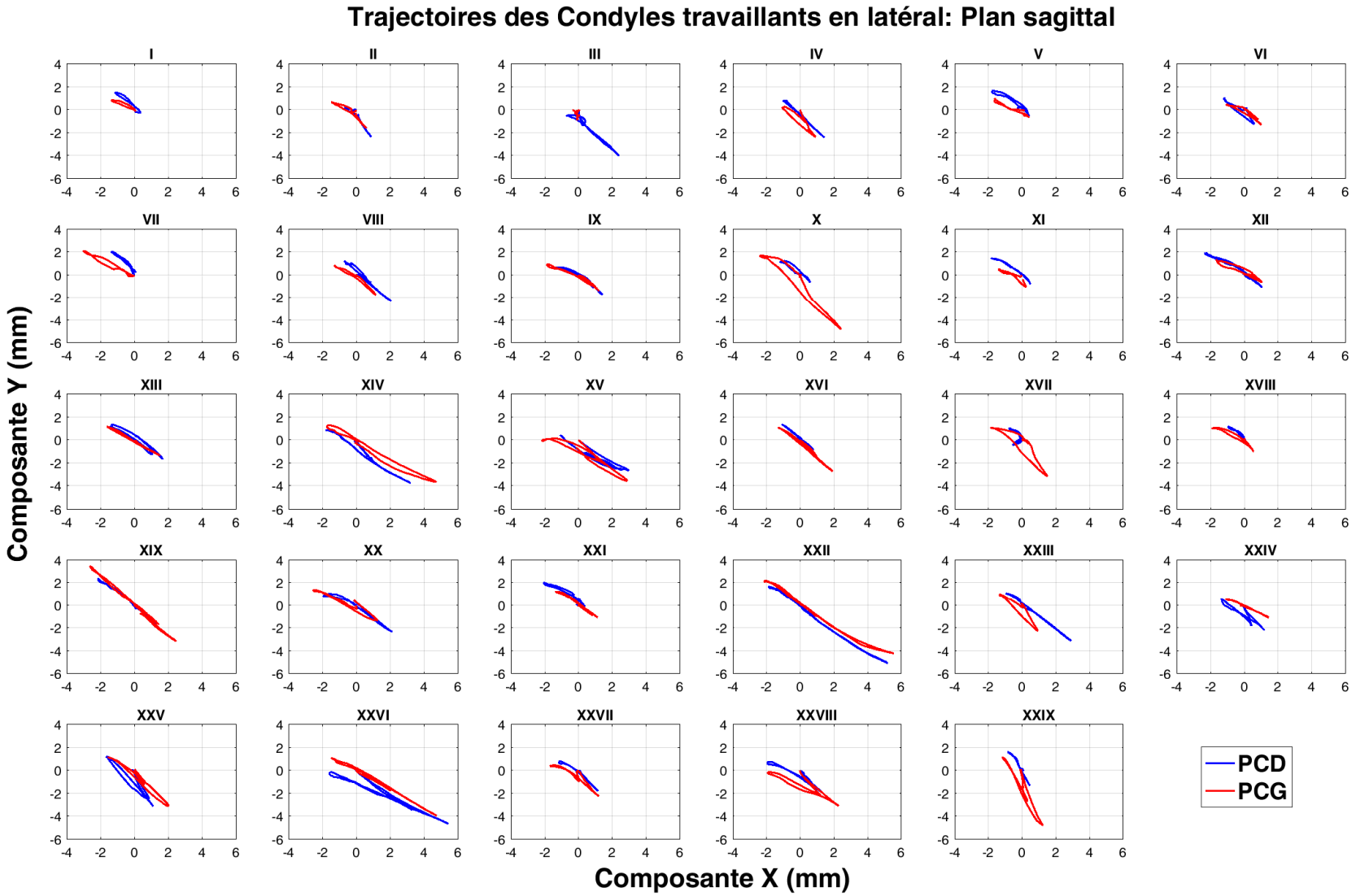
Comparaison des trajectoires du condyle gauche (PCG) lors du mouvement latéral à droite avec les trajectoires du condyle droit (PCD) lors du mouvement latéral à gauche dans le plan sagittal pour l'ensemble des sujets asymptomatiques



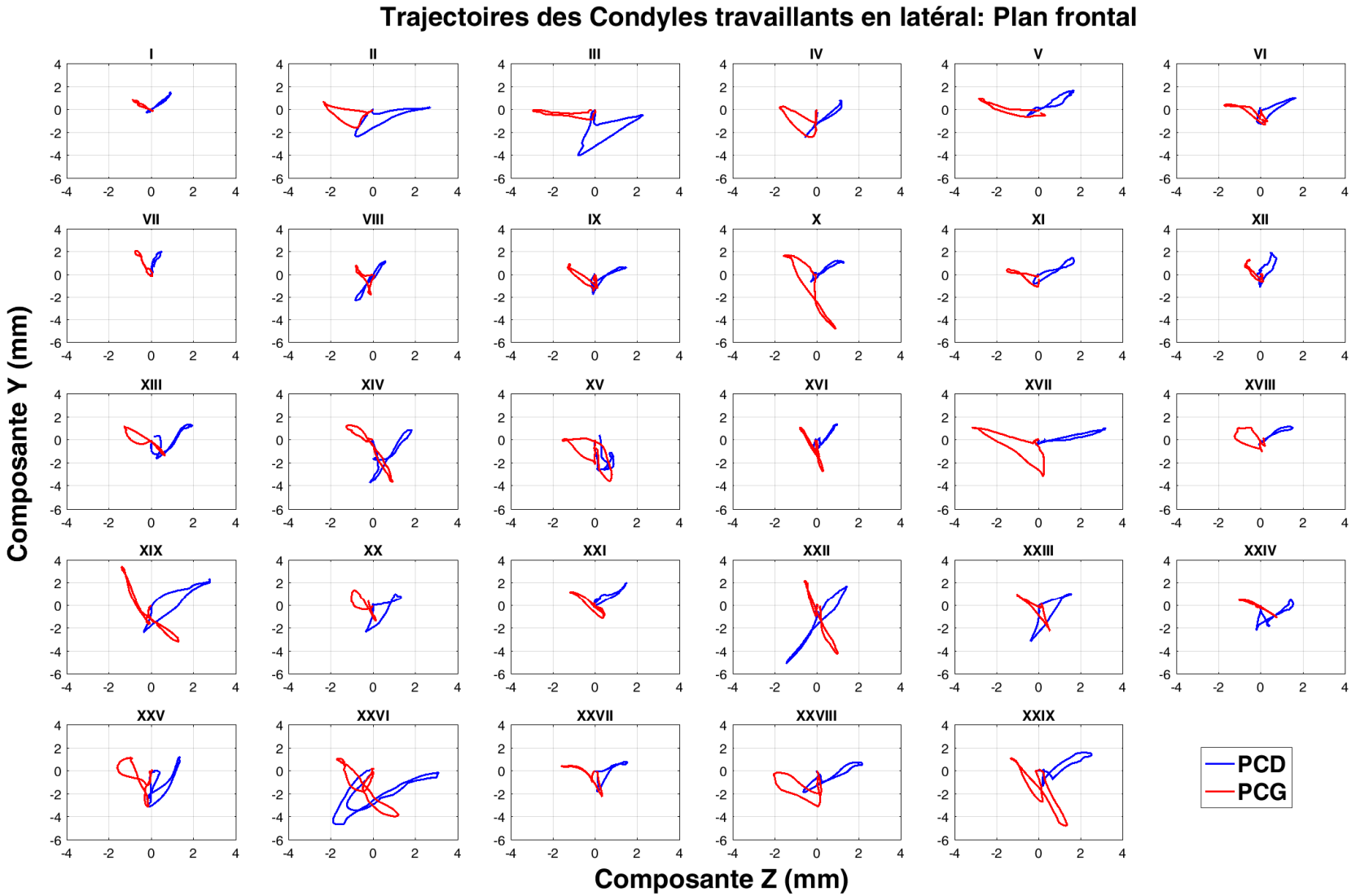
Comparaison des trajectoires du condyle gauche (PCG) lors du mouvement latéral à droite avec les trajectoires du condyle droit (PCD) lors du mouvement latéral à gauche dans le plan frontal pour l'ensemble des sujets asymptomatiques



