



HAL
open science

Quantification des mouvements de la mimique faciale par motion capture sur une population de volontaires sains

François-Régis Sarhan

► To cite this version:

François-Régis Sarhan. Quantification des mouvements de la mimique faciale par motion capture sur une population de volontaires sains. Biomécanique [physics.med-ph]. Université de Technologie de Compiègne, 2017. Français. NNT : 2017COMP2370 . tel-01635768

HAL Id: tel-01635768

<https://theses.hal.science/tel-01635768v1>

Submitted on 15 Nov 2017

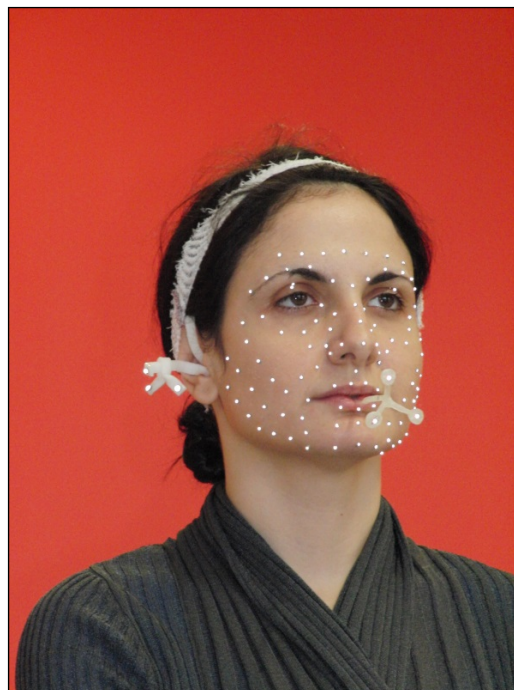
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

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.

Par **François-Régis SARHAN**

*Quantification des mouvements de la mimique faciale
par motion capture sur une population de volontaires
sains*

Thèse présentée
pour l'obtention du grade
de Docteur de l'UTC



Soutenue le 14 juin 2017

Spécialité : Biomécanique et Bio-ingénierie : Unité de
Recherche Biomécanique et Bio-ingénierie (UMR-7338)

D2370



UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE COMPIÈGNE

École doctorale Sciences pour l'Ingénieur

UMR CNRS 7338 : BioMécanique et BioIngénierie (BMBI)

THÈSE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE COMPIÈGNE

François-Régis Sarhan

**QUANTIFICATION DES MOUVEMENTS
DE LA MIMIQUE FACIALE PAR MOTION CAPTURE
SUR UNE POPULATION DE VOLONTAIRES SAINS**

Soutenue le 14 juin 2017

Directeurs de thèse :

- Frédéric Marin
- Stéphanie Dakpé

Résumé

La prise en charge des déficits moteurs de la mimique faciale est complexe et nécessite un suivi sur le long terme. Il existe de nombreuses techniques d'évaluation de la mimique faciale déficitaire avec des degrés variables de sensibilité. Cependant, la plupart de ces techniques sont manuelles et qualitatives (testing musculaire et scores cliniques). Elles conduisent donc à des mesures subjectives et peu reproductibles dans le temps. Ces techniques d'évaluation reposent en outre sur l'appréciation de l'évaluateur qui est une source importante de biais. Ainsi, l'apport d'un outil de mesure objectif pour quantifier un déficit et optimiser le suivi et la prise en charge médicale, chirurgicale et rééducative des patients apparaît comme nécessaire.

L'objectif de ce travail de thèse était donc de développer un outil quantitatif permettant d'évaluer les troubles de la mimique faciale. Dans cette perspective, nous avons mis en place un protocole d'analyse du mouvement par motion capture et avons réalisé des mesures sur une population de référence.

Une étude descriptive utilisant un système de capture de mouvement en 3 dimensions a été réalisée sur des volontaires sains (n = 30) âgés de 20 à 30 ans. Le système de capture du mouvement était constitué de 17 caméras optoélectroniques T160 et de 2 caméras vidéo Bonita (Vicon™). Les mouvements étudiés étaient : la fermeture « simple » (non forcée) des paupières, la fermeture forcée des paupières, la protrusion labiale sur le son « o » [o], la protrusion labiale sur le son « pou » [pμ], et un sourire volontaire découvrant les dents. Lors de ces mouvements, nous avons enregistré et analysé le déplacement de 111 marqueurs réfléchissants de 1.5mm placés sur la face des sujets.

Pour les cinq mouvements réalisés, nous avons obtenu des données quantitatives. Celles-ci nous ont permis d'identifier les zones d'action pour chacun des mouvements, de mesurer l'amplitude des déplacements et d'obtenir des données comparables dans le temps. Par ailleurs, le protocole mis en place a été évalué et sa réalisation est compatible avec une application clinique.

L'analyse de la cinématique de la face est donc une technique appropriée à la clinique qui pourrait faciliter le diagnostic, le suivi et la rééducation des patients. Ce travail a permis de définir des mesures de référence qui constitueront la base d'un outil diagnostique, qu'il convient désormais de mettre en œuvre sur des patients.

Remerciements

À la croisée entre plusieurs disciplines, ce travail de thèse m'a permis de nombreuses (et heureuses) rencontres. Je remercie toutes ces personnes qui m'ont beaucoup appris, et dont certaines sont devenues des amis.

Je remercie tout d'abord mes directeurs de thèse, qui ont cru en moi, qui m'ont assuré leur soutien, pour leur patience et leur disponibilité.

Ensuite, ceux qui m'ont transmis leur savoir-faire, et m'ont assisté dans mes réflexions. Merci Christine, pour ta grande expertise, ton aide, et ton amitié. Merci Khalil, pour ton gros investissement dans ce projet. Merci Charles, pour ton temps et tes idées. Merci à Caroline, Barthélémy et Benjamin pour votre temps et votre disponibilité.

Je suis également reconnaissant à mes proches, ma famille, mes amis et collègues pour leur patience et leur soutien. Merci à toi Marie d'être à mes côtés.

Remerciement également au Conseil Régional de Picardie et à la Fondation des Gueules Cassées pour leur soutien financier.

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCTION | 1 |
| 1. RAPPELS SUR LA MIMIQUE FACIALE | 4 |
| 1.1. LA MIMIQUE FACIALE..... | 4 |
| 1.1.1. Définitions..... | 4 |
| 1.1.2. Particularités anatomiques..... | 4 |
| 1.1.3. Fonctions physiologiques de la face..... | 11 |
| 1.1.4. Pathologies de la mimique..... | 13 |
| 1.2. ÉTAT DE L'ART DES MOYENS D'ANALYSE ADAPTÉS À LA MIMIQUE FACIALE DÉFICITAIRE..... | 18 |
| 1.2.1. Approche Qualitative..... | 18 |
| 1.2.2. Approche Quantitative..... | 27 |
| 1.3. REVUE DES TECHNOLOGIES DE CAPTURE DU MOUVEMENT HUMAIN « MOTION CAPTURE »..... | 38 |
| 1.3.1. Méthodes non-optiques..... | 38 |
| 1.3.2. Méthodes optiques..... | 39 |
| 1.4. PROBLÉMATIQUE..... | 47 |
| 2. MATÉRIEL ET MÉTHODE | 49 |
| 2.1. AUTORISATIONS ET RESPECT DE LA LÉGISLATION EN MATIÈRE DE RECHERCHE BIOMÉDICALE..... | 49 |
| 2.2. POPULATION ÉTUDIÉE..... | 49 |
| 2.2.1. Critères de non inclusion..... | 49 |
| 2.2.2. Critères d'inclusion..... | 49 |
| 2.2.3. Critères d'exclusion..... | 49 |
| 2.3. MATÉRIEL..... | 50 |
| 2.3.1. La plate-forme d'analyse du mouvement..... | 50 |
| 2.3.2. Les marqueurs..... | 54 |
| 2.3.3. Les référentiels fixes..... | 58 |
| 2.4. MÉTHODE..... | 61 |
| 2.4.1. Protocole de mouvements..... | 61 |
| 2.4.2. Workflow du protocole de capture du mouvement de la mimique faciale..... | 64 |
| 2.4.3. Protocole de capture du mouvement..... | 65 |
| 2.5. TRAITEMENT DES DONNÉES..... | 66 |
| 2.5.1. Reconstruction des données..... | 66 |
| 2.5.2. Labellisation des données..... | 66 |
| 2.5.3. Exportation des données..... | 67 |
| 2.5.4. Conversion des données..... | 69 |
| 2.6. EXPLOITATION DES DONNÉES..... | 69 |
| 2.6.1. Amplitudes des déplacements relatifs..... | 69 |
| 2.6.2. Corrélations..... | 70 |
| 2.6.3. Symétries..... | 70 |
| 2.6.4. Durées..... | 70 |
| 2.6.5. Caractérisation des marqueurs..... | 70 |
| 2.6.6. Sensibilité et spécificité..... | 71 |
| 2.6.7. Graphiques et figures..... | 72 |
| 3. RÉSULTATS | 74 |
| 3.1. STATISTIQUES DESCRIPTIVES..... | 74 |
| 3.1.1. Population..... | 74 |
| 3.1.2. Données..... | 74 |
| 3.2. ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DU PROTOCOLE DE MESURE..... | 75 |
| 3.2.1. Temps de pose des marqueurs..... | 75 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 3.2.2. | <i>Précision de la mesure et marge d'erreur</i> | 76 |
| 3.2.3. | <i>Fiabilité des marqueurs</i> | 77 |
| 3.2.4. | <i>Reproductibilité de mesure</i> | 79 |
| 3.2.5. | <i>Symétrie des mouvements faciaux</i> | 83 |
| 3.3. | ANALYSE DES MOUVEMENTS..... | 86 |
| 3.3.1. | <i>Mobilité globale de la face durant la réalisation du protocole</i> | 86 |
| 3.3.2. | <i>Durée de réalisation des mouvements faciaux</i> | 89 |
| 3.4. | ZONES D'ACTION DES MOUVEMENTS ÉTUDIÉS..... | 91 |
| 3.5. | CARACTÉRISATION DES MOUVEMENTS..... | 102 |
| 3.5.1. | <i>Analyse en composante principale (ACP)</i> | 102 |
| 3.5.2. | <i>Analyse en clusters</i> | 106 |
| 3.6. | ÉVALUATION DE LA MÉTHODE DIAGNOSTIQUE..... | 111 |
| 3.6.1. | <i>Sensibilité et Spécificité des marqueurs pour M1</i> | 111 |
| 3.6.2. | <i>Sensibilité et Spécificité des marqueurs pour M2</i> | 112 |
| 3.6.3. | <i>Sensibilité et Spécificité des marqueurs pour M3</i> | 113 |
| 3.6.4. | <i>Sensibilité et Spécificité des marqueurs pour M4</i> | 114 |
| 3.6.5. | <i>Sensibilité et Spécificité des marqueurs pour M3 et M4</i> | 115 |
| 3.6.6. | <i>Sensibilité et Spécificité des marqueurs pour M5</i> | 117 |
| 3.7. | ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE..... | 119 |
| 4. | DISCUSSION | 123 |
| 4.1. | ANALYSE DE LA MÉTHODE..... | 123 |
| 4.1.1. | <i>Positionnement des marqueurs</i> | 123 |
| 4.1.2. | <i>Choix du point fixe</i> | 123 |
| 4.1.3. | <i>Choix des marqueurs</i> | 125 |
| 4.1.4. | <i>Précision de mesure</i> | 126 |
| 4.1.5. | <i>Reproductibilité de mesure</i> | 126 |
| 4.2. | ANALYSE DES MOUVEMENTS..... | 128 |
| 4.2.1. | <i>Pertinence des mouvements étudiés</i> | 128 |
| 4.2.2. | <i>Symétrie – asymétrie des mouvements</i> | 130 |
| 4.2.3. | <i>Caractérisation des mouvements étudiés</i> | 130 |
| 4.3. | DONNÉES À VISÉES DIAGNOSTIQUES..... | 133 |
| 4.3.1. | <i>M1 : fermeture simple des paupières</i> | 133 |
| 4.3.2. | <i>M2 : fermeture forcée des paupières</i> | 133 |
| 4.3.3. | <i>M3 et M4 : protrusion labiale</i> | 134 |
| 4.3.4. | <i>M5 : sourire volontaire découvrant les dents</i> | 134 |
| 4.4. | RÉSULTATS À LA LUMIÈRE DE LA LITTÉRATURE..... | 137 |
| 4.4.1. | <i>Performances techniques</i> | 137 |
| 4.4.2. | <i>Choix et densité des marqueurs</i> | 139 |
| 4.4.3. | <i>Données obtenues à partir de la population de référence</i> | 139 |
| 4.4.4. | <i>Cahier des charges de l'analyse quantifiée de la mimique</i> | 141 |
| 4.5. | LIMITATIONS ET PERSPECTIVES..... | 143 |
| 4.5.1. | <i>Résultats et apport de notre travail</i> | 143 |
| 4.5.2. | <i>Limites</i> | 143 |
| 4.5.3. | <i>Perspectives</i> | 143 |
| | CONCLUSION | 145 |
| | RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 146 |
| | ANNEXES | 153 |

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Stimulation électrique des muscles zygomatiques par Duchenne de Boulogne..... | 1 |
| Figure 2 : Tête osseuse, vue antérieure. D'après Frank H. Netter [2]. | 5 |
| Figure 3 : Muscle de la mimique faciale. D'après Frank H. Netter [2]. | 6 |
| Figure 4 : Vue antérieure des sites d'insertion musculaire la face [3]. | 7 |
| Figure 5 : Myologie fonctionnelle des muscles peuciers [4]. | 8 |
| Figure 6 : Anatomie de surface de la face. D'après Frank H. Netter. et al [2]. | 9 |
| Figure 7 : Variations inter-ethniques des dimensions de la face [5]. | 10 |
| Figure 8 : Représentation schématique de la partie motrice du nerf facial. D'après Wilson-Pauwels (1988). | 14 |
| Figure 9 : Aspect morphologique d'une paralysie faciale périphérique gauche. D'après Taillia et al. [4]. | 15 |
| Figure 10 : Faciès caractéristique de la maladie de Steinert : paupières tombantes, bouche ouverte et atrophie musculaire [6]. | 16 |
| Figure 11 : Tableau récapitulatif de l'examen clinique d'une paralysie faciale d'après Taillia et al. [4]. | 19 |
| Figure 12 : Classification de Lazarini [23]. | 22 |
| Figure 13 : Sunnybrook Facial Grading System, d'après Ross et al. (1996). | 24 |
| Figure 14 : Facial Nerve Function Index (FNFI) d'après Fields et Peckitt (1990). | 28 |
| Figure 15 : Faciometer®, d'après Frey et al. (1994). | 29 |
| Figure 16 : Marqueur actif de la marque Qualisys | 33 |
| Figure 17 : Placement des marqueurs et modèle 3D d'après Green et Wilson (2006). | 34 |
| Figure 18 : Gypsy-7 de Animazoo ^{ltd} , exosquelette avec gyroscopes (www.animazoo.fr). | 39 |
| Figure 19 : Chronophotographie du mouvement humain - Eadweard Muybridge, 1887. (www.muybridge.org). | 40 |
| Figure 20 : Méthode de tracking à gauche, et de flux optique à droite. D'après Fasel et al. [72]. | 41 |
| Figure 21 : La stéréovision repose sur deux caméras fixes dont la distance (b) est connue..... | 42 |
| Figure 22 : Technique de stéréovision. D'après Samper et al. [74]. | 42 |
| Figure 23 : A gauche, projection de lumière structurée ; au centre et à droite : reconstruction en 3D [77]. | 43 |
| Figure 24 : Principe des caméras temps de vol. La caméra mesure le délai entre l'émission lumineuse et sa capture [79]. | 44 |
| Figure 25 : Principe de capture à l'aide de marqueurs. Dans cet exemple, des marqueurs actifs. (www.phasespace.com)..... | 45 |
| Figure 26 : Synthèse des méthodes de capture du mouvement en 3D. | 46 |
| Figure 27 : Caméra Vicon™ T160 (à gauche) ; Caméra Vicon™ Bonita. (à droite) | 50 |
| Figure 28 : Fonctionnement du système Vicon™ (source : www.vicon.com). | 51 |
| Figure 29 : Le champ de capture est la zone de couverture du mouvement par les caméras..... | 52 |
| Figure 30 : Le champ de capture est disposé de manière à avoir une couverture optimale des mouvements de la face..... | 53 |
| Figure 31 : Emplacement des caméras..... | 53 |
| Figure 32 : Marqueurs réfléchissants de 1,5mm utilisés dans ce protocole..... | 54 |
| Figure 33 : Protocole de pose à 105 marqueurs. | 55 |
| Figure 34 : Masque guidant la pose des marqueurs. | 57 |
| Figure 35 : Vue d'ensemble des différents dispositifs servant de "référentiel fixe"..... | 58 |
| Figure 36 : La gouttière permet l'occlusion de l'articulé dentaire. | 59 |
| Figure 37 : La tige supportant les marqueurs est positionnée de manière à ne pas gêner l'occlusion labiale. | 59 |
| Figure 38 : Le référentiel maxillaire permet de supporter 3 marqueurs réfléchissants. | 59 |
| Figure 39 : Le référentiel auriculaire est un dispositif thermoformé sur le sujet à l'aide d'un plastique basse température à usage médical. | 60 |
| Figure 40 : Déroulé du protocole. | 64 |
| Figure 41 : Paramètres de reconstruction (Nexus). | 66 |
| Figure 42 : Données obtenues après reconstruction. | 67 |
| Figure 43 : Trajectoire de deux marqueurs (Lc2 et Lc5) au cours du mouvement 1, dans le référentiel de capture..... | 68 |
| Figure 44 : Exemple de fichier csv | 68 |
| Figure 45 : Le temps de pose des marqueurs a diminué entre 2013 et 2016..... | 75 |
| Figure 46 : Bruit de reconstruction. | 76 |
| Figure 47 : Amplitude moyenne de déplacement du référentiel auriculaire lors de la réalisation des 5 mouvements | 77 |
| Figure 48 : Fiabilité des marqueurs. En vert les marqueurs identifiés dans plus de 90% des captures. | 79 |
| Figure 49 : Nuage de points et corrélation (Pearson) entre mouvements isolés (ordonnée) et mouvements répétés trois fois (abscisse) | 82 |
| Figure 50 : Nuage de points et corrélation (Pearson) entre les deux mouvements de protrusion labiale. | 83 |
| Figure 51 : Écart de déplacement des marqueurs entre l'hémiface droite et l'hémiface gauche pour les valeurs moyennes et maximales... .. | 84 |
| Figure 52 : Amplitude de déplacement des marqueurs sur l'ensemble de protocole..... | 87 |
| Figure 53 : Les zones les moins mobiles de la face sont localisées sur le Dorsum et la zone péri-nasale | 88 |
| Figure 54 : Durées moyennes des mouvements capturés en secondes. | 90 |
| Figure 55 : Amplitude du mouvement (moyenne, 75 percentile et maximale) lors de la fermeture simple des paupières (M1). | 92 |
| Figure 56 : Amplitude de déplacement lors de M1 pour les valeurs moyennes, au 75 ^{ème} percentile et pour les valeurs maximales. | 93 |
| Figure 57 : Amplitude du mouvement (moyenne, 75 percentile et maximale) lors de la fermeture forcée des paupières (M2). | 94 |
| Figure 58 : Amplitude de déplacement lors de M2 pour les valeurs moyennes, au 75 ^{ème} percentile et pour les valeurs maximales. | 95 |
| Figure 59 : Amplitude du mouvement (moyenne, 75 percentile et maximale) lors de la protrusion labiale sur le son « O » (M3). | 96 |
| Figure 60 : Amplitude de déplacement lors de M3 pour les valeurs moyennes, au 75 ^{ème} percentile et pour les valeurs maximales. | 97 |
| Figure 61 : Amplitude du mouvement (moyenne, 75 percentile et maximale) lors de la protrusion labiale sur le son « pou » (M4). | 98 |
| Figure 62 : Amplitude de déplacement lors de M4 pour les valeurs moyennes, au 75 ^{ème} percentile et pour les valeurs maximales. | 99 |

TABLE DES ILLUSTRATIONS

| | |
|---|------|
| Figure 63 : Amplitude du mouvement (moyenne, 75 percentile et maximale) lors du sourire volontaire découvrant les dents (M5)..... | 100 |
| Figure 64 : Amplitude de déplacement lors de M5 pour les valeurs moyennes, au 75 ^{ème} percentile et pour les valeurs maximales. | 101 |
| Figure 65 : Graphique des variables. | 103 |
| Figure 66 : Biplot et factor map pour les valeurs moyennes. | 104 |
| Figure 67 : Biplot et factor map pour les valeurs maximales. | 105 |
| Figure 68 : Biplot et factor map pour les valeurs au 75 ^{ème} percentile. | 106 |
| Figure 69 : K-means pour les valeurs moyennes. Chacun des groupes de marqueurs est représenté par une couleur..... | 107 |
| Figure 70 : K-means pour les valeurs maximales | 108 |
| Figure 71 : K-means pour les valeurs au 75 ^{ème} percentile. | 109 |
| Figure 72 : Classes de déplacement déterminées par l'analyse en cluster de valeurs d'amplitude moyenne, au 75 ^{ème} percentile et max. ... | 110 |
| Figure 73 : Courbe ROC pour les marqueurs Lc2 et Lc5 pour la réalisation de M1..... | 111 |
| Figure 74 : Courbe ROC pour les marqueurs lors de la réalisation de M2..... | 112 |
| Figure 75 : Courbe ROC pour les marqueurs lors de la réalisation de M3..... | 114 |
| Figure 76 : Courbe ROC pour les marqueurs lors de la réalisation de M4..... | 115 |
| Figure 77 : Courbe ROC pour les marqueurs lors de la réalisation de M3 et M4. | 116 |
| Figure 78 : Courbes ROC pour les marqueurs de deux clusters lors de la réalisation de M4..... | 118 |
| Figure 79 : Fermeture simple des paupières. Exemple du sujet « S01 ». | 119 |
| Figure 80 : Fermeture forcée des paupières. Exemple du sujet « S10 ». | 119 |
| Figure 81 : Protrusion labiale sur le son « O ». Exemple du sujet « S01 ». | 120 |
| Figure 82 : Protrusion labiale sur le son « pou ». Exemple du sujet « S02é ». | 120 |
| Figure 83 : Sourire volontaire découvrant les dents. Exemple du sujet "S07". | 121 |
| Figure 84 : Gouttière maxillaire et dispositif auriculaire. | 124 |
| Figure 85 : Les quatre points anatomiques présentant le moins de mobilité. | 125 |
| Figure 86 : marqueurs avec l'amplitude la plus faible durant la réalisation des cinq mouvements. | 128 |
| Figure 87 : Marqueurs emblématiques des cinq mouvements étudiés. | 136 |
| Figure 88 : Protocole de pose à 141 marqueurs | I |
| Figure 89 : Protocole de pose simplifié à 105 marqueurs. | II |
| Figure 90 : Colle Pros-Aide® II (ADM Tronics Unlimited, Inc. USA)..... | III |
| Figure 91 : Pose du silicone..... | IV |
| Figure 92 : Plâtrage de l'empreinte en silicone afin de maintenir sa forme..... | IV |
| Figure 93 : La coque en plâtre permet de conserver la forme du silicone après démoulage..... | V |
| Figure 94 : Démoulage du silicone. | VI |
| Figure 95 : Empreinte dans laquelle sera coulé du plâtre pour obtenir un positif de la face du sujet. | VI |
| Figure 96 : Démoulage du modèle du sujet en plâtre. | VII |
| Figure 97 : L'emplacement des marqueurs est indiqué sur le modèle plâtré..... | VII |
| Figure 98 : Pose des marqueurs sur le modèle plâtré. | VIII |
| Figure 99 : Thermoformage du masque à l'aide d'une plaque aspirante. | IX |
| Figure 100 : Report des points sur le masque en vue du perçage..... | IX |
| Figure 101 : Les trois modèles de gouttière par ordre chronologique | X |
| Figure 102 : Les modèles 1 et 2 sont moulés sur le pavillon de l'oreille du sujet alors que le modèle 3 se « clips » sur celui-ci. | XI |

TABLE DES TABLEAUX

| | |
|---|-----|
| Tableau I : Classification de House et Brackmann modifiée..... | 20 |
| Tableau II : Classification de Botman et Jongkees..... | 21 |
| Tableau III : Échelle de Peitersen..... | 21 |
| Tableau IV : Classification de May..... | 21 |
| Tableau V : Échelle de Smith..... | 22 |
| Tableau VI : Facial Paralysis Recovery Profile (total sur 40 points)..... | 22 |
| Tableau VII : Échelle de Yanagihara, versions 5 et 3 items..... | 23 |
| Tableau VIII : Detailed Evaluation of Facial Symmetry..... | 23 |
| Tableau IX : Janssen's Scale..... | 24 |
| Tableau X : Testing musculaire, échelle MRC..... | 25 |
| Tableau XI : Comparaison des deux principaux testings de la face..... | 26 |
| Tableau XII : Facial Paralysis Score of Stennert..... | 27 |
| Tableau XIII : Échelles d'évaluations de la fonction motrice de la face..... | 30 |
| Tableau XIV : Analyse multidimensionnelle de la mimique..... | 36 |
| Tableau XV : Emplacement des 105 marqueurs du protocole de pose définitif..... | 56 |
| Tableau XVI : Population étudiée..... | 74 |
| Tableau XVII : Données obtenues pour les 30 sujets inclus..... | 74 |
| Tableau XVIII : Données acquises sur les n =30 sujets sains inclus. (M0 : Statique ; Cplt : complet)..... | 75 |
| Tableau XIX : Déplacement enregistrés pour les trois marqueurs du référentiel fixe..... | 76 |
| Tableau XX : Déplacements moyens du référentiel fixe auriculaire au cours de l'ensemble des mouvements..... | 77 |
| Tableau XXI : Fiabilité des marqueurs..... | 78 |
| Tableau XXII : Fiabilité des marqueurs par mouvement pour les 10 marqueurs les moins fiables..... | 79 |
| Tableau XXIII : Amplitudes moyennes de déplacement..... | 80 |
| Tableau XXIV : Amplitudes moyennes de déplacement..... | 80 |
| Tableau XXV : Amplitudes moyennes de déplacement..... | 80 |
| Tableau XXVI : Différence d'amplitude maximale moyenne entre les mouvements isolés et les mouvements répétés..... | 81 |
| Tableau XXVII : Matrice de corrélation (Pearson) entre mouvements isolés et mouvements répétés trois fois..... | 81 |
| Tableau XXVIII : Matrice de corrélation (Pearson) entre mouvements simples et mouvements répétés trois fois..... | 81 |
| Tableau XXIX : Matrice de corrélation (Pearson) entre mouvements simples et mouvements répétés trois fois..... | 82 |
| Tableau XXX : Comparaison des amplitudes moyennes de déplacement entre l'hémiface droite et l'hémiface gauche..... | 83 |
| Tableau XXXI : Comparaison des amplitudes maximales de déplacement entre l'hémiface droite et l'hémiface gauche..... | 83 |
| Tableau XXXII : Marqueurs présentant une asymétrie significative pour les amplitudes moyennes..... | 85 |
| Tableau XXXIII : Marqueurs présentant une asymétrie significative pour les amplitudes maximales..... | 85 |
| Tableau XXXIV : Marqueurs les moins mobiles sur l'ensemble du protocole..... | 89 |
| Tableau XXXV : Marqueurs les plus mobiles sur l'ensemble du protocole..... | 89 |
| Tableau XXXVI : Durée moyenne des cinq mouvements du protocole et de M6 : sourire spontané..... | 90 |
| Tableau XXXVII : Cosinus carrés des variables pour les valeurs moyennes..... | 102 |
| Tableau XXXVIII : Cosinus carrés des variables pour les valeurs maximales..... | 102 |
| Tableau XXXIX : Cosinus carrés des variables pour les valeurs au 75 ^{ème} percentile..... | 102 |
| Tableau XL : Corrélations entre les variables « mouvement » et les facteurs :..... | 103 |
| Tableau XLI : Valeurs seuils retenues après analyse ROC pour M1..... | 111 |
| Tableau XLII : Valeurs seuils retenues après analyse ROC pour M2..... | 112 |
| Tableau XLIII : Valeurs seuils retenues après analyse ROC pour M3..... | 113 |
| Tableau XLIV : Valeurs seuils retenues après analyse ROC pour M4..... | 114 |
| Tableau XLV : Valeurs seuils retenues après analyse ROC pour M3 et M4..... | 115 |
| Tableau XLVI : Valeurs seuils retenues après analyse ROC pour M5 (marqueurs du cluster 4)..... | 117 |
| Tableau XLVII : Valeurs seuils retenues après analyse ROC pour M5 (marqueurs du cluster 3)..... | 117 |
| Tableau XLVIII : Correspondance entre les observations expérimentales et les descriptions anatomiques..... | 129 |
| Tableau XLIX : Marqueurs caractérisant le mouvement M1..... | 133 |
| Tableau L : Marqueurs caractérisant le mouvement M2..... | 134 |
| Tableau LI : Marqueurs caractérisant les mouvements M3 et M4..... | 134 |
| Tableau LII : Marqueurs caractérisant le mouvement M5..... | 135 |
| Tableau LIII : Caractéristiques techniques des principales études étudiant la mobilité faciale par motion capture..... | 137 |
| Tableau LIV : Taille, nombre et position des marqueurs de différents auteurs..... | 138 |
| Tableau LV : Mouvements étudiés lors de différents protocoles d'analyse des mouvements de la face..... | 140 |
| Tableau LVI : Comparaison des amplitudes de déplacement pour les marqueurs communs entre les protocoles de Sforza et al. et notre travail de recherche..... | 140 |
| Tableau LVII : Comparaison des deux protocoles de pose..... | II |
| Tableau LVIII : Evaluation des différentes colles identifiées..... | III |
| Tableau LIX : Évolution du modèle de gouttière..... | X |
| Tableau LX : Évolution du référentiel auriculaire..... | XI |

Introduction

L'expression ou la gestuelle faciale, que l'on nomme généralement mimique, est produite par des structures qui répondent aux émotions, aux réflexes, à des mouvements volontaires ou non. La subtilité des mouvements produits par la face est difficile à appréhender pour qui n'a pas un œil expert. Pourtant une perturbation de la mimique induira des répercussions fonctionnelles et sociales pour le patient.

Ces mouvements sont produits par une architecture complexe. Par leurs points d'attache cutanés, les insertions des muscles superficiels de la face sont difficilement identifiables, et leur physiologie complexe. Au XIX^e siècle, Guillaume Duchenne de Boulogne étudie la mimique faciale à l'aide de stimulations électriques. Ses expérimentations lui permettent de relier une contraction musculaire à une action physiologique de la mimique (Figure 1). Il constate alors que les mouvements faciaux sont le fruit d'une combinatoire entre muscles agonistes et antagonistes [1].

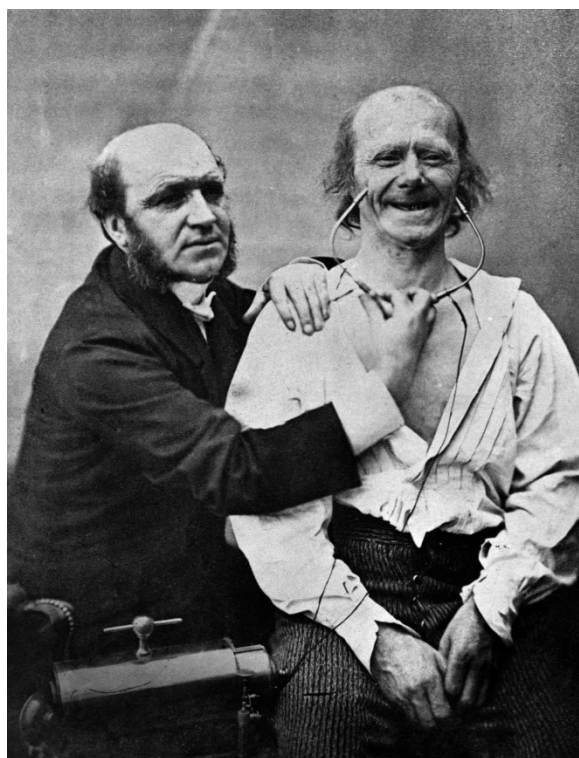


Figure 1 : Stimulation électrique des muscles zygomatiques par Duchenne de Boulogne. « Mécanisme de la physionomie humaine, ou Analyse électro-physiologique de l'expression des passions applicable à la pratique des arts plastiques » (1862).

Étant alors entendu que la mimique s'appréhende dans sa globalité, il fallait adopter des outils capables de saisir la mobilité de l'entièreté de la face. La photographie, a tenu ce rôle. Elle permet de saisir une asymétrie, une absence de mouvement, ou au contraire son excès.

Les progrès technologiques de ces dernières décennies nous permettent désormais d'analyser un mouvement dans plusieurs dimensions et d'enregistrer sa cinématique. La technologie de référence en termes d'analyse quantifiée du mouvement est la « *motion capture* ». Cette technique consiste en la capture d'un mouvement en trois dimensions à l'aide de caméras infra-rouges et de marqueurs réfléchissants. La motion capture est déjà utilisée en routine dans l'analyse quantifiée des mouvements des membres, mais son application sur les tissus mous de la face demeure expérimentale.

C'est dans ce contexte, que le projet SIMOVI (Simulation des MOuvements du Visage) a vu le jour. Le projet SIMOVI a permis à des équipes pluridisciplinaires composés de professionnels de santé et de chercheurs, d'étudier la mimique faciale à l'aide de technologies innovantes. La présente étude : « FaceMoCap » en est l'une de ses déclinaisons.

L'objet de ce travail de recherche est donc :

- D'évaluer la faisabilité et l'applicabilité de la motion capture à l'analyse faciale.
- De développer un outil d'évaluation quantitative de la mimique faciale.
- De démontrer l'intérêt clinique de cette technique.

Dans cette perspective, nous détaillerons dans un premier chapitre les principaux moyens d'évaluation clinique de la mimique et les problématiques qui s'y rapportent.

Nous décrirons ensuite le protocole de recherche que nous avons mené et détaillerons ses principaux résultats.

Un dernier chapitre discutera des résultats, et posera les bases de ce nouvel outil d'analyse quantifiée de la mimique.

CHAPITRE 1 :

RAPPELS SUR LA MIMIQUE FACIALE

1. Rappels sur la mimique faciale

Ce premier paragraphe permettra de présenter quelques brefs rappels sur la mimique faciale : ses principales fonctions, son anatomie, et sa physiologie. Nous évoquerons ensuite les principaux tableaux pathologiques susceptibles d'altérer la mimique.

Dans une seconde partie, seront décrits les moyens d'analyse de la mimique déficitaire, que ce soit en routine, ou à des fins de recherche. Ces techniques seront classées selon le type de mesure réalisées.

Une dernière partie s'intéressera plus particulièrement au concept de capture du mouvement.

1.1. La mimique faciale

1.1.1. Définitions

Les définitions de la mimique varient suivant le contexte, ainsi le terme peut faire référence tantôt à un geste exprimant des sentiments sur un visage, tantôt à la mobilité de la face.

Ainsi le centre national des ressources textuelles et lexicales décrit le terme médical de mimique comme étant une « expression faciale et gestuelle (sans dimension verbale) qui peut être émotive, réflexe, volontaire ou non et qui traduit le vécu intérieur d'un sujet » (d'apr. Méd. Biol. t.2 1971).

Le travail porte donc ici sur la mobilité de la face au sens moteur, sans considérer les aspects « *physiognomoniques* » ou plus simplement l'interprétation de la pensée et des sentiments.

Nous considèrerons plus particulièrement l'action biomécanique des muscles de la mimique, qui se traduit par une mobilité superficielle de la peau de la face.

1.1.2. Particularités anatomiques

1.1.2.1. Ostéologie et myologie

La face est la partie de l'extrémité céphalique située à la partie antérieure du crâne. Celle-ci est constituée d'un squelette : le massif facial et la mandibule, et d'une musculature complexe : les muscles peauciers et les muscles de l'appareil manducateur. Il est également retrouvé un grand nombre d'organes spécialisés (nerfs, vaisseaux, organes sensoriels). Le tout est recouvert par le revêtement cutané.

1.1.2.1.1. Le massif facial et la mandibule

Le massif facial (Figure 2) est composé de plusieurs pièces osseuses dont : les os maxillaires (2), les os zygomatiques (2), les os nasaux (2), les os palatins (2), les os lacrymaux (2), les cornets nasaux inférieurs (2), et l'os vomer.

Le seul os mobile de la face est la mandibule. Celle-ci s'articule avec l'os temporal par l'intermédiaire de l'articulation temporo-mandibulaire. Elle supporte les dents et est mise en mouvement lors de la mastication ou de la phonation.

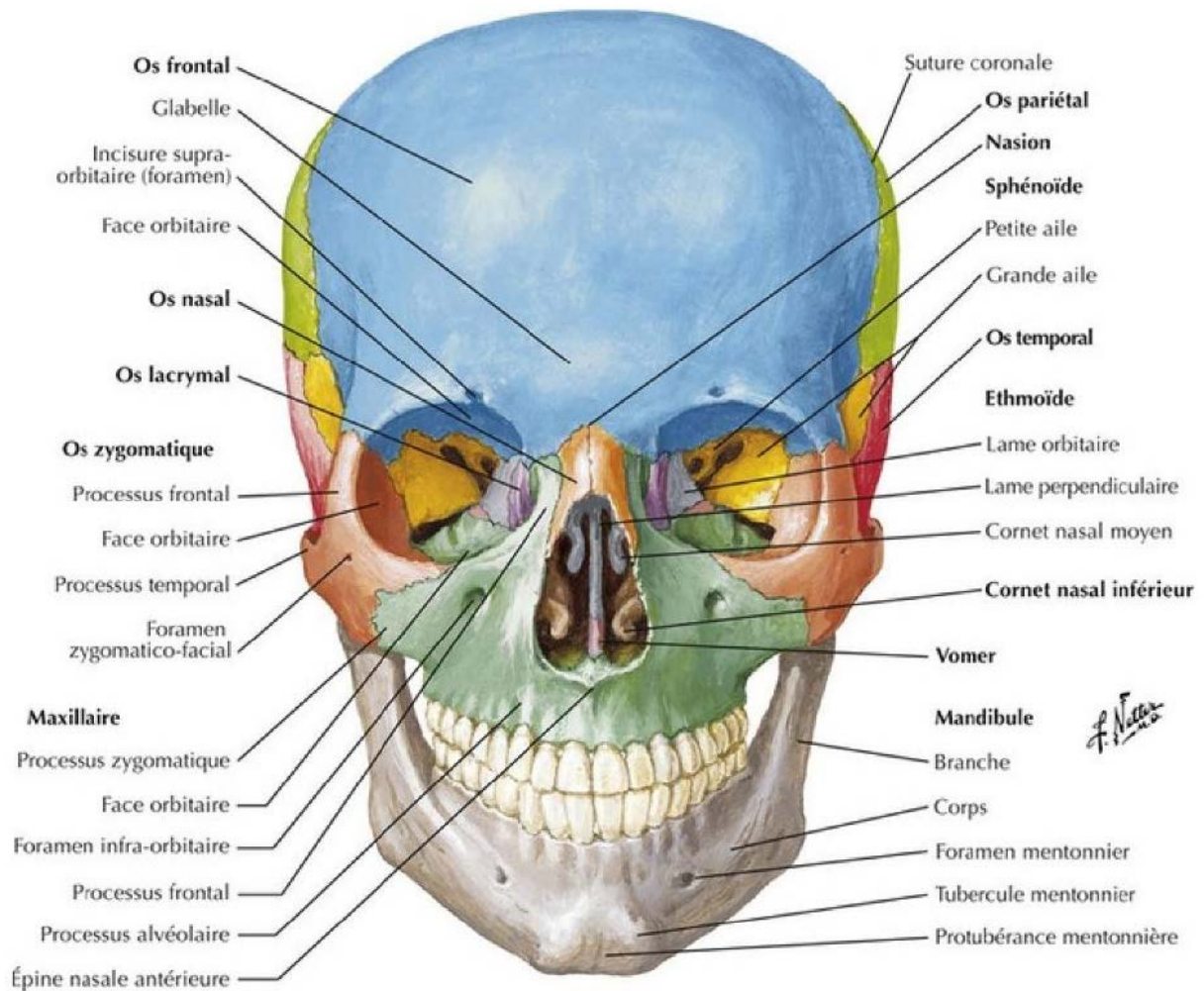


Figure 2 : Tête osseuse, vue antérieure. D'après Frank H. Netter [2].