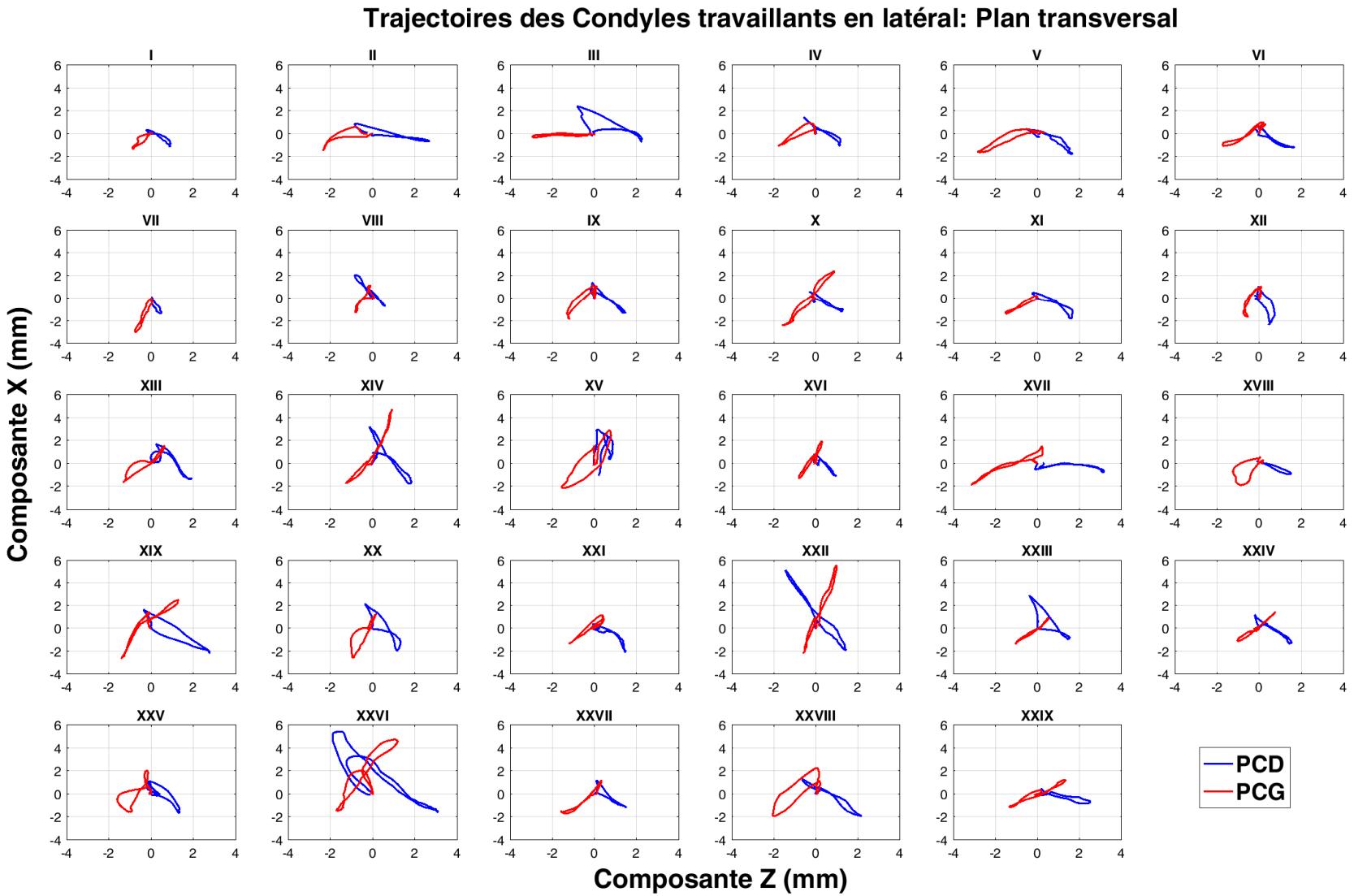
Comparaison des trajectoires du condyle gauche (PCG) lors du mouvement latéral à droite avec les trajectoires du condyle droit (PCD) lors du mouvement latéral à gauche dans le plan transversal pour l'ensemble des sujets asymptomatiques



Comparaison des trajectoires du condyle gauche (PCG) lors du mouvement latéral à gauche avec les trajectoires du condyle droit (PCD) lors du mouvement latéral à droite dans le plan sagittal pour l'ensemble des sujets asymptomatiques