1.1.2.1.2. Myologie

Hormis les muscles profonds assurant la fonction de mastication (masséters, temporaux, ptérygoïdiens médiaux et latéraux), la face est constituée de muscles peauciers (Figure 3), associés à la mimique.

La structure des muscles peauciers est particulière : ils présentent une insertion, généralement osseuse (Figure 4) et se terminent par une insertion cutanée (mobile) dans les couches profondes de la peau. Leur contraction permet donc un mouvement cutané externe responsable des mouvements de la mimique faciale.

Les muscles de la mimique sont innervés par le nerf facial (VII^{ème} paire de nerfs crâniens) alors que les muscles de la mastication sont innervés par le nerf V3 (nerf mandibulaire, branche du nerf trijumeau).

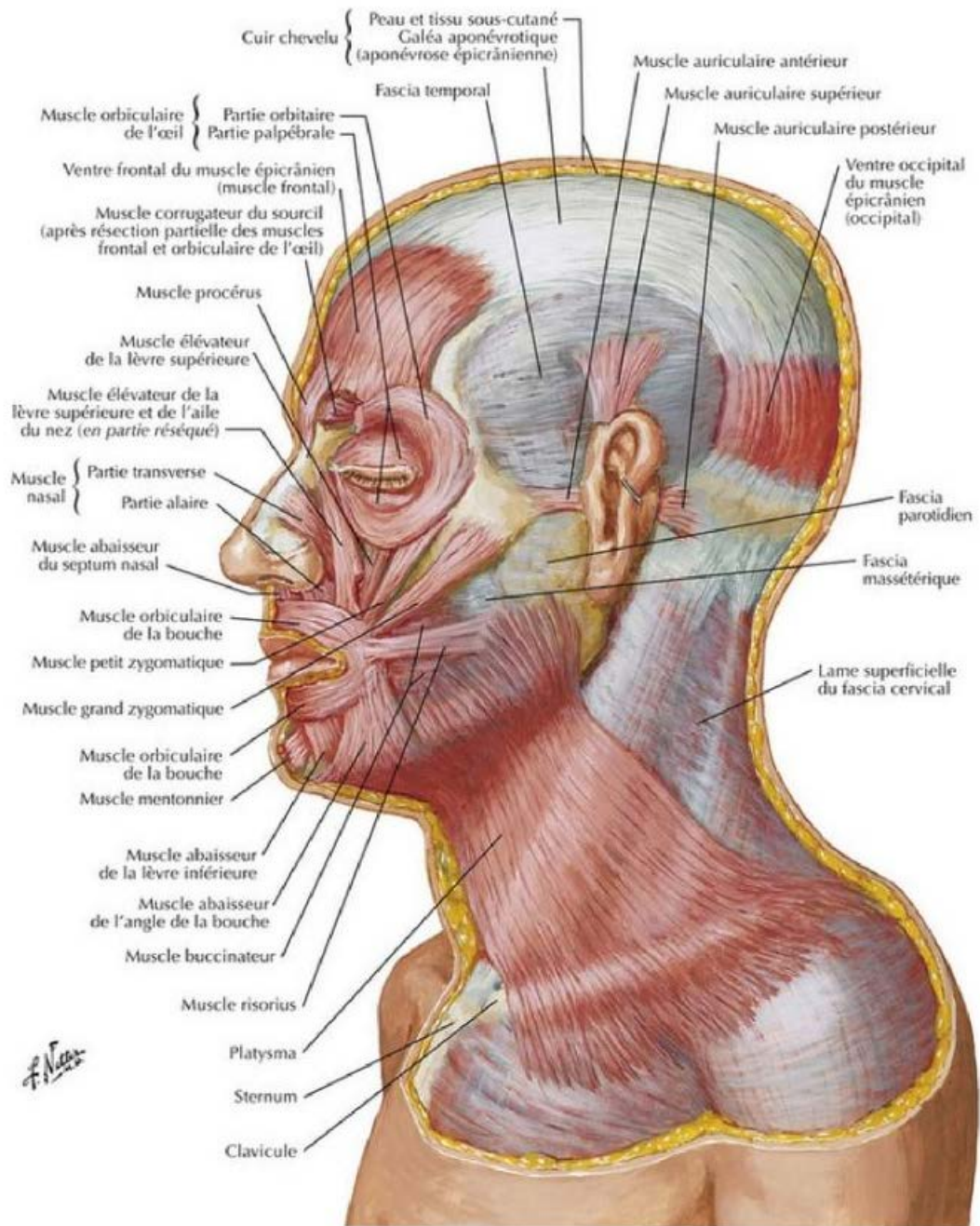


Figure 3 : Muscle de la mimique faciale. D'après Frank H. Netter [2].

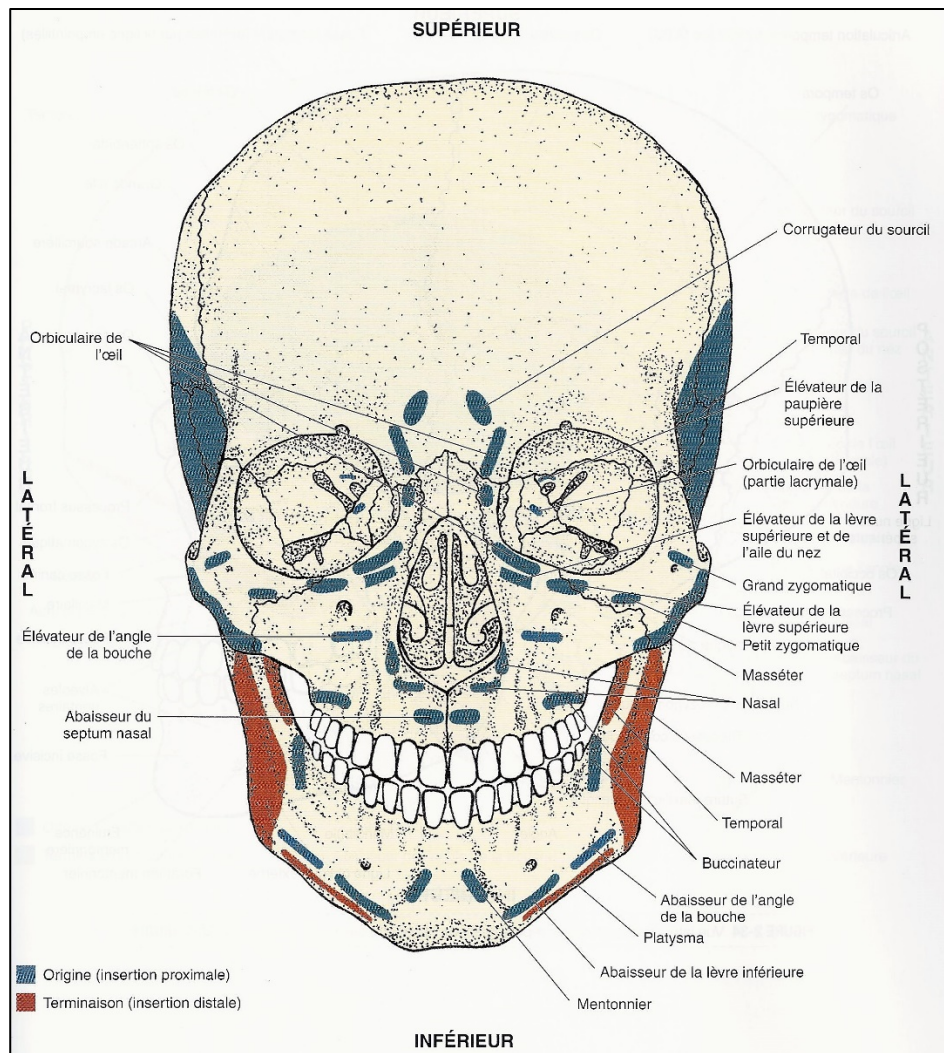


Figure 4 : Vue antérieure des sites d'insertion musculaire la face [3].

1.1.2.1.3. Action des muscles peauciers

Les muscles peauciers sont regroupés autour des orifices de la face. Ils peuvent ainsi être regroupés selon leur topographie :

- les muscles de paupières et des sourcils,
- les muscles du pavillon de l'oreille,
- les muscles du nez,
- les muscles des lèvres.

Leur action combinée va permettre une grande variabilité de mimiques, nécessaires à la communication non verbale. La Figure 5 décrit l'action de chacun des muscles de la face.

Les mouvements de la face sont permis par une combinaison de contractions et de relâchements des muscles dont les fibres sont imbriquées. **Ceux-ci agissent donc dans une synergie complexe.**

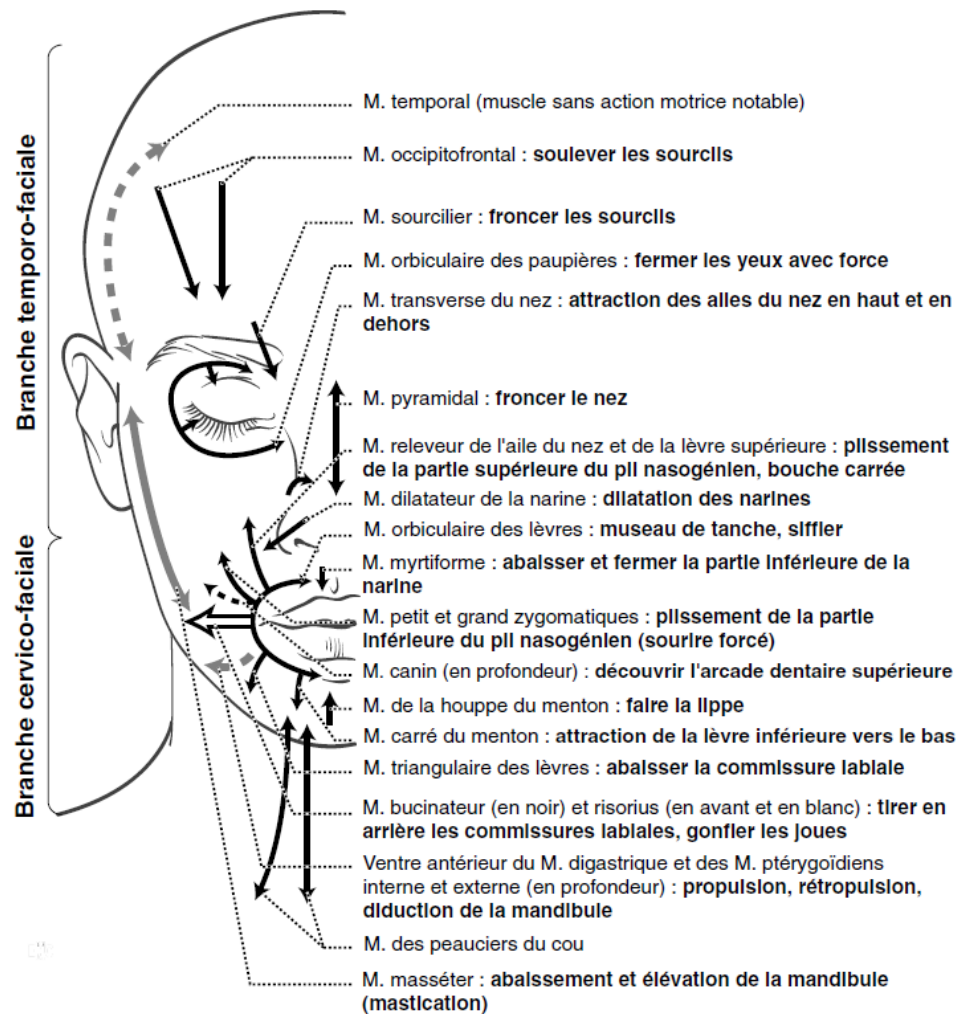


Figure 2 Vue antérieure schématique de l'hémiface droite. Les flèches noires : action des muscles innervés par le VII ; Les flèches grises : action des muscles innervés par le V3.

Figure 5 : Myologie fonctionnelle des muscles peauciers [4].

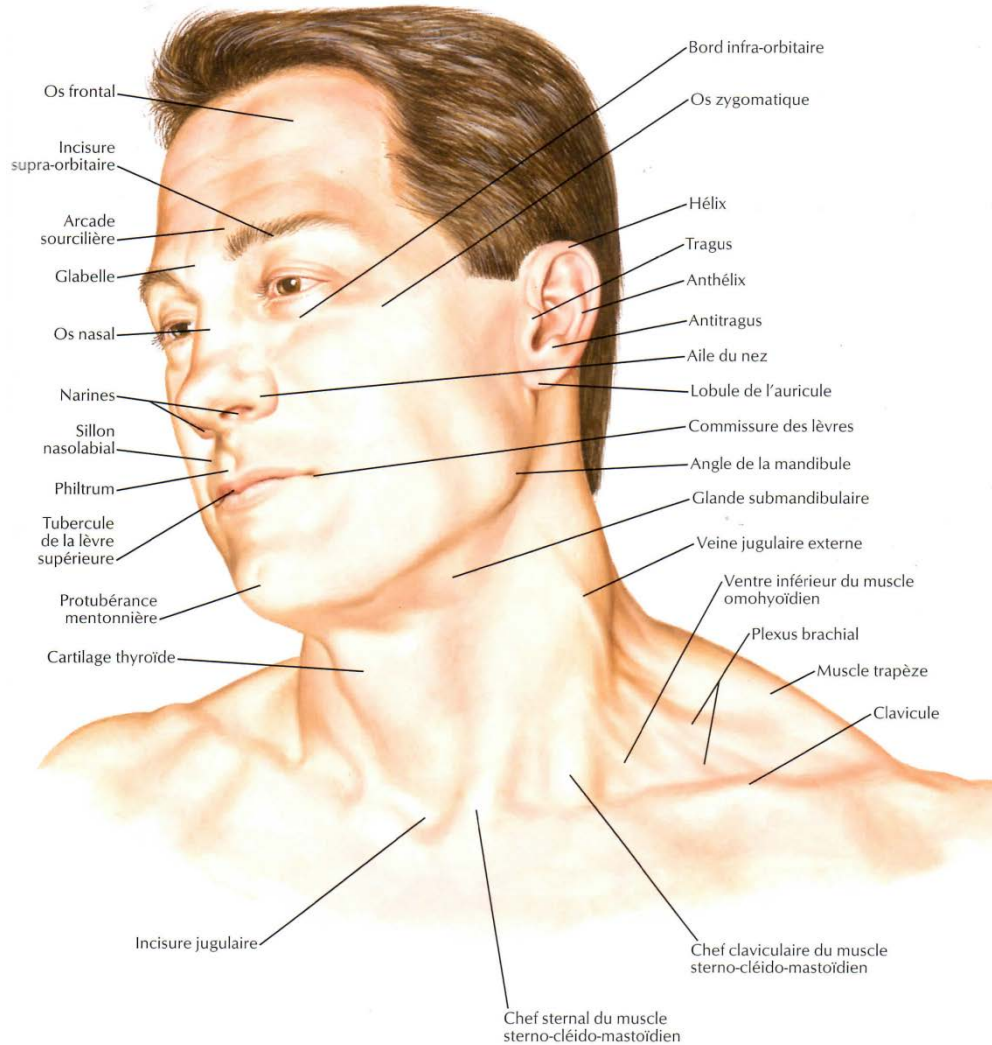
En synthèse, les mouvements de la mimique faciale sont donc permis par un système complexe composé :

- **D'un point fixe : le massif facial, pièce osseuse de la face.**
- **D'effecteurs musculaires : les muscles peauciers, avec au moins une insertion cutanée.**
- **D'une structure mobilisée : la peau, lors de la contraction des muscles peauciers de la face.**
- **D'une innervation : le nerf facial, qui assure l'innervation de l'ensemble des muscles de la mimique.**

1.1.2.2. Anatomie de surface

Les nombreux repères anatomiques (Figure 6) sont identifiables sur la face. Ceux-ci correspondent aux organes sensoriels, mais également à des repères osseux ou musculaires. Leur connaissance permet à l'examineur de définir un référentiel universel malgré de grandes variabilités interindividuelles :

- Organes sensoriels : yeux, nez, bouche et oreilles.
- Repères osseux : front, arcades sourcilières, glabelle, bords infra-orbitaires, os zygomatiques, angles des mandibules, et pointe du menton.
- Repères musculaires : paupières, narines, sillons naso-labiaux, lèvres, houppe du menton.
- Phanères : sourcils et cils.



C. Machado
© IGEN

Figure 6 : Anatomie de surface de la face. D'après Frank H. Netter. et al [2].

Les mouvements de la mimique faciale sont donc produits par une architecture complexe. Ceux-ci sont permis par un effecteur musculaire tendu entre une pièce osseuse fixe et la peau, qui est mobile. La complexité des mouvements faciaux s'explique par le grand nombre de muscles mis en jeux et par l'imbrication des fibres musculaires.

1.1.2.3. Variabilité inter-ethnique

Il existe des variations de forme et de dimension de la face en fonction des individus. Ces variations sont d'autant plus importantes lorsque l'on compare des individus d'ethnies différentes. Par exemple, il existe une différence de forme des paupières entre des individus caucasiens et asiatiques. Une revue de la littérature de 2011 [5] décrit le degrés de variabilité des dimensions de la face dans les différents groupes ethniques.

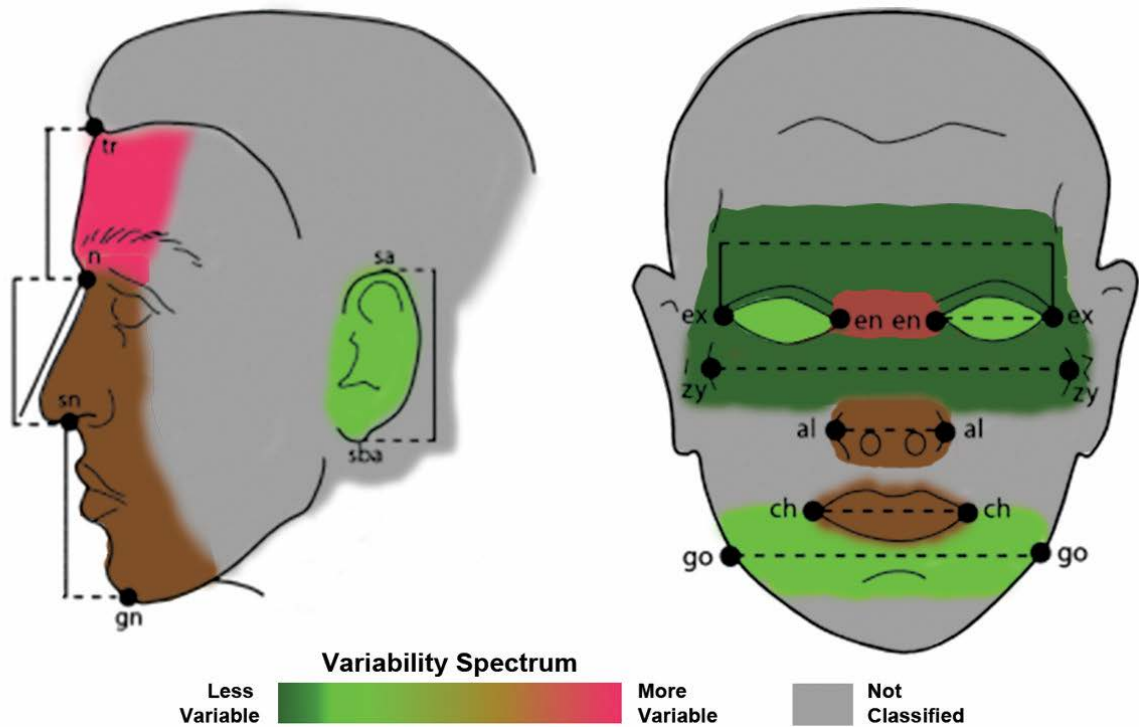


Figure 7 : Variations inter-ethniques des dimensions de la face [5].