Comparaison des trajectoires du condyle gauche (PCG) lors du mouvement latéral à gauche avec les trajectoires du condyle droit (PCD) lors du mouvement latéral à droite dans le plan frontal pour l'ensemble des sujets asymptomatiques

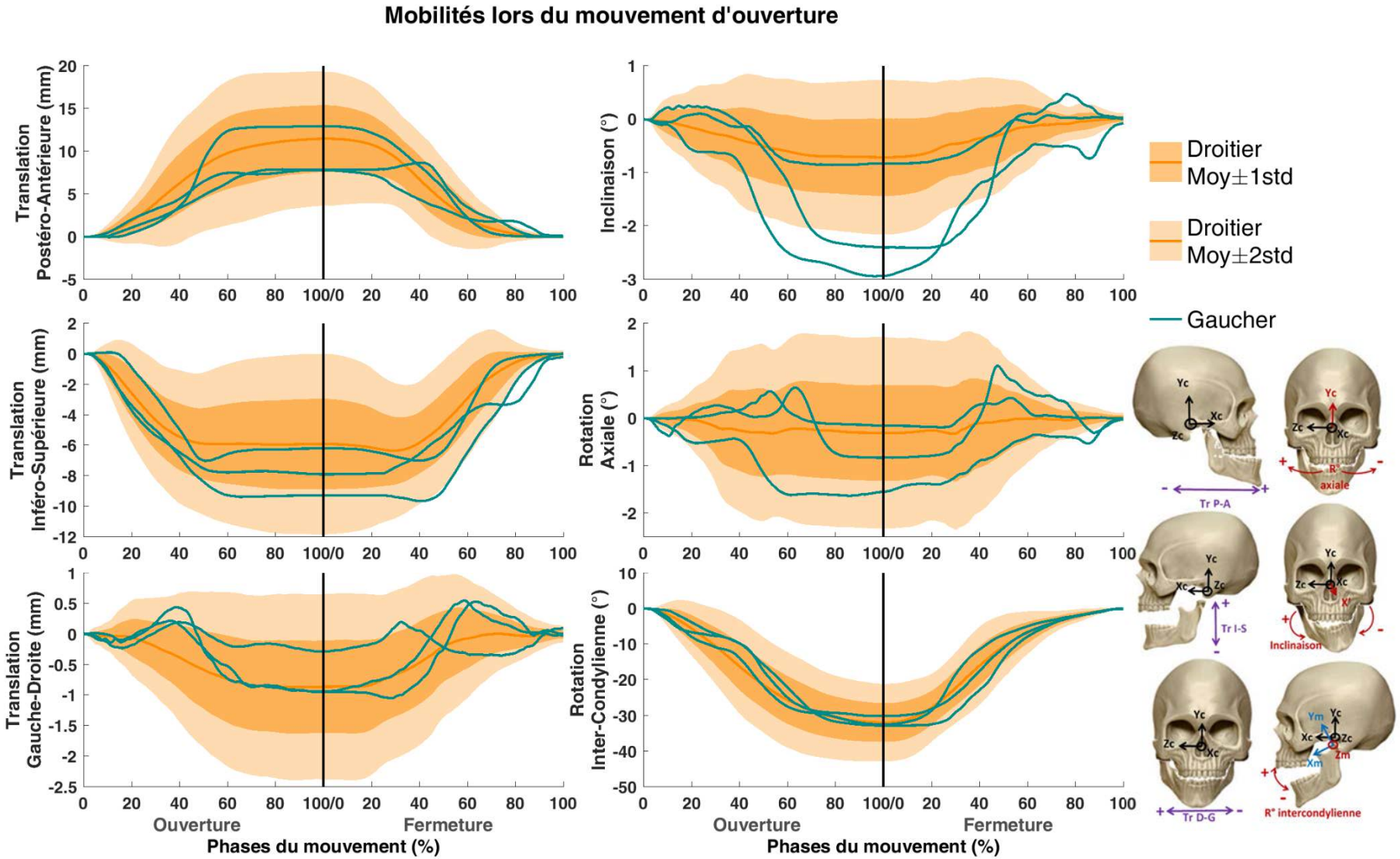


Comparaison des trajectoires du condyle gauche (PCG) lors du mouvement latéral à gauche avec les trajectoires du condyle droit (PCD) lors du mouvement latéral à droite dans le plan transversal pour l'ensemble des sujets asymptomatiques

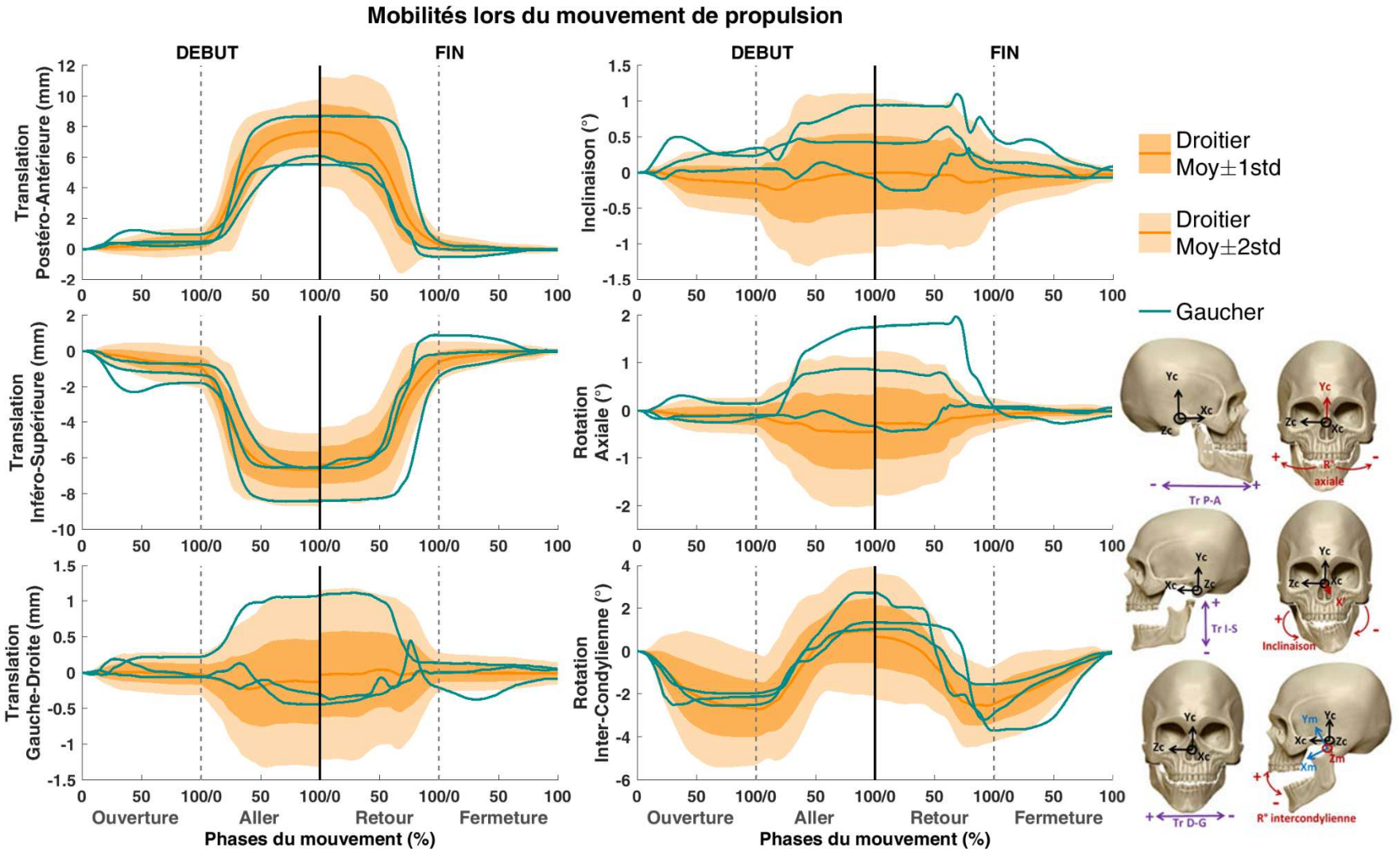
Annexe 3 :

Mobilités mandibulaires – Etude de la main dominante

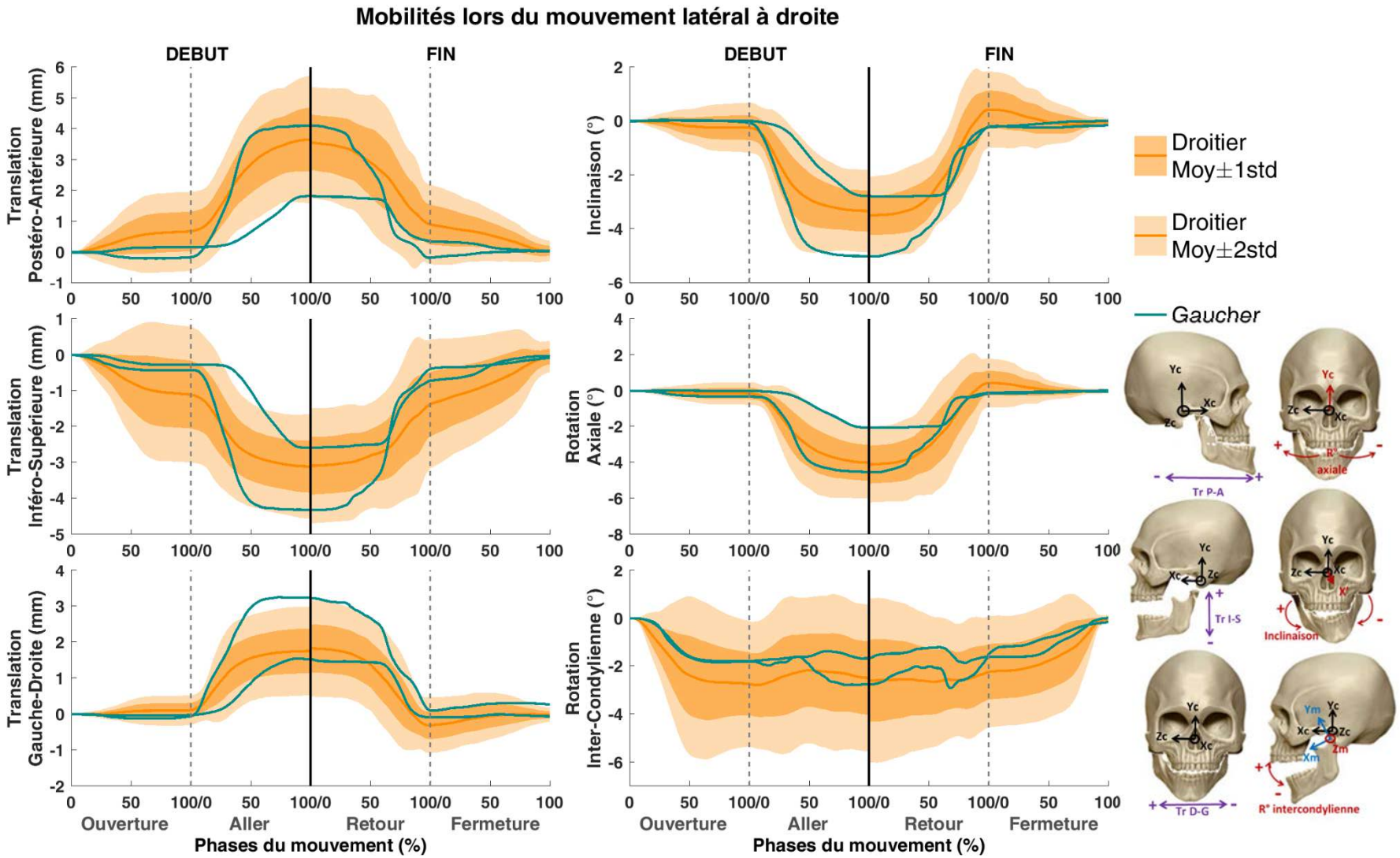
Comparaison des sujets asymptomatiques droitiers avec les sujets asymptomatiques gauchers respectant les consignes, pour les différents mouvements élémentaires