La Figure 7 présente ces variations. Selon les auteurs, elles sont les plus importantes dans le plan sagittal et concernent la hauteur du front. Dans le plan frontal, c'est la largeur de la glabelle, du nez et de la bouche qui varient le plus [5].

Dans cette revue, les auteurs n'établissent pas de différence significative entre hommes et femmes.

1.1.3. Fonctions physiologiques de la face

Les muscles de la mimique participent aux fonctions de la face telle que la protection oculaire ou la compétence labiale.

1.1.3.1. *Le contrôle des fonctions de la face*

La face compte trois principales structures qui nécessitent pour leur bon fonctionnement une adaptation continue de leur niveau d'ouverture ou d'occlusion : les yeux, les orifices nasaires et la bouche.

1.1.3.1.1. *Les paupières*

Le clignement des paupières est un mouvement que reproduit plus de 10 000 fois par jour. Ce mouvement est nécessaire pour d'humidifier la cornée en maintenant un film lacrymal suffisant. L'absence d'occlusion des paupières induit un dessèchement nocif pour l'œil.

L'adaptation de l'occlusion palpébrale permet également de protéger l'œil des poussières grâce à la présence de cils à l'extrémité des paupières. Elle permet également de le protéger d'une luminosité douloureuse.

Ces mouvements, qu'ils soient volontaires ou réflexes sont permis par des contractions et décontractions synergiques complexes des muscles peauciers. Les deux muscles principaux impliqués sont l'orbiculaire de l'œil pour la fermeture, et le releveur de la paupière pour l'ouverture.

1.1.3.1.2. *Les narines*

D'un rôle plus discret chez l'homme que chez d'autres mammifères (évents des cétacés), les narines sont capables de se dilater ou de se refermer. Les muscles de la narine vont faire varier le débit d'air pénétrant dans les voies aériennes.

L'action de humer provoque également une dilatation des narines afin de faire pénétrer un maximum de molécules odorantes.

Le battement des ailes du nez est également un signe de détresse respiratoire retrouvé préférentiellement chez le nourrisson.

1.1.3.1.3. *La bouche*

La bouche est un organe doté d'une grande plasticité. Les grandes variations d'occlusion ou d'ouverture peuvent être symétriques ou non. Elles permettent de concourir à des fonctions essentielles :

- **L'alimentation** : les muscles péribuccaux forment un sphincter capable d'enfermer les aliments lors de la mastication ou de la déglutition. Ils permettent également la succion, et la préhension labiale.
- **La phonation** : la variation du calibre des lèvres permet d'enrichir les sons produits par les cordes vocales. Ils participent donc à la prononciation.
- **La respiration** : le mouvement des lèvres concourt à l'adaptation ventilatoire.

1.1.3.2. *L'expression faciale*

Les muscles de la mimique participent à l'expression faciale. Celle-ci permet d'extérioriser des sentiments par l'intermédiaire d'un langage non verbal.

Ce langage est permis par l'action simultanée et complexe d'un grand nombre de muscles de la mimique. Il peut exprimer des sentiments de joie (sourire), de tristesse, de peur, etc...

Une atteinte des muscles de la mimique entraîne une limitation des capacités de communication d'un individu, provoquant un handicap social certain.

Les muscles de la mimique ont donc des fonctions de participation et de protection des fonctions de la face (vision, odorat, respiration, alimentation). Ces fonctions, essentielles, sont complétées par l'expression d'une communication non verbale. La contraction des muscles peauciers peut être réflexe ou volontaire.

1.1.4. Pathologies de la mimique

Selon l'étiologie, les atteintes de la mimique peuvent toucher tout ou partie de la face. Cette section présentera les principaux tableaux pathologiques en fonction de leur origine : neurologique, neuromusculaire, cutané ou psychiatrique.

1.1.4.1. Pathologies neurologiques

1.1.4.1.1. Atteintes neurologiques centrales [4,6]

Les paralysies faciales d'origine centrale sont causées par une atteinte située au niveau du cortex moteur de manière controlatérale à l'hémiface touchée. Ces paralysies faciales sont rencontrées le plus fréquemment dans un contexte d'hémiplégie. Cette hémiplégie pouvant être causée par un accident vasculaire cérébral, un traumatisme crânien ou une tumeur cérébrale.

L'atteinte motrice de la face d'origine centrale est caractérisée par une localisation prédominante sur la partie inférieure de l'hémiface (Figure 8). En effet, une partie des fibres nerveuses de l'hémiface supérieure ne croisent pas ce qui permet de maintenir une certaine motricité du côté homolatéral à l'hémisphère sain.

D'autres troubles peuvent être observés à des degrés divers dans les pathologies neurologiques centrales : tremblements essentiels, myoclonies (contractions soudaines), ou encore fasciculations (contraction involontaire des faisceaux musculaires).

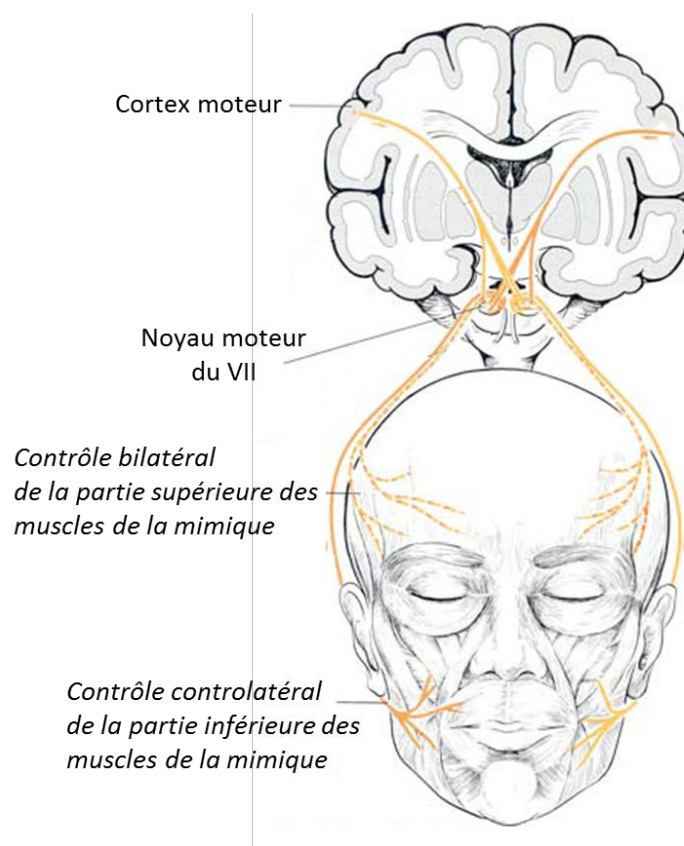


Figure 8 : Représentation schématique de la partie motrice du nerf facial. D'après Wilson-Pauwels (1988).

D'autres pathologies neurologiques centrales occasionne une perturbation de la mimique, par exemple :

- la sclérose en plaque, qui peut se manifester par une paralysie faciale.
- la maladie de Parkinson : le patient peut présenter des trémulations de la lèvre inférieure, un faciès inexpressif (amimie), et une rareté du clignement des paupières.
- les dystonies oro-mandibulaires, qui sont caractérisées par des contractions involontaires des muscles péribuccaux. Certains musiciens peuvent présenter des dystonies causées par l'usage intensif d'un instrument à vent.
- la maladie de Wilson, qui est une maladie génétique provoquant une anomalie du métabolisme du cuivre. Ses symptômes se manifestent notamment par une contraction anormale des muscles péribuccaux dit en « sourire sardonique ».

1.1.4.1.2. Atteintes neurologiques périphériques

Les paralysies faciales périphériques sont les plus fréquentes. Elles sont caractérisées par une atteinte en aval des noyaux moteurs du nerf VII. Les étiologies sont nombreuses : idiopathiques, traumatiques, tumorales, ou encore infectieuses. Le type d'atteinte et sa gravité (paralysie totale, partielle ou parésie) auront une répercussion sur le pronostic de récupération.

La paralysie faciale périphérique va se traduire par l'affaissement de l'hémiface atteinte. La perte du tonus musculaire entraîne une disparition des rides du front et des sourcils, un effacement du pli nasogénien et une inefficacité de l'occlusion labiale. La fermeture des paupières est également compromise, pouvant entraîner des complications ophtalmologiques. Un bavage est fréquemment observé, il est lié à une incontinence labiale (Figure 9).

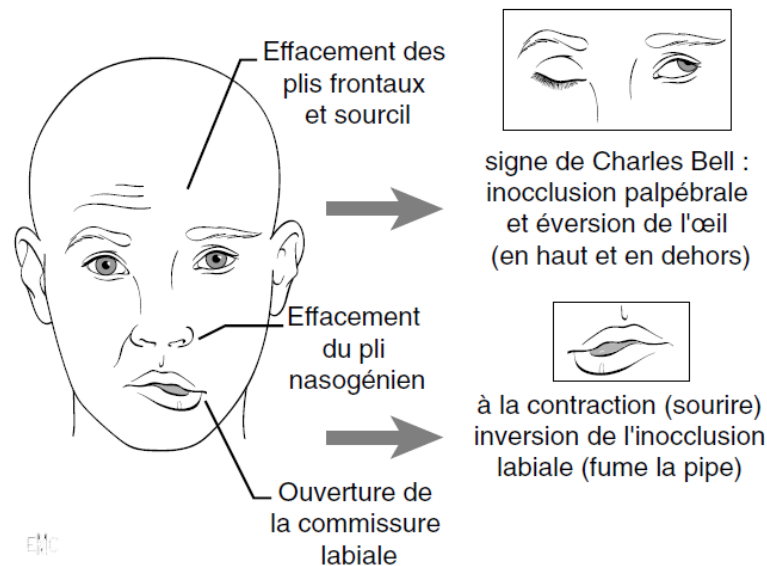


Figure 9 : Aspect morphologique d'une paralysie faciale périphérique gauche. D'après Taillia et al. [4].

Deux types de complications sont fréquemment observées dans les paralysies faciales : les syncinésies, les hypertonies ou spasmes [6].

Les syncinésies sont des contractions involontaires causées par une repousse nerveuse, innervant un territoire qui ne lui était initialement pas destiné. Il est généralement observé un clignement des paupières associé à un mouvement labial, ou inversement. C'est un mouvement « parasite ».

Les hypertonies sont des contractures musculaires anormales induisant une déformation du visage. Elles sont généralement localisées au niveau des muscles zygomatiques et des releveurs des lèvres.

- **La paralysie faciale *a frigore* ou idiopathique**

La paralysie *a frigore*, de Bell, ou encore idiopathique représente près de 80% des atteintes motrices d'origine périphériques avec une prévalence de 11 à 40 pour 100 000 personnes [7,8]. La cause n'est pas clairement identifiée, son apparition est généralement imputée à une infection virale (le plus souvent Herpes HSV).

Le traitement est généralement basé sur une corticothérapie associée à un suivi régulier et de la rééducation. La récupération survient généralement dans une période comprise entre 3 semaines et 9 mois. Le taux de séquelle est estimé à 30% [9]. Une réhabilitation chirurgicale peut être envisagée en cas de séquelles importantes.

- **Les autres étiologies de paralysies faciales périphériques [6,10]**

Les étiologies de paralysie faciale périphériques sont nombreuses, on peut citer pour exemple :

- Les traumatismes de la face et les fractures du « rocher » (segment de l'os temporal).
- Les causes tumorales, les plus fréquentes étant les neurinomes de l'oreille moyenne et externe, et les tumeurs malignes des glandes parotides.
- Des maladies infectieuses (maladie de Lyme, Zona auriculaire...). Et la complication d'un grand nombre d'affections : syndrome de Guillain-Barré, poliomyélite, rougeole, oreillons, mononucléose, lèpre, paludisme...
- Des maladies génétiques. Par exemple le syndrome de Moebius qui est une anomalie du développement des nerfs crâniens et provoque une diplégie faciale (paralysie bilatérale).

Les atteintes neurologiques de la motricité faciale vont conduire à un défaut de commande motrice. Selon la localisation et la gravité des lésions, le malade peut présenter des troubles moteurs (contractions anormales) ou une paralysie.

1.1.4.2. Pathologies neuromusculaires [6,11]

Des pathologies neuromusculaires peuvent également perturber la motricité faciale. Il s'agit généralement d'atteintes congénitales.

On peut citer en exemple :

- La myasthénie, qui est une maladie auto-immune caractérisée par une atteinte de la jonction neuromusculaire. Les patients présentent un faciès particulier : peu expressif, avec une pseudo-diplégie faciale, et des troubles labiaux (impossibilité de siffler).
- Les dystrophies musculaires et myopathies congénitales, par exemple la maladie de Steinert ou dystrophie myotonique de Steinert (Figure 10).

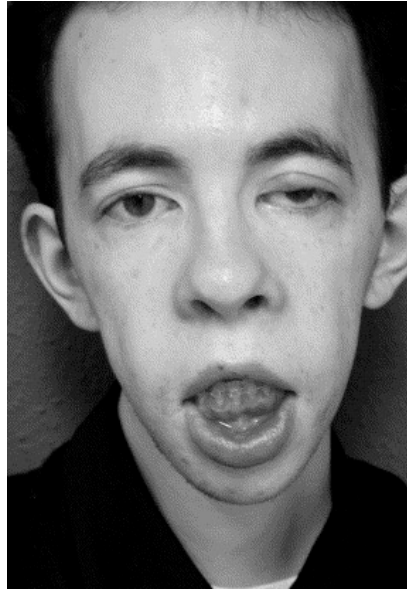


Figure 10 : Faciès caractéristique de la maladie de Steinert : paupières tombantes, bouche ouverte et atrophie musculaire [6].

1.1.4.3. Atteintes cutanées

L'altération des propriétés de la peau peut également être une cause de troubles de la mimique. Ainsi, la formation de brides cicatricielles chez les brûlés ou traumatisés faciaux peut entraîner des déformations faciales.

La modification des propriétés mécaniques de la peau, peut également aboutir à des troubles de l'expressivité, par exemple la sclérodermie et le syndrome de Parry-Romberg.

1.1.4.4. Atteintes psychiatriques [6]

Les tics sont des mouvements involontaires répétitifs. Ils peuvent toucher le visage, notamment dans le syndrome de Gilles de la Tourette où l'on peut observer un mimétisme de la mimique.

On retrouve des troubles de l'expression faciale chez les patients atteints du syndrome d'Asperger [12]. Des hypermimies (mimiques exagérées), hypomimies (mimiques atténuées), échomimies (reproduction des mimiques) ou paramimies (mimiques inappropriées) sont observées dans des pathologies psychiatriques comme l'hystérie, les démences, les syndromes confusionnels, ou la schizophrénie.

Les pathologies touchant la mimique faciale sont nombreuses. Elles affectent soit la commande (atteinte neurologiques centrales et périphériques), soit l'effecteur (atteintes neuromusculaires), soit l'élément mobilisé (atteintes cutanées). La composante émotionnelle et de communication de la mimique peut également être affectée par les pathologies psychiatriques.

Ces pathologies peuvent se manifester par :

- *une paralysie ou une parésie faciale ;*
- *une diplégie faciale (attente bilatérale) ;*
- *des troubles du tonus, tremblement, mouvements anormaux ;*
- *des séquelles : hypertonies, syncinésies ;*
- *des troubles de la communication non verbale.*

Les atteintes de la mimique auront pour conséquence un handicap plus ou moins important pour le malade : troubles de l'alimentation, de la vision, limitation de la communication, répercussions esthétiques et stigmatisation sociale.

1.2. État de l'art des moyens d'analyse adaptés à la mimique faciale déficitaire

L'analyse de la mimique peut se réaliser de manière qualitative ou quantitative. Une première partie traitera des méthodes d'analyses qualitatives : qu'elles soient descriptives ou sous forme de score. Une seconde partie traitera des méthodes d'analyse quantitatives, qu'elles soient instrumentales ou non.

1.2.1. Approche Qualitative

1.2.1.1. Méthodes descriptives

1.2.1.1.1. L'examen clinique de la mimique

L'examen clinique de la mimique consiste à réaliser un bilan neurologique et musculaire complet de manière à orienter le diagnostic. L'observation de l'aspect de la bouche, des yeux, des rides et de la motricité volontaire renseigne l'examineur sur la topographie et la gravité des lésions (Figure 11).

L'évolution clinique des atteintes faciales est évaluée par une observation et une palpation des tissus faciaux. Elles permettent une évaluation subjective du tonus musculaire, et des complications : rétraction des tissus, modification des lignes de la face.

Cet examen demande une participation active du patient à qui il va être demandé de réaliser successivement des mouvements caractéristiques des muscles et nerfs étudiés.

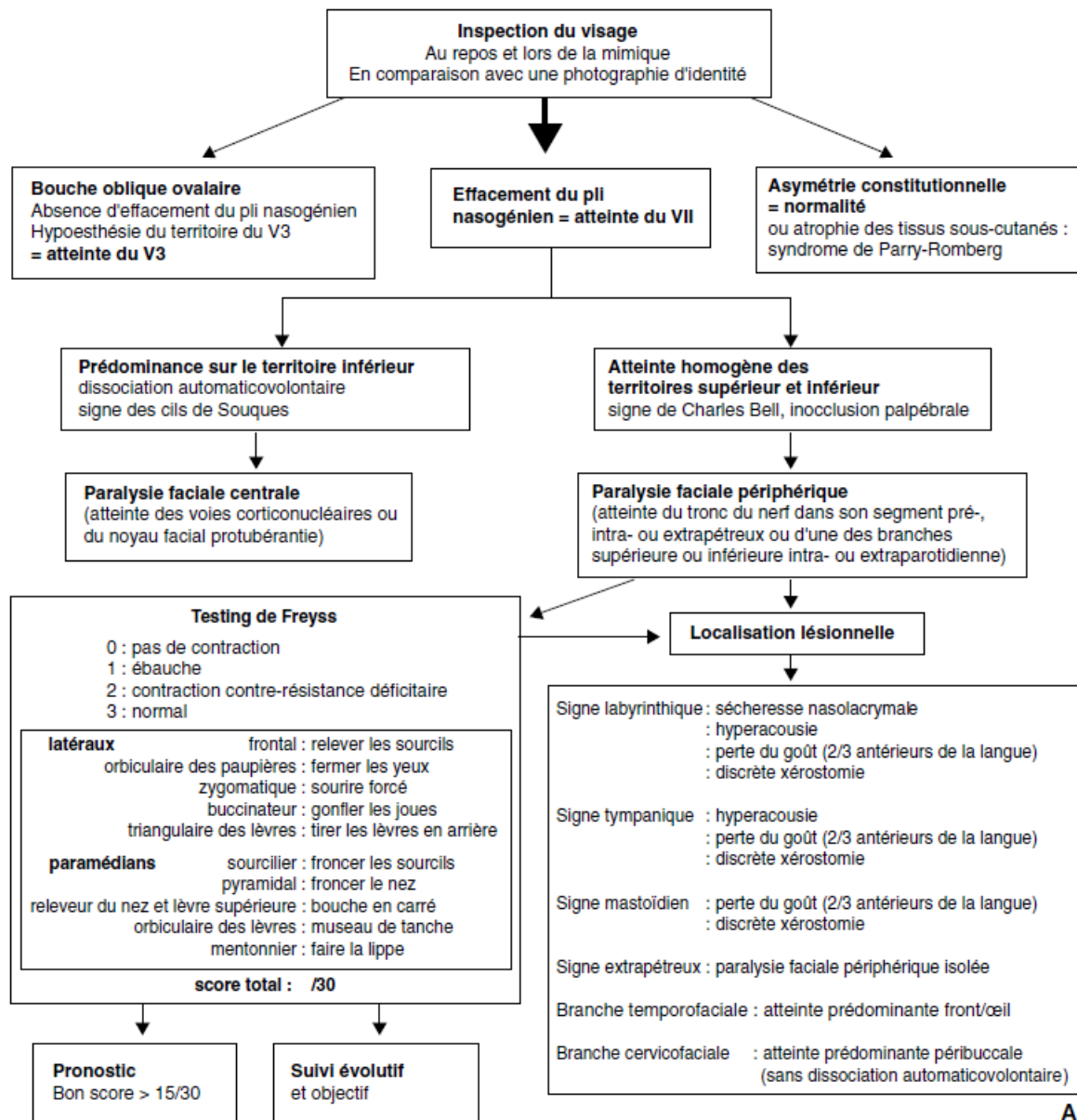


Figure 11 : Tableau récapitulatif de l'examen clinique d'une paralysie faciale d'après Taillia et al. [4].