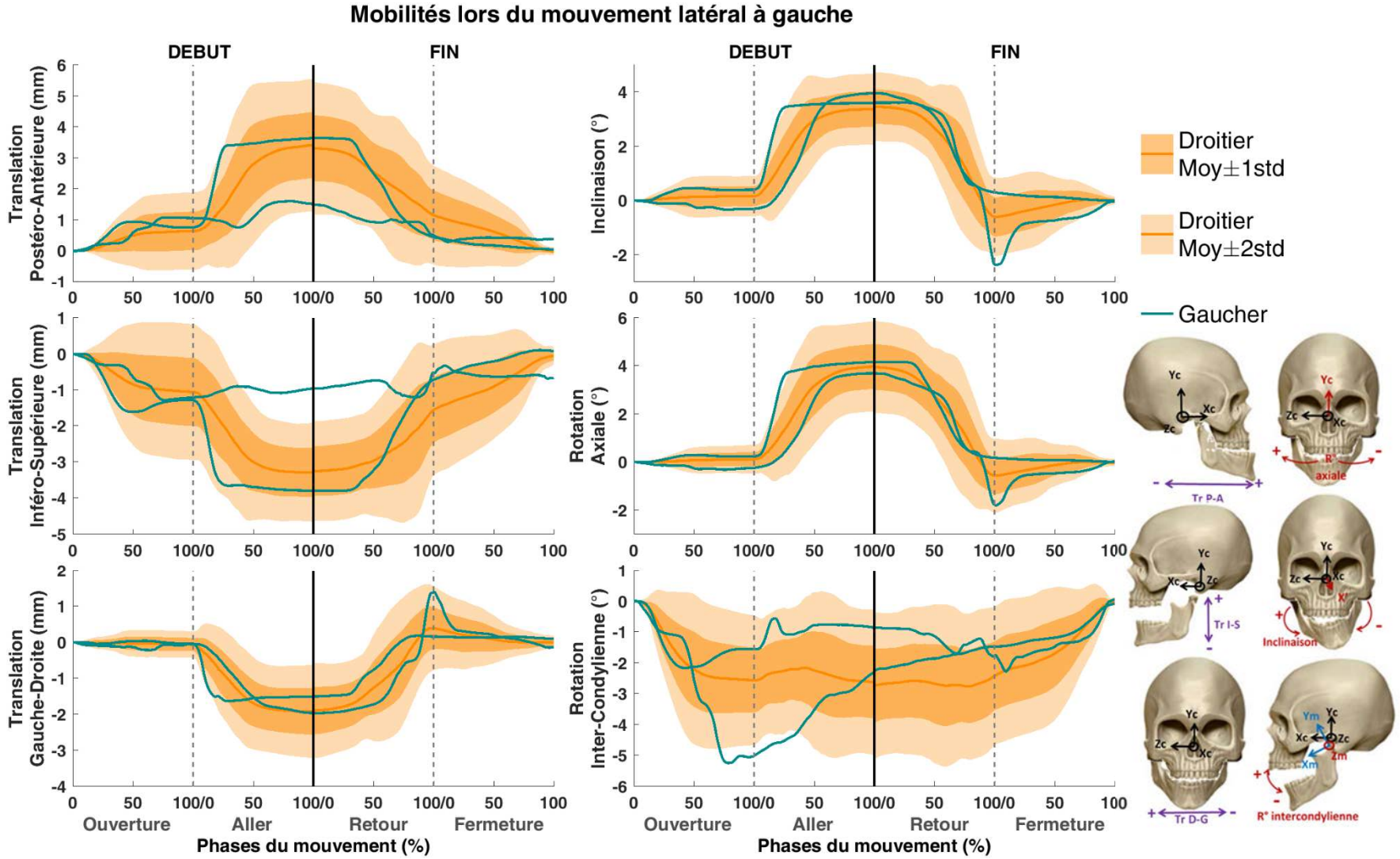
Comparaison des valeurs moyennes et corridors (à± 1 écart-type) des 26 droitiers (en orange) avec les courbes des mobilités des 3 gauchers (en bleu) pour la réalisation du mouvement d'ouverture



Comparaison des valeurs moyennes et corridors (à± 1 écart-type) des droitiers (en orange) avec les courbes des mobilités (en bleu) pour les gauchers lors du mouvement de propulsion. Visualisation par phase de mouvement pour les sujets respectant les consignes soient 14 droitiers et 3 gauchers en ouverture-aller et 20 droitiers et 3 gauchers en retour-fermeture



Comparaison des valeurs moyennes et corridors (à± 1 écart-type) des droitiers (en orange) avec les courbes des mobilités (en bleu) pour les gauchers lors du mouvement latéral vers la droite. Visualisation par phase de mouvement pour les sujets respectant les consignes soient 18 droitiers et 2 gauchers en ouverture-aller et 14 droitiers et 2 gauchers en retour-fermeture