1.2.1.1.2. Facial Action Coding System (FACS)

Incontournable lorsque l'on évoque la description et l'analyse des mouvements du visage, le *Facial Action Coding System* (FACS) [13,14] est un moyen de codage des expressions mis au point par Paul Ekman. Celui-ci décompose le visage en *Action Unit* (AU) correspondant aux différents éléments anatomiques de la face pouvant être mis en mouvement.

La combinaison d'AU sur le visage va correspondre à des expressions prédéfinies. Bien que centré sur l'émotion, ce système de codage est aujourd'hui une référence, puisque lui seul permet de coder de manière relativement objective le mouvement des éléments mobiles de la face et de la langue.

1.2.1.1.3. Moving Picture Experts Group,

Le MPEG ou *Moving Picture Experts Group*, est un groupe d'expert chargé d'établir des normes ISO en matière de traitement et de codage audiovisuel. Le MPEG-4 ou ISO/CEI 14496 définit notamment un standard pour l'animation du corps et du visage (MPEG-4 FBA)[15].

Celui-ci a défini 66 paramètres d'animations de la face (FAPs), permettant de représenter des actions basiques du visage. Ces paramètres sont encore insuffisants pour traduire des mouvements complexes [16].

Bien que peu adaptée à la clinique, cette norme peut servir de référence pour définir les unités de mouvement de la face.

1.2.1.1.4. MAX et AFFEX

Le « *Maximally Discriminative Facial Movement Coding System* » (MAX)[17] est un outil créé en 1979 Par C.E. Izard dans le but d'identifier les émotions de manière reproductible et objective sur les nourrissons et les jeunes enfants. L'auteur indique cependant que MAX est tout à fait adaptable chez l'adulte. Sur le même modèle que le FACS, l'auteur a défini des unités mouvements intitulés « Appearance Change » (AC) corrélés aux muscles peauciers de la mimique de la zone concernée. S'adjoint une description verbale de l'AC.

L'étude des changements d'apparence avec MAX étant très longue à mettre en œuvre, la méthode a été simplifiée afin d'identifier directement des émotions (*A system for identifying affect expressions by holistic judgments, AFFEX*)[18].

1.2.1.2. Évaluation, tests et scores

1.2.1.2.1. Les échelles globales

L'échelle de House et Brackmann[19] (*House Brackmann Grading Scale*) (HBGS) est l'échelle la plus utilisée aux États-Unis et en Europe pour l'évaluation des paralysies faciales périphériques (Tableau I).

Cette classification prend en compte les principales conséquences d'une paralysie faciale périphérique, à savoir **le mouvement volontaire, le tonus musculaire et l'asymétrie du visage**. Celle-ci permet de classer les patients dans des catégories générales sans prendre en compte les particularités de chaque atteinte.

| Grade | Description | Caractéristiques |
|------------|--------------------|--|
| I | Normal | Normal facial function in all areas |
| II | Parésie légère | Fonction motrice : faiblesse / syncinésie uniquement à l'examen attentif. Au repos , pas de déformation. Mouvements actifs : frontaux diminués, fermeture des paupières presque normale, de la bouche très diminués. |
| III | Parésie modérée | Fonction motrice : différence manifeste par rapport à l'autre coté, syncinésie, contracture. Au repos , pas de déformation. Mouvements actifs : frontaux encore présents, fermeture des paupières totale à l'effort maximum, de la bouche diminués. |
| IV | Parésie moyenne | Fonction motrice : asymétrie défigurante. Au repos , pas de déformation. Mouvements actifs : frontaux absents, fermeture des paupières incomplète, de la bouche asymétriques. |
| V | Parésie marquée | Fonction motrice : quelques mouvements résiduels visibles. Au repos : asymétrie (ptose de la commissure labiale, pli nasolabial effacé). Mouvements actifs : frontaux absents, fermeture des paupières incomplète, de la bouche asymétriques. |
| VI | Paralysie complète | Atonie, aucun mouvement. |

Tableau I : Classification de House et Brackmann modifiée.

L'échelle de Botman and Jongkees [20] est considérée comme l'une des premières classifications de la sévérité d'une paralysie faciale créée. L'observation globale de la face permet d'identifier l'un des 5 stades (de 0 à IV) de gravité (Tableau II).

| Grade | Signification |
|------------|---|
| 0 | Activité normale de la face |
| I | Parésie légère : normale au repos, parle normalement, les yeux peuvent être fermés, dissymétrie en riant ou sifflant. |
| II | Parésie modérée : normale au repos, asymétrie en riant ou sifflant, les yeux ne peuvent pas se fermer. |
| III | Paralysie sévère : asymétrie au repos, dysfonctions lors des mouvements. |
| IV | Paralysie totale : absence de tonus et perte de fonction. |

Tableau II : Classification de Botman et Jongkees.

L'échelle de Peitersen [21] est construite sur le même modèle (Tableau III).

| Grade | Déficits |
|------------|---|
| 0 | Pas de mouvements associés. |
| I | Légère paralysie et contractures inférieures à 1mm (juste visibles) sans mouvements associés. |
| II | Paralysie modérée avec des contractures bien visibles et des mouvements associés. |
| III | Paralysie sévère : défiguration, contractures et mouvements associés. |
| IV | Paralysie complète atone sans contractures ni mouvements associés. |

Tableau III : Échelle de Peitersen.

La classification de May [22] associe le grade de sévérité à l'étiologie de la paralysie faciale et à son pronostic de récupération (Tableau IV).

| Degrés de sévérité | Grade | Étiologie | Pronostic |
|---|-------|--------------------------------|---|
| Normale | I | Lésions incomplètes | Excellente récupération, mouvements appropriés, fermeture des yeux, sourire. |
| Légère (à peine perceptible) | II | Lésions incomplètes | Bonne récupération, mouvements appropriés, mais présence de mouvements parasites aux yeux et à la bouche. |
| Modérée (différence évidente) | III | Nerf sectionné après chirurgie | Passable : certains mouvements et symétrie, mais impossibilité de fermer les yeux totalement, incapacités orales. |
| Sévère (handicap - faiblesse, spasmes syncinésies) | IV | Nerf sectionné après chirurgie | Pauvre : rétablissement de la symétrie uniquement. |
| Pas de mouvements | V | Nerf sectionné | Défaillance : flaccidité de la face. |

Tableau IV : Classification de May.

L'échelle de Lazarini [23] est une version graphique de la classification de House et Brackmann. Celle-ci permet au praticien une évaluation visuelle plus rapide, tout en conservant un système de cotation largement répandu (Figure 12).













| Degree | At rest | Moving | Effort |
|--------|---|---|---------|
| I |  |  | Mild |
| II |  |  | Mild |
| III |  |  | Maximum |
| IV |  |  | Maximum |
| V |  |  | Maximum |
| VI |  |  | Maximum |

Figure 12 : Classification de Lazarini [23].

1.2.1.2.2. Échelles régionales

L'échelle de Smith (non référencée) segmente son évaluation en quatre zones (Tableau V). Un pourcentage d'atteinte est attribué à chacune de ces zones. Les pourcentages sont convertis en cotations. La somme de ces cotations est ensuite additionnée et divisée par 4 pour obtenir une moyenne globale.

| Échelle : | Correspondance : |
|-----------------|------------------------|
| 0 | Pas de fonction |
| I | 0 – 25% de la fonction |
| II | 25 – 50% |
| III | 50 – 75% |
| IV | 75 – 100% |
| Zones à coter : | |
| 0 à IV | Repos |
| 0 à IV | Rides du front |
| 0 à IV | Yeux |
| 0 à IV | Bouche |

Tableau V : Échelle de Smith.

Le « *Facial Paralysis Recovery Profile (FPRP)* » [24] (Tableau VI) reprend le même principe que l'échelle de Smith : l'évaluateur détermine à l'aide d'un pourcentage la qualité des mouvements du front, et de la bouche, ainsi que la fermeture des yeux. Le score est pondéré en fonction des zones atteintes. Il permet également le calcul du *Facial Paralysis Recovery Index (FPRI)*, qui va intégrer les complications de la paralysie faciale par un système de points négatifs.

| Site | 0 | 0%-25% | 26%-50% | 51%-75% | 76%-100% |
|--------|---|--------|---------|---------|----------|
| Front | 0 | +1 | +1 | +2 | +2 |
| Œil | 0 | +1 | +2 | +3 | +4 |
| Bouche | 0 | +1 | +2 | +3 | +4 |

Tableau VI : Facial Paralysis Recovery Profile (total sur 40 points).

L'échelle de Yanagihara [25] évalue en 40 points dix zones faciales (Tableau VII). Pour chacune d'entre elles un score entre 0 et 4 est attribué correspondant respectivement de paralysie totale à mobilité normale.

| | Échelle /5 | Échelle /3 |
|---|-------------|------------|
| Au repos | 0 1 2 3 4 5 | 0 2 4 |
| Froncement du front | 0 1 2 3 4 5 | 0 2 4 |
| Clignement | 0 1 2 3 4 5 | 0 2 4 |
| Fermeture non forcée des paupières | 0 1 2 3 4 5 | 0 2 4 |
| Fermeture forcée des paupières | 0 1 2 3 4 5 | 0 2 4 |
| Fermeture de l'œil coté paralysé | 0 1 2 3 4 5 | 0 2 4 |
| Froncement du nez | 0 1 2 3 4 5 | 0 2 4 |
| Sifflement | 0 1 2 3 4 5 | 0 2 4 |
| Sourire | 0 1 2 3 4 5 | 0 2 4 |
| Dépression de la lèvre inférieure | 0 1 2 3 4 5 | 0 2 4 |

Tableau VII : Échelle de Yanagihara, versions 5 et 3 items.

La « *Detailed Evaluation of Facial Symmetry* » [26] (DEFS) explore 5 mouvements (repos, relèvement des paupières, la fermeture simple et forcée des paupières, le sourire et le pincement des lèvres) à l'aide de photographies (Tableau VIII). Sur chacune des 5 poses, l'examineur identifie un pourcentage de mobilité correspondant à un score pondéré. Il est possible alors d'obtenir un score total de /100 points. Le DEFS a une bonne corrélation avec le HBGS, et permettant en plus une analyse régionale fine.

| Symétrie de la face | % | Points |
|--------------------------------|-----|--------|
| Repos | 0 | 0 |
| | 30 | 6 |
| | 70 | 14 |
| | 100 | 20 |
| Froncement du front | 0 | 0 |
| | 30 | 3 |
| | 70 | 7 |
| | 100 | 10 |
| Fermeture des paupières | 0 | 0 |
| | 30 | 9 |
| | 70 | 21 |
| | 100 | 30 |
| Sourire | 0 | 0 |
| | 30 | 9 |
| | 70 | 21 |
| | 100 | 30 |
| Sifflement | 0 | 0 |
| | 30 | 3 |
| | 70 | 7 |
| | 100 | 10 |

Tableau VIII : Detailed Evaluation of Facial Symmetry

Également cité dans la littérature [19], **l'échelle de Janssen** (Tableau IX) estime subjectivement la face au repos, le front, les yeux et la bouche à l'aide d'un pourcentage. Celui-ci est ensuite pondéré pour former un score global sur 100.

| Catégorie | Estimation par l'observateur en % | Multiplié par un facteur de pondération | Points |
|---------------|-----------------------------------|---|--------|
| Face au repos | 0-100% | 0.3 | 0-30 |
| Front | 0-100% | 0.1 | 0-10 |
| Yeux | 0-100% | 0.3 | 0-30 |
| Bouche | 0-100% | 0.3 | 0-30 |

Tableau IX : Janssen's Scale

Ross et al.[27] mettent au point en 1996 le **Sunnybrook Facial Grading System** (du nom de l'hôpital Sunnybrook à Toronto). Ce score pondéré sur 100, a été conçu afin obtenir une évaluation plus fine de la mobilité du visage que le HBGS, dans le but d'assurer un suivi plus performant des progrès des patients (Figure 13).

| Facial Grading System | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|------------------|---|-------------------------------------|---|-------------------------|---|-----------------|---|
| Resting Symmetry Compared to normal side | | Symmetry of Voluntary Movement Degree of muscle EXCURSION compared to normal side | | | | | Synkinesis Rate the degree of INVOLUNTARY MUSCLE CONTRACTION associated with each expression | | | | |
| Eye (choose one only) | | Standard Expressions Unable to initiate movement/no movement Initiates slight movement Initiates movement with mild excursion Movement almost complete Movement complete | | | | | NONE: No synkinesis or mass movement MILD: Slight synkinesis MODERATE: Obvious but not disfiguring synkinesis SEVERE: Disfiguring synkinesis/ Gross mass movement of several muscles | | | | |
| normal | 0 | | | | | | | | | | |
| narrow | 1 | Forehead Wrinkle (FRD) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| wide | 1 | Gentle eye closure (OCS) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| eyelid surgery | 1 | Open mouth Smile (ZYG/RIS) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| Cheek (naso-labial fold) | | Snarl (LLA/LLS) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| normal | 0 | Lip Pucker (OGS/OO) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| absent | 2 | Gross Asymmetry | | Severe Asymmetry | | Moderate Asymmetry | | Mild Asymmetry | | Normal symmetry | |
| less pronounced | 1 | Total | | Total × 5 | | Voluntary movement score: Total × 4 | | Synkinesis score: Total | | | |
| more pronounced | 1 | Resting symmetry score | | Total × 5 | | Vol mov't score | | Resting symmetry score | | Synk score | |
| Mouth | | Patient's name | | Dx | | Date | | Composite score | | | |
| normal | 0 | | | | | | | | | | |
| corner drooped | 1 | | | | | | | | | | |
| corner pulled up/out | 1 | | | | | | | | | | |

Figure 13 : Sunnybrook Facial Grading System, d'après Ross et al. (1996).

Alors que le Sunnybrook est basé sur 5 expressions standard, le **Sydney Facial Grading System** [28] se base sur les cinq zones faciales correspondant aux cinq branches du nerf facial (temporal, zygomatique, buccal, mentonnier, et cervical). Il comprend deux dimensions : des cotations de motricité pour chacune des zones (de 0 pas de mouvement, à 3 mouvement normal), et une cotation des syncinésies, exprimée sous forme d'une cotation globale allant de 0 (pas de syncinésies) à 3 (sévères syncinésies). Le Sydney Facial Grading System et le Sunnybrook présentent une corrélation importante pour l'évaluation motrice, en revanche l'évaluation des syncinésies est moins bien

corrélée entre les deux scores [29]. **Le Sunnybrook est actuellement reconnu comme étant le score plus robuste, son utilisation est recommandée en routine** [30].

Le Facial Disability Index [31] est un questionnaire d'autoévaluation du patient explorant l'atteinte des grandes fonctions de la face et de la qualité de vie consécutives d'une atteinte neuro-motrice. Il comprend dix questions à choix multiples (chaque réponse correspond à un score), le résultat s'exprimant sous forme de deux pourcentages : « Physical Function » et « Social Well-being Function ».

1.2.1.2.3. Les échelles analytiques : testing manuel

Le testing musculaire manuel (TMM) est la méthode d'évaluation de la fonction motrice la plus simple et la plus couramment utilisée en clinique. Cette technique consiste à apprécier la qualité de la contraction musculaire, en fonction d'échelles prédéfinies. Le testing est généralement utilisé dans les atteintes neurologiques périphériques afin de localiser l'origine du déficit, mais les échelles peuvent être facilement adaptées pour toutes les atteintes motrices.

L'échelle la plus couramment admise est celle du *Medical Research Council (MRC)* [32] qui propose 6 cotations allant de 0 (pas de contraction musculaire) à 5 (contraction normale contre résistance) (Tableau X). Certains auteurs ont affiné les cotations [33,34] en y insérant des nuances intermédiaires doublant ainsi le nombre de cotations possibles dans l'échelle.

| Cotation | Définition |
|----------|---|
| 0 | Absence de contraction décelable |
| 1 | Contraction palpable sans mouvement |
| 2 | Mouvement soustrait à la gravité (poids du segment) |
| 3 | Contraction contre la gravité |
| 4 | Contraction contre résistance |
| 5 | Force normale, comparativement au côté sain |

Tableau X : Testing musculaire, échelle MRC.

Sa réalisation ne nécessite aucun matériel spécifique : il est peu coûteux et peut être réalisé facilement par un médecin expérimenté, un kinésithérapeute, ou plus généralement par un professionnel de la rééducation.

Le testing manuel est cependant une méthode subjective car c'est l'évaluateur qui va déterminer la cotation en fonction de son ressenti.

La sensibilité du testing manuel est faible lorsqu'on se limite à l'échelle MRC classique, et l'augmentation du nombre de cotations le rend moins reproductible [35]. De plus, les principaux auteurs [36–38] préconisent des méthodes d'évaluation parfois différentes, incompatibles avec une évaluation standardisée inter-examineurs.

Le système de cotation du testing international (échelle MRC) s'applique mal aux muscles peauciers du visage. En effet, les effets de la pesanteur sur la peau sont bien plus discrets que sur un segment de membre ; en particulier chez le sujet jeune.

Ainsi, le testing facial utilise ses propres cotations, qui en l'absence de consensus international, varient en fonction des auteurs (Tableau XI).

| Testing de Chevalier[36] | Testing de Worthingham[37] |
|---|----------------------------------|
| 0 Absence de contraction | 0 Absence de contraction |
| 1 Légère mobilité du grain de peau | NF Mouvement non faisable |
| 2 Se mobilise d'avantage | FF Faible, faisable |
| 3 Se mobilise nettement | |
| 4 Se mobilise harmonieusement | F Faisable |
| Évaluation du tonus : de -2 à +2 | |
| Évaluation des Syncinésies : de 0 à 3. | |

Tableau XI : comparaison des deux principaux testings de la face.

Le testing clinique facial de Freyss [39] évalue la motricité de dix groupes musculaires à l'aide de quatre cotations allant de 0 à 3. Il évalue aussi le tonus, et les syncinésies, le résultat s'exprimant en un score global sur 30 points.

L'utilisation du TMM sur un sujet sain n'est pas pertinente : la cotation sera par définition maximale.

Le logiciel « Motricité Bucco-linguo-Faciale » [40] permet d'évaluer et de rééduquer la coordination musculaire des muscles linguaux et faciaux. Destiné à une rééducation orthophonique, il fait le pont entre une évaluation manuelle et instrumentale en cotant un muscle sur la base du testing à partir d'une photographie grâce à un principe de feed-back visuel.

Les échelles et scores d'évaluation de la mimique faciale sont nombreux dans la littérature. La plupart d'entre eux, dont l'échelle de référence (House Brackmann Grading Scale), reposent sur une description qualitative du mouvement. Ces évaluations sont donc basées sur l'observation, ce qui constitue un biais non négligeable dans l'analyse de la face. Elles posent également le problème de leur reproductibilité et donc du suivi à long terme de patients souffrant parfois de séquelles durables.

1.2.2.Approche Quantitative

Malgré les nombreuses méthodes d'évaluation des atteintes de la mimique existante, peu sont basées sur une mesure objective du déficit. Les progrès médicaux et chirurgicaux récents ont permis d'offrir de nouvelles possibilités thérapeutiques en matière de restauration des fonctions du visage. Dès lors il est devenu nécessaire d'évaluer de manière fine et reproductible les progrès individuels des patients afin d'évaluer l'efficacité des traitements.

C'est pourquoi depuis une quinzaine d'année, de nombreux auteurs ont cherché à mettre au point des méthodes d'analyse quantitatives de la mimique.

Nous n'aborderons pas dans cet section les techniques dédiées à l'étude statique (anthropométrie céphalométrie...) qui ne sont pas adaptées à l'étude du mouvement sain ou pathologique.