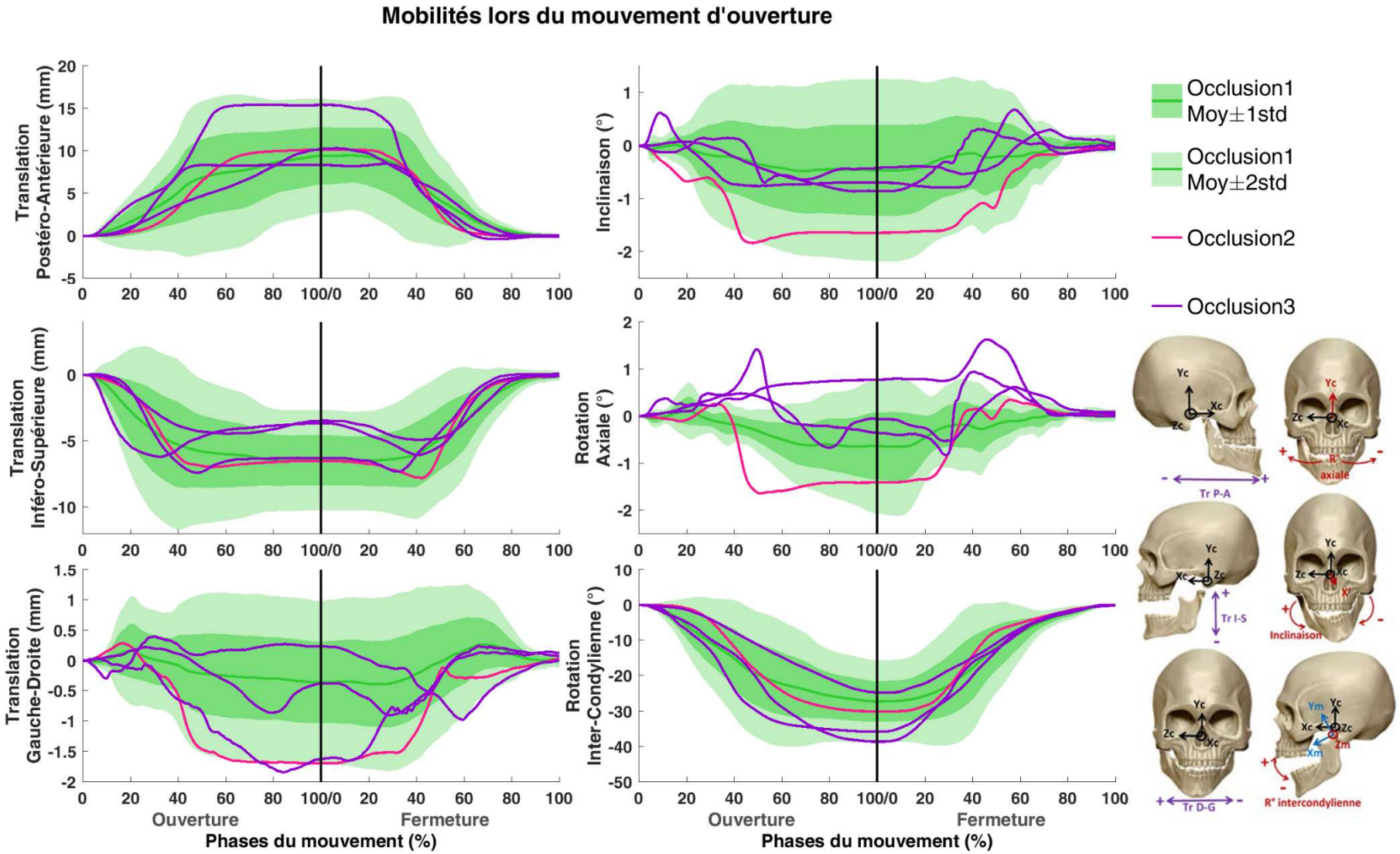


Comparaison des valeurs moyennes et corridors (à± 1 écart-type) des droitiers (en orange) avec les courbes des mobilités (en bleu) pour les gauchers lors du mouvement latéral vers la gauche. Visualisation par phase de mouvement pour les sujets respectant les consignes soient 19 droitiers et 2 gauchers en ouverture-aller et 18 droitiers et 2 gauchers en retour-fermeture

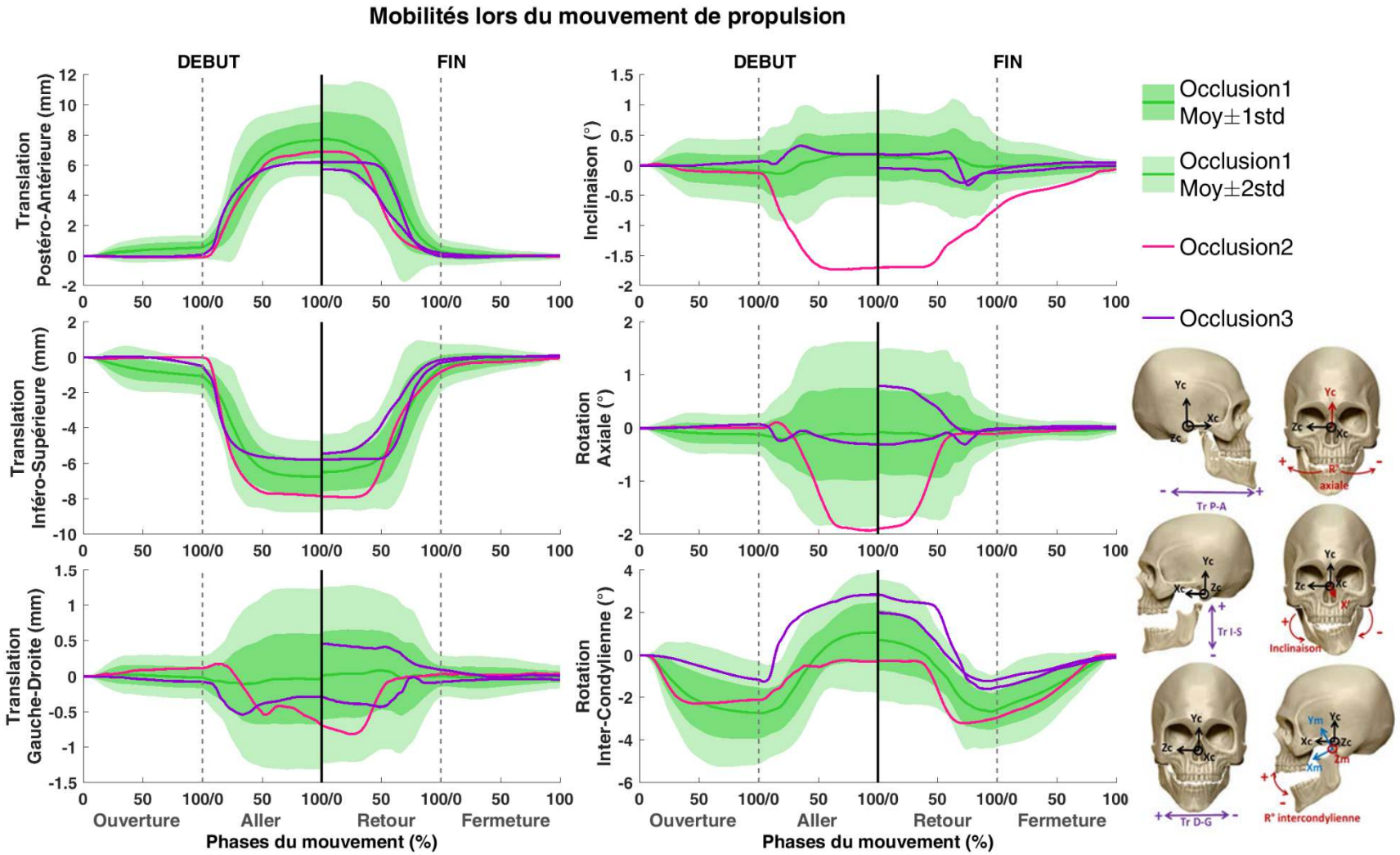
Annexe 4 :

Mobilités mandibulaires – Etude de la classe d'occlusion

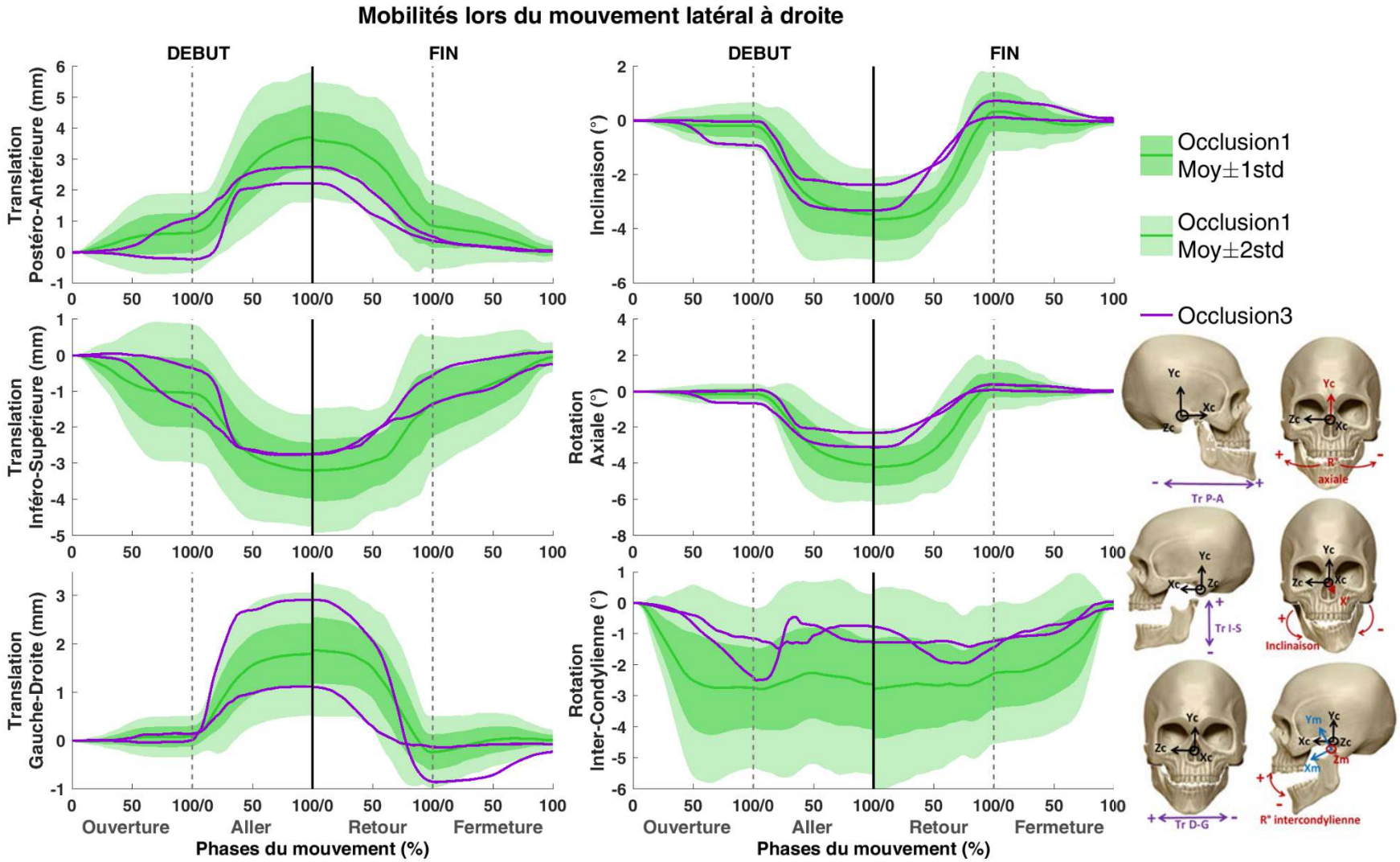
Comparaison des mobilités mandibulaires asymptomatiques des sujets respectant les consignes selon leur classe d'occlusion pour les différents mouvements élémentaires



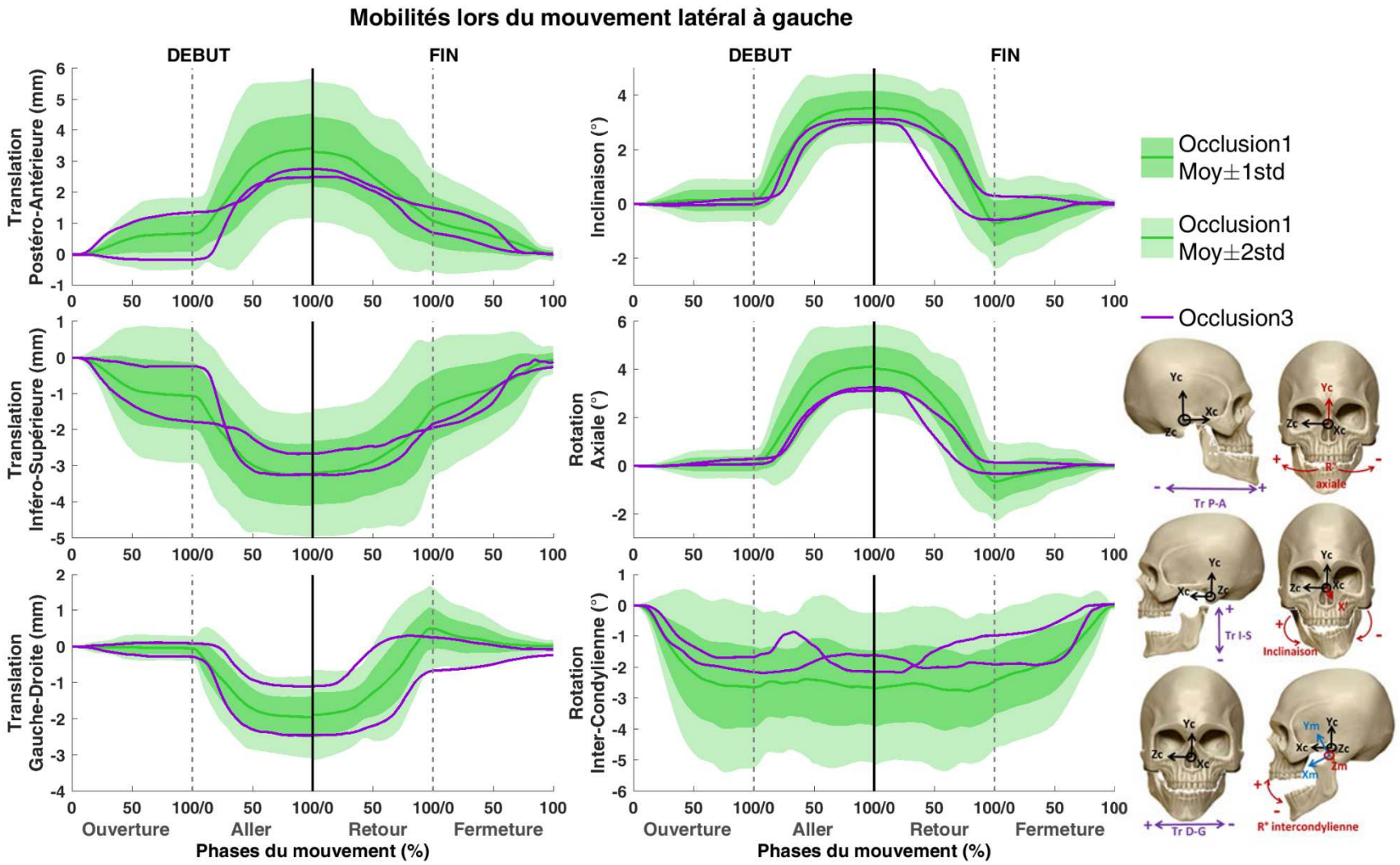
Comparaison des valeurs moyennes et corridors (à± 1 écart-type) pour les 25 sujets avec occlusion1 et les courbes des mobilités pour 1 occlusion2 (en orange) et 3 occlusion3 (en violet) pour la réalisation du mouvement d'ouverture