1.2.2.1. Méthodes non-instrumentées

Le score de paralysie faciale de Stennert [41] est le premier à introduire une notion de mesure linéaire du mouvement (Tableau XII). Cette évaluation se présente sous forme d'un questionnaire où chaque réponse positive compte 10 points sur un total de 100. Parmi ces questions, on trouve ainsi des notions d'écart en millimètres par rapport au côté sain. Un second questionnaire permet d'évaluer les défauts secondaires à une paralysie faciale (*Secondary Defect Facial Paralysis Score*) : syncinésies, spasmes, larmes, et contractures.

| Parameter Being Evaluated | Assessment |
|--|---|
| Resting tone: Difference between palpebral fissures | <input checked="" type="checkbox"/> 3 mm and more |
| Loss of nasolabial sulcus (if present on normal side) | <input checked="" type="checkbox"/> Yes |
| Drop of angulus oris | <input checked="" type="checkbox"/> Yes |
| Motility: Frowning (at least 50% of normal side) | <input checked="" type="checkbox"/> Not possible |
| Incomplete lid closure: | |
| Slight innervation (as in sleep) | <input checked="" type="checkbox"/> Yes |
| Maximal innervation | <input checked="" type="checkbox"/> Yes |
| Exposure of teeth: | |
| Canine teeth upper and lower | <input checked="" type="checkbox"/> Not visible |
| 2nd upper incisor (full width) | <input checked="" type="checkbox"/> Not visible |
| Whistling (decrease in distance between filtrum and angulus oris compared with normal side) | <input checked="" type="checkbox"/> Less than 50% |

Tableau XII : Facial Paralysis Score of Stennert

Le *Burres-Fisch Linear Measurement* [42] consiste à calculer un pourcentage de déplacement pour cinq mouvements (froncement du front, baiser, froncement du nez, sourire, et la fermeture serrée des paupières). Pour cela, les auteurs ont défini des lignes qu'il faut mesurer au repos et lors du mouvement. Il est possible également de calculer le pourcentage d'atteinte (*Linear Measurement Index*) par rapport au côté sain.

Le *Nottingham System* [43] a été créé dans le but d'obtenir un score moins complexe et chronophage que le Burres-Fisch. Quatre points sont placés sur le visage (points supra et infra-orbitaux, canthi externes et angles de la bouche). Le calcul du score se réalise en trois parties. Une première évalue le

mouvement volontaire (soulèvement des sourcils, fermeture forcée des paupières, et le sourire). L'écart de distance au repos et lors du mouvement est comparé au côté sain sous forme de pourcentage. Une seconde et une troisième partie expriment de manière qualitative les troubles moteurs (spasmes, contractures, syncinésies) et les grandes fonctions (trouble de l'audition, du goût et larmes de crocodiles). Le Nottingham System est de réalisation rapide (moins de 3 minutes) et mieux corrélé que le Burres-Fisch Linear Measurement au HBGS.

De réalisation encore plus simple, le *Facial Nerve Function Index* [44] (FNFI) consiste à mesurer la distance entre le canthus externe et la commissure des lèvres ipsilatérales. Mesuré au repos et lors d'un sourire lèvres fermées, le FNFI s'exprime sous forme d'un pourcentage de la fonction normale (Figure 14).

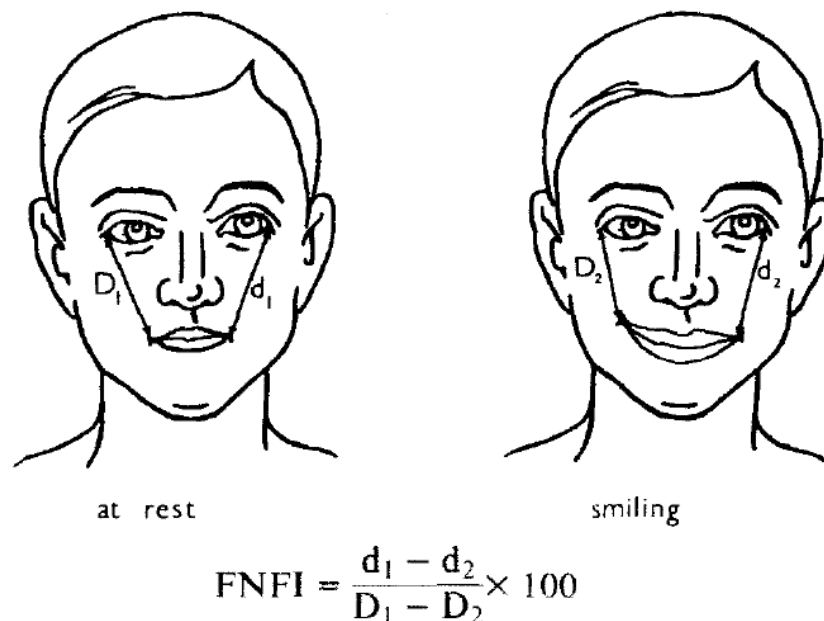


Figure 14 : Facial Nerve Function Index (FNFI) d'après Fields et Peckitt (1990).

En mesurant le FNFI sur 100 sujets normaux, Peckitt et al. [45] ont démontré que la distribution des résultats était très asymétrique. Ainsi, l'index ne prendrait pas en compte les asymétries naturelles de la face. Ils proposent donc une version modifiée appelée *Facial Nerve Function Coefficient*. Celui-ci correspond à la dérivée du FNFI : $\text{FNFC} = (D_1 - D_2) - (d_1 - d_2) / (D_1 - D_2) + (d_1 - d_2)$. Ce coefficient serait alors d'interprétation bien plus fiable.

1.2.2.1. Méthodes instrumentées

1.2.2.1.1. Testing quantifié

Il est possible de réaliser un testing musculaire quantifié (TMQ) en mesurant la force maximale volontaire en isométrique (FMV). Celle-ci se mesure à l'aide d'un dynamomètre placé à la perpendiculaire du segment à évaluer. Sa valeur s'exprime en Newton.

La force d'un muscle variant en fonction d'une relation tension-longueur, une mesure en Newton doit tenir compte de l'emplacement exact du dynamomètre sur le membre afin d'être reproductible. Afin de s'affranchir de cette contrainte, l'évaluation de la force musculaire peut s'exprimer en couple Newton-mètre (N.m). Le kinésithérapeute mesure alors la longueur du bras de levier du membre en mètre que l'on multiplie par la force en Newton.

Gatignol et al. [46] proposent une évaluation dynamométrique fonctionnelle du sphincter labial. Mais bien évidemment, il n'est pas possible d'obtenir de mesures pour les autres groupes musculaires composant la mimique du fait de l'absence de points d'ancrages.

Quelle que soit la méthode de testing musculaire utilisée (TMM ou TMQ), celle-ci reste dépendante de la participation du sujet et de sa fatigabilité. Il est également difficile de l'appliquer à des patients âgés ou présentant des troubles cognitifs.

1.2.2.1.2. Mesures centimétriques

Le faciomètre est initialement un instrument permettant une prise de mesure faciale pour le choix des tailles de masques faciaux de protection respiratoire. Le Faciometer® de Frey[47] reprend ce principe en réalisant des mesures millimétriques par l'intermédiaire d'un compas relié à un capteur digital (Figure 15). Le Faciometer a une précision d'un dixième de millimètre. Les auteurs ont mesuré la distance entre deux points au repos, et lors du mouvement maximal. Des distances standardisées ont été établies par les auteurs, permettant ainsi de comparer les valeurs mesurées sur le sujet pathologique.



Figure 15 : Faciometer®, d'après Frey et al. (1994).

Manktelow et al. [48] ont proposé un protocole permettant d'évaluer la sévérité d'une paralysie faciale au moyen d'une règle. La technique consiste à placer à l'aide d'un feutre cinq points sur les lèvres, et de mesurer leur distance au repos puis au sourire à l'aide de deux règles transparentes. La reproductibilité est bonne avec une différence moyenne de 1,7mm entre les mesures.

Tableau XIII : Échelles d'évaluations de la fonction motrice de la face.

| Analyse de la mimique | | | | | | | | | | |
|--|------------|---------|-------------|-----------|-------------|-------------|-----------|---|-----------------|---|
| TESTS : | Libre | | | | Instrumenté | | | Type d'évaluation (Musculaire analytique, Régionale, Globale) | Score composite | degrés de liberté |
| | qualitatif | | Quantitatif | | qualitatif | quantitatif | | | | |
| | nominal | ordinal | discrètes | Continues | | discrètes | continues | | | |
| <i>Botman and Jongkees System (1955)</i> | | x | | | | | | G | | 5 grades (0 à IV). |
| <i>Burres Fisch System (1986)</i> | | | | X | | | | R | x | 5 zones, un score global, avec des critères de gravité. |
| <i>Classification de May (1981)</i> | | x | | | | | | G | | 5 grades (I à V). |
| <i>Detailed Evaluation of Facial Symmetry (1997)</i> | | | | | x | | | R | x | Photographies, 5 mouvements, 4 cotations, scores pondérés, total /100. |
| <i>Échelle de Peitersen (1982)</i> | | x | | | | | | G | | 5 grades (0 à IV). |
| <i>Échelle de Yanagihara (1977)</i> | | x | | | | | | R | x | 10 régions, 40 points (0 à 4). |
| <i>Évaluation graphique de Lazarini (2006)</i> | | x | | | | | | G | | Version visuelle du House et Brackmann. |
| <i>Facial Action Coding System (FACS) (1978)</i> | | | x | | | | | R | | 46 AU (action unit) et 5 degrés d'activation. |
| <i>Facial Nerve Function Index (FNFI) (1990)</i> | | | | X | | | | R | | Évalue le sourire. Une mesure. Idem FNFC. |
| <i>Facial Paralysis Recovery Index (1971)</i> | | x | | | | | | R | x | FPRP avec points négatifs. |
| <i>Facial Paralysis Recovery Profile (1971)</i> | | x | | | | | | R | | 3 régions, score /10. |
| <i>Facial Paralysis Score of Stennert (1977)</i> | | | x | | | | | R | x | Explore au repos et la mobilité. Questionnaire oui/non. 100 points. |
| <i>House Brackmann Grading Scale (1983)</i> | | x | | | | | | | | 6 grades (I à VII) |
| <i>Janssen's Scale</i> | | x | | | | | | R | x | 4 régions, évaluation d'un %, coefficient de pondération, total /100. |
| <i>MAX – Affex (1990)</i> | x | | | | | | | R | | 31 unités d'actions évaluées. |
| <i>Motricité Bucco Linguo Faciale (2011)</i> | | | | | x | | | R | x | Testing sur photo et feedback visuel pour le patient. |
| <i>Nottingham system (1994)</i> | | x | | X | | | | R | | 3 mouvements étudiés, sur 4 points par hémiface, + signes associés qualitatifs. |
| <i>Smith Scale</i> | | x | | | | | | R | x | 4 zones, 4 cotations correspondant à un %, et moyennes. |
| <i>Sunnybrook (1996)</i> | | x | | | | | | R | x | 13 paramètres explorés, étude au repos, en mouvement et des syncinésies. |
| <i>Sydney Facial Grading System (1995)</i> | | x | | | | | | R | | 5 territoires du nerf facial, cot. 0 à 3. + 1 cot. Globale syncinésie 0 à 3. |
| <i>Testing clinique facial de Freyss (1971)</i> | | | X | | | | | M | x | 10 groupes musculaires, 4 cotations : score /30. |
| <i>Testing manuel Chevalier</i> | | | X | | | | | M | | 5 cotations, 20 muscles, échelle de tonus et syncinésies. |
| <i>Testing manuel Worthingam</i> | | | X | | | | | M | | 4 cotations, 8 groupes musculaires. |

Échelles d'extero-évaluation

1.2.2.2. Méthodes multidimensionnelles
1.2.2.2.1. En deux dimensions (2D)

- Techniques statiques :

Johnson et al. [49] ont mis au point une méthode d'analyse photographique par tracking à l'aide de points placés sur certains repères du visage. Les photos ont été superposées de manière informatique à l'aide d'une grille. Il a alors été permis une mesure millimétrique du mouvement des sourcils, du radix (glabelle), des paupières inférieures, du sillon naso-labial, du menton, et des commissures des lèvres par rapport à ces points sur un visage de repos

Sur le même principe, la vidéomimicographie [50] compare les images de contraction minimale et maximale de la face à l'aide de 11 marques placées sur un sujet filmé. Un index comparant côté sain et lésé est également proposé.

Le « *facial reanimation measurement system* » [51] est une technique simple consistant à filmer un sourire sur un patient sur lequel on aura préalablement collé une règle sur le menton et dessiné 9 points sur les lèvres et le nez. Les images d'amplitude minimale et maximale sont extraites et superposées informatiquement. Les auteurs obtiennent alors une image finale sur laquelle est mesurée la distance et l'angle parcouru à la fin du mouvement.

- Techniques dynamiques :

Neely et Cheung [52] ont développé une approche vidéo informatisée de l'évaluation de la mimique faciale pathologique intitulé « *Facial Analysis Computerized Evaluation* » (*FACE*). La méthode repose sur une analyse vidéo en 2D où sont identifiées les zones mobiles. Les auteurs ont pu ainsi mesurer des vitesses de contraction, mais aussi de mesurer les déformations dans des régions spécifiques du visage. Des données quantitatives comparatives du côté sain ont pu être obtenues sur des sujets pathologiques.

Wood et al. [53], ont comparé le sourire et la fermeture des yeux de sujets à l'aide d'une échelle de mesure générée par l'ordinateur (microscaling). Il s'agit d'une mesure statique, sans notion de vitesse.

Isono et al. [54] réalisent une capture vidéo sur des sujets sains et pathologiques sur lesquels ont été préalablement placés 24 marqueurs blancs. Le point placé sur l'apex nasal a été considéré comme fixe et a permis de calculer la distance en millimètre entre les autres points. Une différence significative entre les sujets sains et pathologiques a bien été mesurée, et il a été possible de calculer un ratio entre la mobilité de l'hémiface saine et de celle malade.

OSCAR, alias « *Objective scaling of facial nerve function based on area analysis* » [55] est une méthode basée sur la variation de la luminance (intensité lumineuse/m²) des mouvements de la face. Après avoir immobilisé la tête du sujet, les auteurs ont enregistré à l'aide d'une caméra vidéo noir et blanc haute définition trois mouvements : le sourire, la fermeture totale des paupières, et le froncement du front. La face est alors divisée en 3 zones dans lesquelles est mesurée la variation de luminance correspondant à chacun des mouvements. Les résultats montrent une bonne corrélation au HBGS et la réalisation s'avère simple et rapide.

Linstrom [56] utilise le « *Peak Motus Motion Measurement System* », un système de capture vidéo et d'analyse du mouvement qui a l'avantage d'être déjà utilisé pour l'appareil locomoteur en médecine physique, en orthopédie et dans le sport de haut niveau. Six marqueurs réfléchissants (pastilles autocollantes 3M) sont placés sur le visage. Deux mouvements ont été étudiés : la fermeture des yeux et le sourire lèvres fermées sur des sujets sains et des patients avec une mimique anormale. Ces mouvements ont été étudiés en 2D (un axe horizontal et un vertical). L'auteur conclut sur la validité du système dans l'exploration des paralysies faciales, notamment dans la possibilité de quantifier l'asymétrie du mouvement et les synchronisations.

En synthèse, les méthodes d'analyse en deux dimensions sont généralement plus simples et plus économiques à mettre en place. Cependant, la 2D est une approximation du mouvement. Cette imprécision peut rendre difficile une évaluation objective de la mimique.

Gross et al. [57] ont comparé l'amplitude de nombreux mouvements de la mimique à l'aide d'une capture en 2D (une caméra) et en 3D (3 caméras). Des marqueurs réfléchissants ont été placés sur la face afin de comparer les données obtenues. Les auteurs notent une différence notable entre l'amplitude des mouvements capturés en 2D et en 3D. Ceux-ci concluent que l'analyse 3D des fonctions de la face est la plus appropriée.

1.2.2.2. En trois dimensions (3D)

L'étude du mouvement en trois dimensions (3D) peut être réalisée à l'aide de deux types de technologies différentes. Il existe d'une part des techniques ne nécessitant pas d'appareillage particulier du sujet et d'autre part des techniques nécessitant l'utilisation de marqueurs.

1.2.2.2.1. Techniques sans marqueurs

- **Technique en lumière naturelle :**

Frey et al.[58] mettent au point un **système de miroir** autour du sujet, permettant une acquisition vidéo en trois dimensions. Un traitement informatique permet le calcul des distances et de générer un graphique tridimensionnel de déplacement de 18 repères anatomiques. La comparaison de l'amplitude des mouvements avec le côté opposé permet alors de quantifier le déficit.

- **Techniques de lumière structurée, technique du moiré :**

Ces techniques reposent sur une reconstruction 3D du visage étudié grâce à la projection sur le sujet d'une source lumineuse dont les propriétés sont connues.

Yuen et al. [59] exploitent la **technique du moiré**, qui consiste à projeter sur le visage de la lumière passant au travers d'une grille. L'alternance de largeur des bandes formées sur le visage permet ainsi d'estimer les reliefs et donc de calculer une profondeur. Les auteurs ont défini trois régions d'étude : naso-labiale, commissures et canthus interne. Les deux hémifaces sont comparées à partir de photographies et de manière à calculer un index : « *moiré topography index* ». Cet index montre une bonne corrélation avec le HBGS.

Mishima et al. [60] utilisent une technique de **lumière structurée** pour analyser le mouvement des lèvres. Ils projettent sur un sujet sain un damier, la capture est réalisée à l'aide de trois caméras infrarouges et une caméra couleur. Les mouvements de la tête sont compensés à l'aide d'un « casque » sur lequel sont imprimées des cibles. La zone labiale est arbitrairement découpée en 8 zones de mouvements. Le mouvement est exprimé sous forme d'un pourcentage pour chacune des zones concernées.

Le 3dMDface™ dynamic surface motion capture 4D [61] est un appareil permettant une capture par **photogrammétrie**. La projection d'une lumière blanche permet, sur le même principe que la vision stéréoscopique humaine, de modéliser une image en trois dimensions. Ce système est capable de réaliser des captures dynamiques à une fréquence de 60 frames par seconde. Le principal avantage de ce système est de permettre une capture rapide sans traitement, mais celle-ci est limitée pour des raisons techniques à 180° et durant 10 minutes. La précision annoncée par le constructeur est de 0.25mm. Popat et al. [62] ont utilisé le 3dMD pour analyser le mouvement des lèvres chez 25 sujets en comparant la reproductibilité de mouvements verbaux et non verbaux à 1 mois d'intervalle. D'autres systèmes basés sur le même principe existent comme le DI4D™, ou les Artec 3D Scanners.

En synthèse, ces techniques ont l'avantage d'être faciles d'emploi en diminuant de manière notable le temps de post-traitement. Cependant, la reconstruction 3D obtenue est générée par des algorithmes de calcul qui peuvent être une source d'approximation voire d'erreur.

1.2.2.2.2. Techniques avec marqueurs

- **Marqueurs actifs :**

Les marqueurs actifs sont caractérisés par le fait qu'ils émettent un signal (généralement infra-rouge) permettant de les identifier.

Dawes et Kelly proposent un système permettant l'étude de la fonction labiale durant la parole [63]. Pour cela, ils utilisent des marqueurs actifs (Figure 16) émettant un rayonnement infra-rouge. Les récepteurs (cellules photosensibles) sont placés sur un masque naso-buccal. Les auteurs ont mesuré les mouvements des lèvres au cours de la prononciation de certains mots par quatre sujets. Ils concluent sur une bonne reproductibilité intra et inter-sujet. Ils proposent l'outil comme pertinent pour l'analyse des troubles du langage.



Figure 16 : Marqueur actif de la marque Qualisys

En synthèse, la technique par marqueurs actifs à l'avantage de faciliter le post-traitement des données : il n'est plus nécessaire d'identifier chacun des marqueurs (tracking) et la précision est importante. Cependant, le nombre de marqueurs est limité, leur taille et la présence d'un fil complique sa mise en place sur la face.

- **Marqueurs passifs :**

Les marqueurs passifs ont la particularité d'être réfléchissants. Cette propriété leur permet de renvoyer un rayonnement infra-rouge émis par des caméras sensibles à une longueur d'onde spécifique. Cette technologie est utilisée notamment dans le cinéma d'animation, l'industrie et bien sûr l'analyse du mouvement à des fins cliniques ou de recherche.