Comparaison des valeurs moyennes et corridors (à± 1 écart-type) pour les occlusions1 avec les courbes des mobilités pour les autres sujets lors du mouvement de propulsion. Visualisation par phase de mouvement pour les sujets respectant les consignes soient 15 occlusions 1(en vert), 1 occlusion 2 (en orange) et 1 occlusion3 (en violet) en ouverture-aller et 20 occlusions 1, 1 occlusion 2 et 2 occlusions 3 en retour-fermeture



Comparaison des valeurs moyennes et corridors (à± 1 écart-type) pour les sujets avec occlusion 1 avec les courbes des mobilités des autres sujets lors du mouvement latéral à droite. Visualisation par phase de mouvement pour les sujets respectant les consignes soient 18 occlusion1 (en vert) & 2 occlusion3 (en violet) en ouverture-aller et 14 occlusion1 & 2 occlusion3 en retour-fermeture



Comparaison des valeurs moyennes et corridors (à± 1 écart-type) pour les sujets avec occlusion 1 avec les courbes des mobilités des autres sujets lors du mouvement latéral à gauche. Visualisation par phase de mouvement pour les sujets respectant les consignes soient 19 occlusion1 (en vert) & 2 occlusion3 (en violet) en ouverture-aller et 18 occlusion1 & 2 occlusion3 en retour-fermeture

Analyse cinématique de l'appareil manducateur humain : constitution d'une base de données de sujets asymptomatiques et comparaison avec sujets à dysfonction.

Près d'un quart de la population mondiale présente au moins un signe de dysfonction de l'appareil manducateur, pour seulement 5 à 12% de prise en charge. Les différents composants de cet appareil fonctionnent en synergie et s'auto-influencent, ce qui entraine des dysfonctions diverses, encore mal expliquées à ce jour.
L'objectif de cette thèse est l'étude des mouvements mandibulaires pour la compréhension du fonctionnement de l'appareil manducateur, avec comme enjeu principal, la création d'un outil de diagnostic pour l'identification de dysfonctions. Pour cela, dans un premier temps, un protocole de mesures cinématiques, dont la précision et la répétabilité ont été caractérisées, a été proposé. Dans un second temps, les mesures cinématiques ont été réalisées sur 29 sujets asymptomatiques et 15 sujets avec dysfonctions mineures. Des mouvements élémentaires de la bouche en ouverture-fermeture, latéralité et propulsion ont été enregistrés. L'analyse des trajectoires des pôles condyliens dans différents plans anatomiques permet d'identifier des tendances générales mais met en évidence une grande variabilité inter-individuelle dans l'exécution des mouvements. L'étude des six mobilités de la mandibule complète cette information et démontre l'activation simultanée de translations et de rotations pour chacun des mouvements étudiés. Ceci constitue la première base de données de l'évolution des mobilités pour la mandibule humaine pour trois types de mouvements élémentaires. La comparaison de sujets présentant des dysfonctions mineures avec cette base de données montre que les mouvements de latéralité et de propulsion peuvent être des révélateurs de ces dysfonctions. Ces premiers résultats sont encourageants pour l'utilisation de l'analyse cinématique dans le cadre du diagnostic et du suivi de patients.

Mots clés : Mandibule, Articulation temporo-mandibulaire, Analyse cinématique tridimensionnelle

Kinematic analysis of the human masticatory system: constitution of database of asymptomatic subjects and comparison with subjects with dysfunction.

Nearly a quarter of the world's population has at least one sign of temporomandibular disorder, for only 5 to 12% of treatment. The different components of the masticatory system operate in synergy and self-influence, resulting in various dysfunctions which are still not well explained to date.
The objective of this thesis is the study of the mandibular movements in order to understand the functioning of the masticatory system. The main challenge is the creation of a diagnostic tool for the identification of dysfunctions. To this end, a protocol of kinematic measurements was first proposed. Moreover, the precision and the repeatability of this protocol have been characterized. In a second step, the kinematic measurements were performed on 29 asymptomatic subjects and 15 subjects with minor dysfunctions. Basic movements of the mouth in opening-closing, lateral and propulsion were recorded. The analysis of condylar pathway in different anatomical planes makes it possible to identify general trends but shows a great interindividual variability in movements execution. The study of the six mobilities of the mandible completes this information and demonstrates the simultaneous activation of translations and rotations for each of the studied movements. This constitutes the first database of the evolution of mobilities for the human mandible for three types of basic movements. The comparison of subjects with minor dysfunctions with this database shows that the lateral and propulsion movements can be revealing of these dysfunctions. These first results are encouraging for the use of kinematic analysis in the diagnosis of temporomandibular disorders and patients monitoring.

Key words: Mandible, Temporomandibular joint, Three-dimensional kinematics