Trotman et al. [64] mettent au point l'un des premiers dispositifs permettant l'exploration en trois dimensions de la mimique faciale déficitaire. Les auteurs ont capturé six mouvements à l'aide de 33 marqueurs réfléchissants de 4 mm et 4 caméras. Pour calculer le déplacement relatif des marqueurs faciaux par rapport à la tête, les coordonnées de 3 marqueurs supportés par la dentition ont été soustraites de celles des marqueurs placés sur la peau. Des essais sur des patients montrent une bonne sensibilité de la technique. Cependant, le nombre limité de marqueur ne permet pas de retranscrire l'intégralité du mouvement mais seulement des informations tridimensionnelles localisées.

Frey et al. [47] réalisent 16 captures statiques et dynamiques sur sujets sains à l'aide d'un système Vicon™ (quatre caméras et 18 marqueurs de 6mm). À partir de ces mesures, ils identifient trois points statiques ainsi que des points dynamiques représentatifs des différents mouvements faciaux. Ces repères sont utilisés pour réaliser les mesures à l'aide du « Frey's faciometer » (cf. 1.2.2.1.2).

Green et Wilson [65] s'intéressent en 2006 à la mobilité spontanée de la face des nourrissons. Ils réalisent dans ce but une analyse cinématique à l'aide de cinq caméras infra-rouge Vicon™ (60Hz) et de 15 marqueurs de 2mm (Figure 17). Les auteurs ont ensuite utilisé ces données pour mesurer l'amplitude des mouvements et leur vitesse.

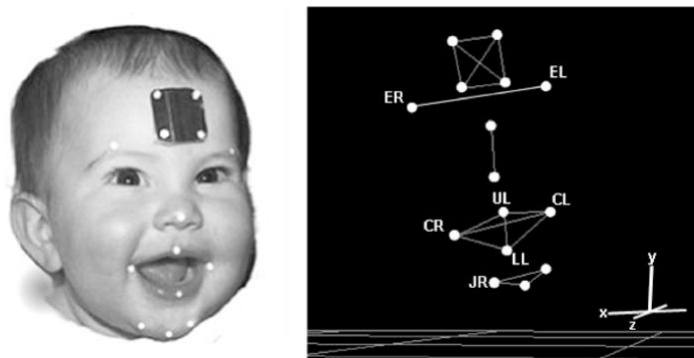


Figure 17 : Placement des marqueurs et modèle 3D d'après Green et Wilson (2006).

En 2008, **Hontanilla et Aubá** [66] mettent au point un système appelé le « Facial Clima ». Le système utilise trois caméras infrarouges à une fréquence de 50Hz et des marqueurs réfléchissants de 2mm. Les captures sont réalisées séparément sur la partie supérieure ou inférieure de la face avec

respectivement 17 et 21 marqueurs réfléchissants. Le système montre une bonne reproductibilité, et les auteurs suggèrent que cette technique serait pertinente pour être utilisée dans le cadre des réhabilitations de paralysie faciale.

Jorge et al. [67] ont cherché à évaluer de manière objective la contraction des muscles peauciers à l'aide d'un système Vicon™. Pour cela, ils ont placé 11 marqueurs réfléchissants d'un diamètre compris entre 9,5 et 4mm sur 12 sujets sains, la capture a été réalisée au moyen de 3 caméras T160 à une fréquence de 100Hz. Sur une série de mouvements, les auteurs concluent que les déplacements consécutifs aux contractions musculaires sont compris entre 11 et 13 millimètres.

Feng et al. [68] ont étudié la précision et la fiabilité d'un système de motion capture utilisant 6 caméras (100Hz) et 21 marqueurs de 3mm. Les résultats montrent une précision de l'ordre de 0,19mm et une bonne reproductibilité. Les auteurs concluent en indiquant que l'évaluation dynamique quantitative en 3D est compatible avec la pratique clinique : à la précision et la reproductibilité s'ajoute un temps de capture faible : moins d'une minute.

En synthèse, la technique de capture du mouvement par motion capture (avec marqueurs) présente l'avantage d'être d'une grande précision. Au vu des différentes études sur le sujet, la technique est utilisable sur la face, mais nécessite le développement d'un protocole spécifique afin d'explorer la cinématique faciale.

Tableau XIV : Analyse multidimensionnelle de la mimique

| TESTS : | Instrumenté | | Type d'évaluation (Musculaire analytique, Régionale, Globale) | Score composite | Degrés de liberté |
|--|-------------|-----------|---|-----------------|---|
| | quantitatif | | | | |
| | discrètes | continues | | | |
| <i>Multicamera linear measurements (Frey & al. 1994)</i> | | x | R | | Analyse 3D à l'aide d'un miroir et traitement informatique, mesures distances 18 repères anatomiques, dont 2 statiques médians. |
| <i>Moire topography Index (Yuen & al. 1997)</i> | | x | R | | Index calculé sur 3 zones, sur photo. |
| <i>MPEG4</i> | | x | R | | 66 points de référence et unités de mouvement. |
| <i>Neely et Cheung (1992)</i> | | x | R | | Analyse vidéo 2D : mesure des déformations. |
| <i>Johnson et al. (1994)</i> | | x | R | | Tracking photo de 6 zones. |
| <i>Wood et al. (1994)</i> | | x | R | | Comparaison de 2 vidéos, sur 2 zones. |
| <i>Isono et al.(1996)</i> | | x | R | | 24 marqueurs blancs, vidéo 2D, mesure de distances, calcul de ratio D/G. |
| <i>OSCAR (1998)</i> | | x | R | | 3 zones, mesure de la variation de luminance, 2D. |
| <i>Linstrom (2002)</i> | | x | R | | 2 zones (paumière, lèvres), 2D, marqueurs réfléchissants, synchronisations. |
| <i>Facial reanimation measurement system (2005)</i> | | x | R | | Superposition de 2 photos avec une règle, mesure de l'angle de de la distance. |
| <i>Videomimicographie (2000)</i> | | x | R | | Calcul d'aires à l'aide de 11 points sur un enregistrement vidéo. |
| <i>Trotman et al (1998)</i> | | x | R | | Mocap, Point fixe dentaire, 33marqueurs, 4mm, 4 caméras, informations localisées. |
| <i>Faciometer Frey (1994)</i> | | x | R | | Compas mesurant les distances au 10 ^{ème} de mm. |
| <i>Yuen et al. (1997)</i> | | x | R | x | Technique du moiré. Moiré topography index : % d'atteinte / côté sain. |
| <i>Mishima et al. (2005)</i> | | x | R | | Lumière structurée, point fixe (casque), zone labiale uniquement. |
| <i>Popat et al. (2010)</i> | | x | R | | Utilise le 3dMD pour analyser les mouvements labiaux. |
| <i>Dawes et Kelly (2004)</i> | | x | R | | Marqueur actif, analyse labiale du langage. |
| <i>Frey et al. (1994)</i> | | x | R | | Mocap, identifications de points hypomobiles et de points dynamiques représentatifs du mouvement. |
| <i>Green et Wilson (2006)</i> | | x | R | | Mocap, analyse des mvts spontanés des nourrissons. |
| <i>Facial Clima (2008)</i> | | x | R | | Mocap, 3 caméras, 2mm, capture d'une demi face à la fois seulement |
| <i>Jorge et al. (2012)</i> | | x | R | | Mocap, calcul des déplacements relatifs de la peau lors du mvt, gros marqueurs, 3 caméras |

Analyse multidimensionnelle

1.2.2.3. Méthodes d'électromyographie [69]

L'électromyographie (EMG) est une technique permettant le recueil des potentiels d'actions à l'origine des contractions musculaires. Cette technique est utilisée dans le diagnostic des atteintes neurologiques périphériques : elle permet de confirmer, de localiser et d'identifier un déficit neuromusculaire.

Il s'agit d'une technique quantitative, mais qui ne permet pas d'analyser le mouvement.

1.3. Revue des technologies de capture du mouvement humain « Motion Capture »

Afin d'identifier les technologies de capture du mouvement qui pourraient s'appliquer à la face, nous avons ici décrit les principales méthodes d'analyse du mouvement humain.

Il existe de nombreuses méthodes de capture du mouvement. Leur principe est d'enregistrer les mouvements d'un sujet pour les traiter informatiquement. Ces techniques peuvent être catégorisées en deux groupes : les méthodes de capture non optiques et les méthodes optiques. Les méthodes non-optiques vont utiliser des informations provenant d'autres sources que la lumière afin de reconstruire le mouvement (source magnétique, capteurs mécaniques). Les méthodes optiques utilisent quant à elle une source lumineuse (lumière visible, lumière noire, infra-rouges, laser). Ce sous chapitre se propose de décrire chacune de ces techniques et d'analyser leur pertinence en vue d'une capture de la motricité faciale.

1.3.1. Méthodes non-optiques

Trois méthodes de capture du mouvement n'utilisent pas la lumière comme source d'information du mouvement : les méthodes magnétiques, les exosquelettes, et les centrales inertielles. Ces techniques n'ont pas encore fait l'objet de travaux pour l'étude de la mimique faciale.

1.3.1.1. Méthodes magnétiques [70,71]

La capture du mouvement par méthode magnétique repose sur l'émission d'un champ magnétique sur le sujet en mouvement. Des capteurs placés sur le sujet mesurent les variations de champ magnétique et permettent ainsi de calculer leur position.

L'émetteur électromagnétique est appelé « antenne ». Il est composé d'un électro-aimant générant le champ détecté par les capteurs (bobines). Celles-ci sont positionnées sur les segments mobiles, il est alors possible de mesurer la position, l'orientation de ces capteurs dans les trois plans. La modélisation du mouvement en trois dimensions est alors générée de manière informatique.

La capture électromagnétique a l'avantage de ne pas être sensible à l'occultation et d'être précise (moins d'un millimètre).

Cette technique n'a cependant jamais été mise en œuvre sur la face, probablement à cause de la taille encore importante des capteurs (3x10mm). Les antennes ont également le désavantage d'être sensibles aux interférences électromagnétiques, fréquentes dans un environnement non isolé.

1.3.1.2. Méthodes mécaniques et gyroscopiques [71]

Les méthodes mécaniques de capture du mouvement utilisent soit le suivi angulaire des déplacements d'une articulation (exosquelette), soit des gyroscopes qui vont enregistrer l'inertie du mouvement (centrale inertielle). Elles permettent une capture du mouvement ambulateur.

Un exosquelette est une structure mécanique doublant le squelette humain de façon à accompagner les mouvements réalisés par le sujet. Des capteurs angulaires placés en regard des articulations peuvent ainsi enregistrer leurs déplacements. Les données relatives à la position des articulations peuvent ensuite permettre de calculer la position absolue du corps et de ses segments dans l'espace.

L'utilisation d'exosquelettes de capture du mouvement est limitée le plus souvent à des articulations simples avec un nombre limité de degrés de liberté. En effet, la précision des outils de mesure décroît

avec la complexité du mouvement. De plus, leur encombrement et leur poids peuvent altérer la spontanéité du mouvement.

Une centrale inertielle est un dispositif embarqué permettant de calculer la position d'un segment mobile à l'aide d'une série de capteurs mesurant la vitesse angulaire et l'accélération. Celle-ci est souvent combinée à d'autres types de capteurs car elle n'offre qu'une capture dynamique du mouvement.

Des sociétés comme Animazoo^{Ltd} ou Xsens commercialisent des systèmes de capture du mouvement basé sur des exosquelettes et des capteurs gyroscopiques (Figure 18) à des fins de recherche biomécanique, de robotique et de simulation.



Figure 18 : Gypsy-7 de Animazoo^{Ltd}, exosquelette avec gyroscopes (www.animazoo.fr).

1.3.2. Méthodes optiques

Les méthodes optiques de capture du mouvement sont les plus couramment utilisées. Leur fonctionnement repose sur des capteurs extérieurs (caméras) qui vont filmer un élément en mouvement. Le traitement informatique par triangulation des images permet d'obtenir une capture en plusieurs dimensions.

Il existe deux grandes méthodes de capture optiques : celles n'utilisant pas de marqueurs sur le sujet, et celles nécessitant la pose de marqueurs.

1.3.2.1. Sans marqueurs [71]

Les méthodes optiques sans marqueurs de capture du mouvement ont vu le jour avec l'avènement de la chronophotographie à la fin du XIXe siècle. Étienne-Jules Marey et Eadweard Muybridge font partie des pionniers de la discipline par leur analyse des mouvements humains en deux dimensions (Figure 19). Depuis, de nombreuses méthodes de capture du mouvement en deux dimensions ont vu le jour avec l'avènement de l'informatique.

C'est cependant à partir des années 1980 que la capture du mouvement en trois dimensions (3D) voit le jour. Plusieurs techniques sont mises au point, avec un même principe : la reconstruction en 3D est rendue possible par la multiplication des capteurs optiques. Les trois principales reposent sur l'utilisation de la lumière naturelle, de la lumière structurée ou des infra-rouges.

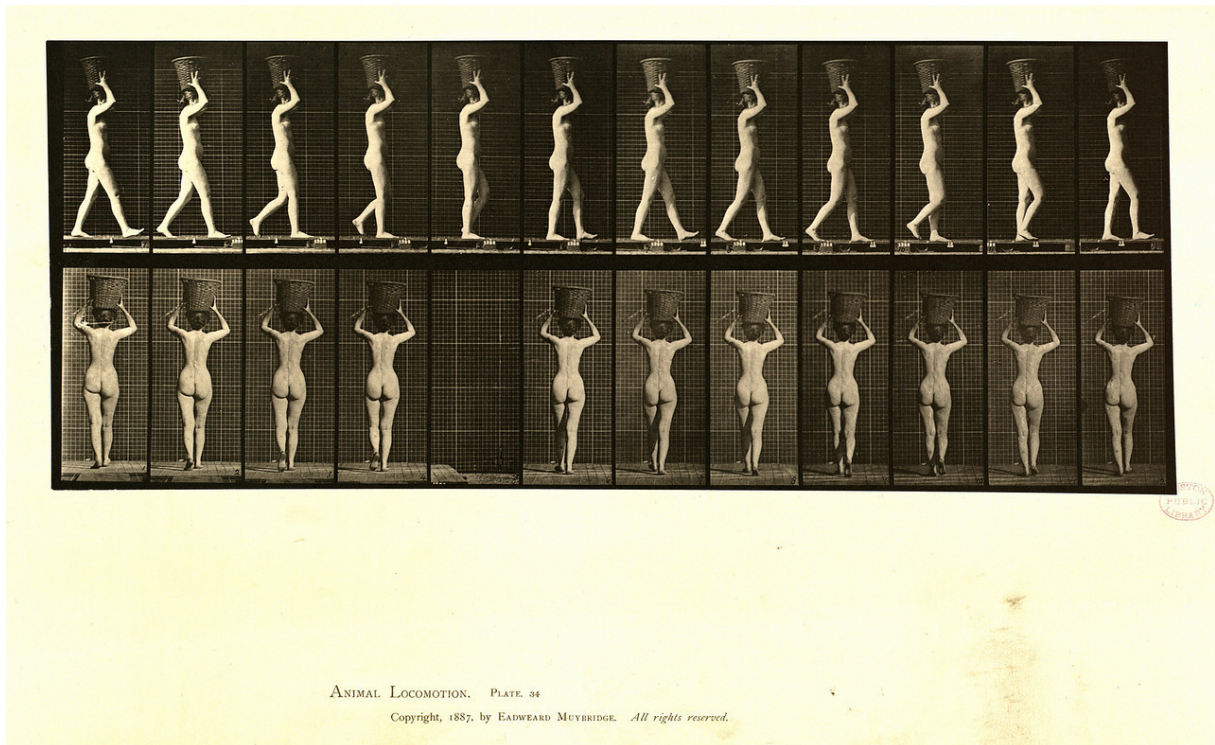


Figure 19 : Chronophotographie du mouvement humain - Eadweard Muybridge, 1887. (www.muybridge.org).

1.3.2.1.1. Méthodes 2D

Les méthodes de capture du mouvement en deux dimensions ont perdu beaucoup de leur intérêt depuis l'avènement de la 3D. Les principales techniques citées ici ont plus un intérêt historique que de réelles applications dans l'étude cinématique actuelle.

Le modèle de contour actif, ou « snake » permet la détection d'un contour en 2D et la segmentation des éléments d'une série d'images. Son utilisation permet donc de suivre et quantifier les déplacements des éléments d'une vidéo. Thalmann et al. [72] ont appliqué cette technique à la mobilité faciale en mesurant le déplacement de la bouche et des sourcils. Ils ont alors calculé des rapports théoriques du déplacement de ces deux structures lors de différents mouvements faciaux.

Le tracking de points (Figure 20) est une alternative : la technique consiste à fixer des repères arbitraires sur l'image et de suivre leur déplacement au cours du temps.

Les méthodes de flux optique vont consister à appliquer un vecteur de mouvement à un pixel ou une série de pixels de la vidéo analysée. On peut alors évaluer la direction et la vitesse du mouvement.

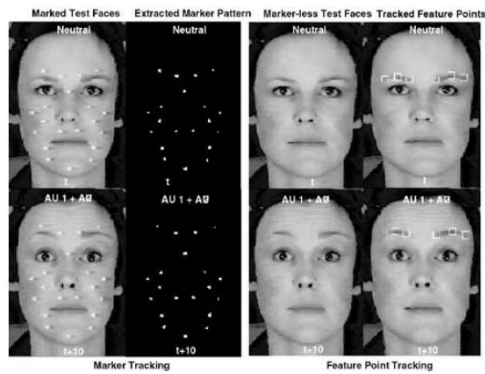


Fig. 6. Marker versus feature point tracking: On the left-hand side are shown two faces with affixed markers. The corresponding extracted marker patterns is depicted in the next column. Scale-normalized distances between marker points allow to determine underlying muscle activities [58]. A marker-less feature point tracking approach is shown on the right-hand side. Here, six feature points 10×10 pixel windows were used to determine the displacement of the eyebrows.

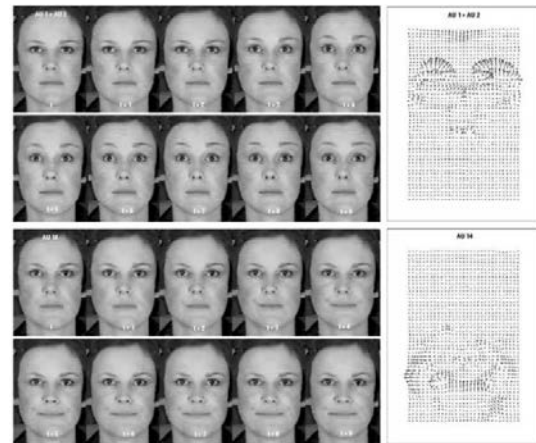


Fig. 5. Facial motion extraction using dense optical flow: Shown are two sample facial expression sequences on the left-hand side and the corresponding optical flow images on the right-hand side, which were computed with Nagel's algorithm [65]. Note the asymmetric facial action display in the lower facial expression sequence.

Figure 20 : Méthode de tracking à gauche, et de flux optique à droite. D'après Fasel et al. [73].

On trouve des applications à la face pour chacune de ces techniques. Cependant, l'étude de la cinématique faciale en 2D semble dépassée compte tenu de la technologie actuelle en 3D qui peut permettre d'évaluer les variations de profondeur, très nombreuses lors des mouvements de la mimique[74].

1.3.2.1.2. Méthodes 3D

L'acquisition d'une image, puis d'un mouvement en trois dimensions peut utiliser des techniques passives basée sur la stéréovision (à l'image de la vision humaine), ou des techniques actives nécessitant la projection d'une lumière dont les propriétés sont connues sur le sujet. L'obtention de données de profondeur (*depth map* ou carte de profondeur) permet de reconstituer le mouvement en 3D.

1.3.2.1.2.1. Techniques passives [75,76]

Les systèmes basés sur la stéréovision (Figures 21 et 22) reprennent le principe de la vision humaine. L'objet est ainsi filmé à l'aide d'au moins deux caméras avec un point de vue différent. L'image est ensuite reconstruite en 3D par calcul.

La technique peut être également réalisée de manière plus économique : une seule caméra capture alors le mouvement d'un visage avec un miroir de chaque côté permettant une reconstruction à l'aide des 3 angles de vue différents. [77]

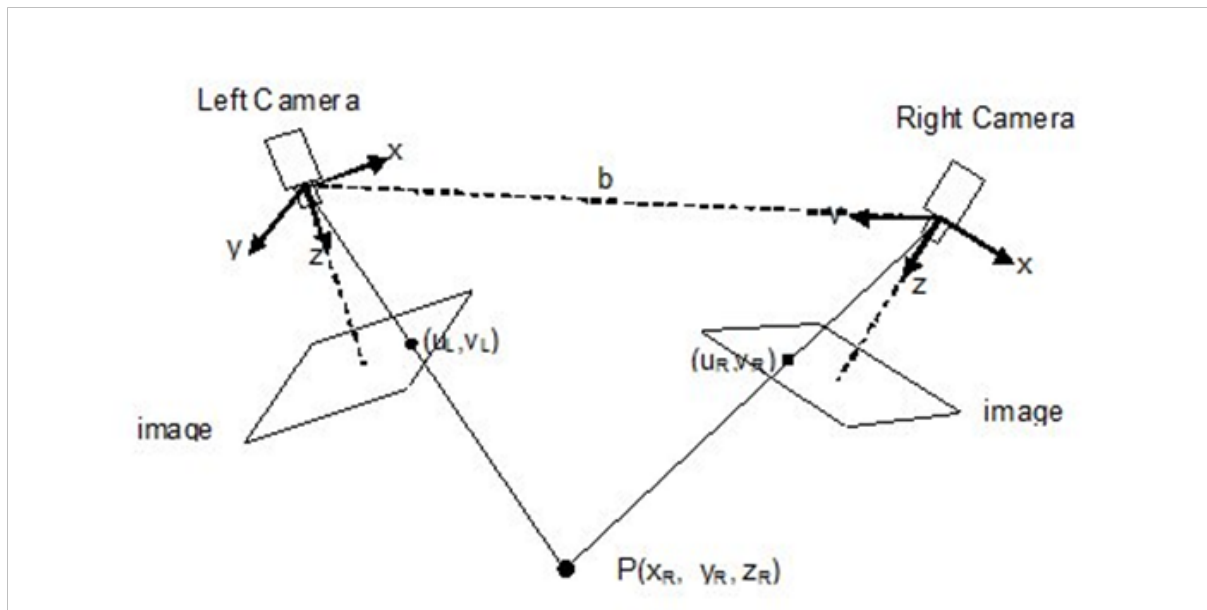


Figure 21 : La stéréovision repose sur deux caméras fixes dont la distance (b) est connue. Il est alors possible de calculer à partir des deux images 2D la profondeur. (www.ni.com).

La stéréo-corrélation d'image est également une méthode de capture passive. Elle repose sur la reconnaissance de la surface d'un objet, et mesure donc les déformations qu'il subit (stéréophotogrammétrie). Cette reconnaissance est permise par exemple grâce à l'application d'un mouchetis sur le sujet. Bradley et al. [78] ont pu reconstruire en 3D des faces en utilisant la texture du visage comme référence et en augmentant le nombre de caméras.

L'analyse du mouvement s'exprime dans ces techniques par des vecteurs de déplacement. Ceux-ci sont calculés par soustraction d'image à partir d'une référence.

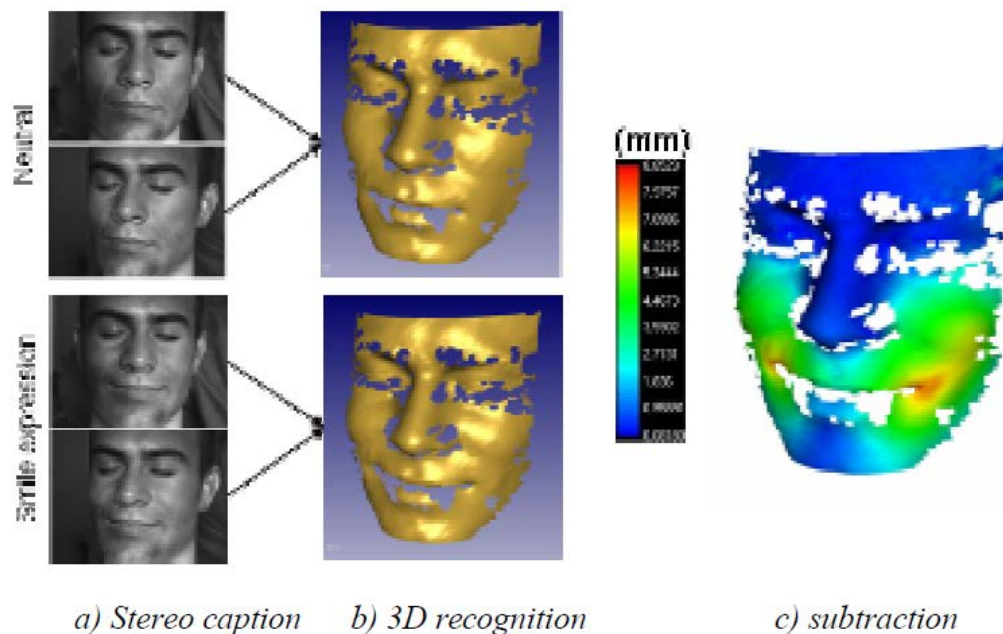


Figure 22 : Technique de stéréovision. D'après Samper et al. [76].

Compte tenu des particularités de la face : variations de texture, de couleur, zones d'ombres, l'utilisation de ces techniques nécessite un post-traitement important. Il est fréquent d'obtenir des discontinuités dans la reconstruction 3D, qui seront réparées à l'aide de logiciels spécialisés. Le résultat peut être visuellement très satisfaisant, cependant le traitement de l'image (reconstruction, et post-traitement) peut être une source d'erreur dans un contexte d'étude du mouvement.

1.3.2.1.2.2. Techniques actives [75,79]

Contrairement aux techniques « passives » qui ne se contentent que de capter une image, les techniques « actives » vont émettre une source lumineuse vers le sujet. Il existe plusieurs méthodes actives, mais la finalité est toujours la même : permettre de mesurer la profondeur des images capturées afin de réaliser une reconstruction en 3D.

1.3.2.1.2.2.1. Lumière structurée

La lumière structurée est une technique qui consiste à projeter sur le sujet un motif lumineux prédéfini (Figure 23). Le motif projeté sur le sujet va se déformer en fonction des reliefs du visage. C'est cette déformation, qui va être analysée par l'ordinateur pour construire l'image en 3D.

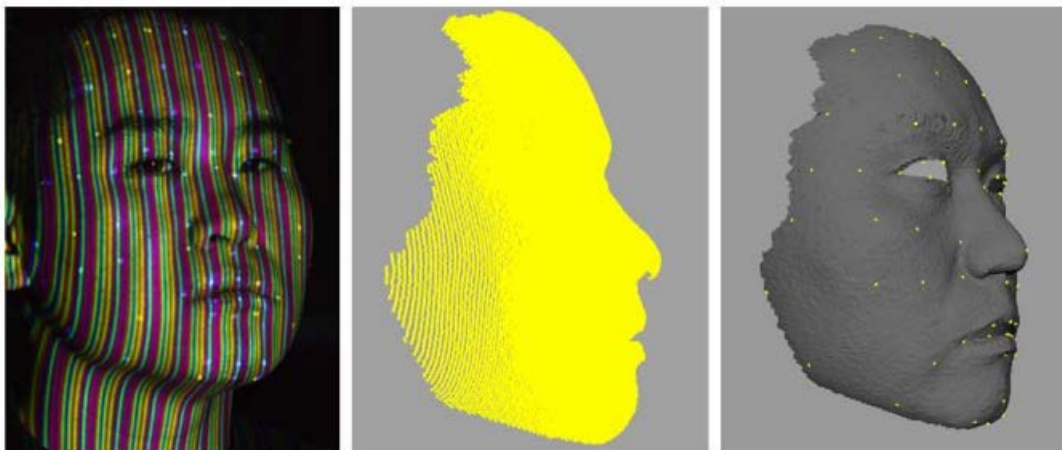


Figure 23 : A gauche, projection de lumière structurée ; au centre et à droite : reconstruction en 3D [79].

La Kinect™ de Microsoft® fonctionne sur le même principe en projetant dans l'espace des points de lumière infra-rouge. Une caméra infra-rouge capture alors les variations du champ de vision pour en déduire la profondeur de l'image.

Le principal avantage des techniques de lumière structurée est leur faible coût comparé aux autres techniques de capture en 3D. On retrouve cependant les mêmes inconvénients que les techniques de stéréovision : des images parfois incomplètes, et une approximation liée à la reconstruction informatique tridimensionnelle.

1.3.2.1.2.2.2. Temps de vol (ToF : Time of Flight) [80]

Les caméras temps de vol (ou time of flight) émettent une série de pulses lumineux (LED ou source de lumière infra-rouge) et mesurent le temps de parcours de l'influx lumineux jusqu'au sujet (Figure 24). Connaissant la vitesse de propagation de la lumière, il est alors possible d'en déduire la distance parcourue et donc la profondeur.

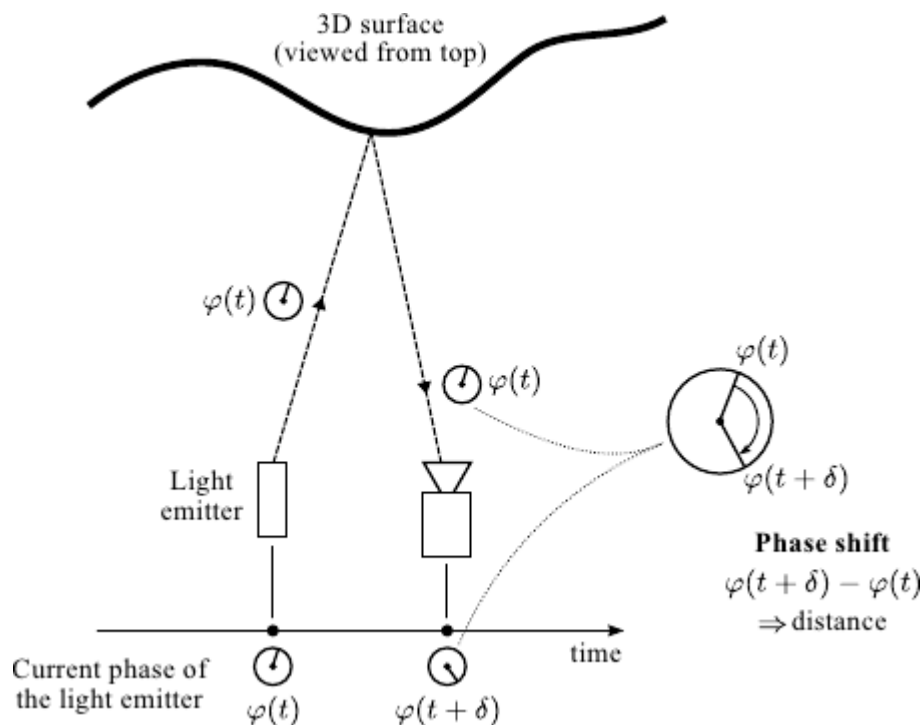


Figure 24 : Principe des caméras temps de vol. La caméra mesure le délai entre l'émission lumineuse et sa capture [81].

Les caméras temps de vol permettent une capture en temps réel et le dispositif est peu encombrant. Contrairement aux techniques de stéréovision et de lumière structurée, les données de profondeur (depth map) couvrent tous les pixels et on ne retrouve donc pas de phénomène de « trous » dans l'image 3D. Cependant, la technique est sensible aux interférences lumineuses et la résolution des images n'est pas très élevée.

Les techniques de capture du mouvement en trois dimensions utilisant des caméras actives permettent de réaliser des captures rapides et à faible coût. Mais qu'elles soient actives ou passives, les techniques optiques sans marqueurs présentent l'inconvénient de nécessiter un retraitement important des images obtenues. Les reconstructions 3D sont obtenues de manière artificielle en combinant plusieurs images 2D ce qui nuit à la précision des mesures.

1.3.2.2. Avec marqueurs [71]

Les techniques de motion capture avec marqueurs sont aujourd'hui parmi les plus utilisées dans l'animation, la médecine et la biomécanique. Dans ces méthodes, ce n'est pas le sujet lui-même qui est capturé mais des marqueurs placés sur les différents segments de son corps (Figure 25). Des caméras sensibles à une certaine longueur d'onde (généralement infra-rouge) vont suivre le déplacement de ces marqueurs. La position et le déplacement des marqueurs dans les trois dimensions sont ensuite calculés à l'aide de plusieurs caméras motion capture reliées à un ordinateur et préalablement calibrées.

On différencie de types de marqueurs en motion capture : les marqueurs actifs, et les marqueurs passifs.

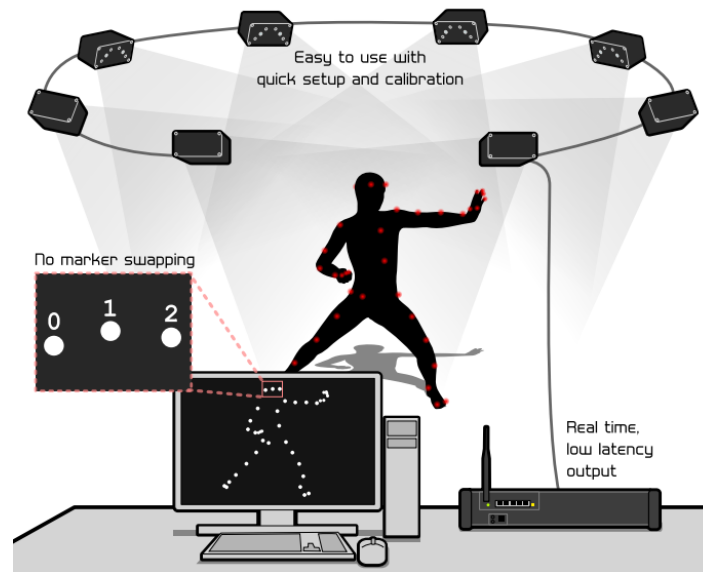


Figure 25 : Principe de capture à l'aide de marqueurs. Dans cet exemple, des marqueurs actifs. (www.phasespace.com)

1.3.2.2.1. Marqueurs Actifs

Un marqueur actif a la propriété d'émettre un signal qui va être perçu par le capteur. Ce signal, généralement une DEL émettant un rayonnement infra-rouge, est spécifique du marqueur. Il est capté par un ensemble de caméras équipées de cellules photosensibles qui sont identifiées automatiquement par l'ordinateur.

L'avantage des marqueurs actifs est de diminuer sensiblement le temps de traitement des données avec une capture instantanée. Cependant, les marqueurs peuvent être encombrants, limités en nombre, et la précision est inférieure aux marqueurs passifs.

1.3.2.2.2. Marqueurs Passifs

Un marqueur passif est une sphère réfléchissante de taille variable. Contrairement au marqueur actif, ce sont les caméras qui vont émettre un rayonnement infra-rouge en direction des marqueurs, qui vont alors le réfléchir pour être capturé. La position des marqueurs est alors calculée par triangulation.

L'étape essentielle, qui n'existe pas pour les marqueurs actifs est le « tracking » qui consiste à identifier les marqueurs tout au long du mouvement.

La motion capture par marqueur optique a une grande précision (précision de l'ordre du dixième de millimètre) [82]. Elle permet d'utiliser un grand nombre de marqueurs, avec de grandes fréquences de capture. Cependant, cette technique nécessite un post-processing important, et est coûteuse.

Selon la localisation des capteurs, les techniques de capture (Figure 26) du mouvement peuvent être également classées en trois catégories [71] :

- **Les systèmes « outside-in » :** le capteur est placé à distance du sujet et la source est placée sur le sujet. C'est le cas des techniques de motion capture optiques.
- **Les systèmes « inside-out » :** le capteur est placé sur le sujet, la source est placée à l'extérieur. C'est le cas de la capture électromagnétique.
- **Les systèmes « inside-in » :** la source et le capteur sont placés sur le sujet. C'est le cas des méthodes mécaniques et gyroscopiques.

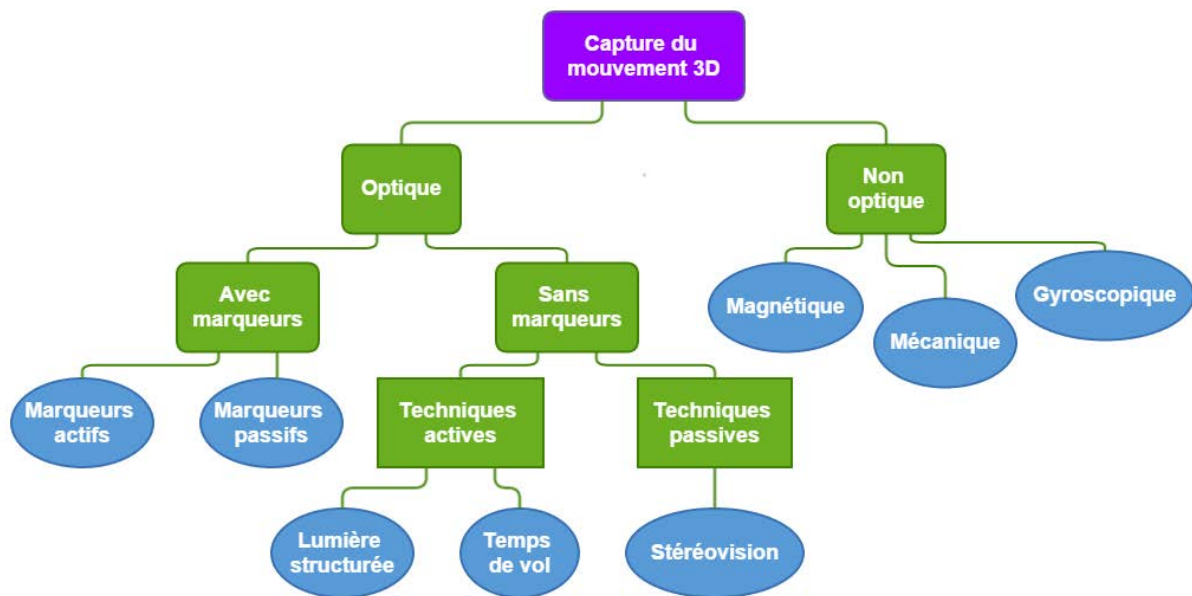


Figure 26 : Synthèse des méthodes de capture du mouvement en 3D.

1.4. Problématique

Les mouvements de la face reposent sur une architecture complexe. Ainsi, dans un contexte pathologique, l'analyse de la mimique requière généralement l'intervention d'un professionnel de santé expérimenté. L'évaluation des déficits de la mimique, dont les séquelles de paralysie faciale, est pourtant indispensable pour traiter au mieux le patient.

L'étude de la littérature a mis en évidence l'hétérogénéité des techniques d'évaluation et d'analyse des mouvements humains, et de surcroît de la mimique :

- Les méthodes d'investigation et d'évaluation cliniques reposent principalement sur une analyse qualitative et une mesure subjective du déficit. Elles sont aujourd'hui les seules utilisées en routine.
- Les méthodes d'analyse du mouvement font appel à des technologies très différentes selon les auteurs sans qu'aucune ne se soit imposée dans l'analyse de la mimique.

Pourtant, les pathologies de la mimique évoluent pour la plupart sur le long terme et nécessitent parfois le recours à des méthodes de réhabilitation complexes et invasives. Afin d'optimiser les choix thérapeutiques, d'améliorer le suivi des patients et d'évaluer les traitements, il apparaît nécessaire de développer une technique d'évaluation capable de :

- Quantifier un mouvement de la face
- Fournir des données comparatives dans le temps
- Identifier et localiser un déficit moteur ou un mouvement anormal.

L'objet de cette thèse est donc de répondre à la question suivante :

Est-il possible de quantifier de façon fiable et robuste la mimique à des fins cliniques ?

Dans le cadre de ce travail de thèse, ont été réalisées :

- La mise au point d'un protocole d'analyse des mouvements de la face.
- L'acquisition de la cinématique du visage au moyen de capteurs cutanés externes et de la technologie de motion capture.
- L'exploration et la détermination de paramètres pertinents, fiables et reproductibles objectivant les fonctionnalités des structures anatomiques sous-jacentes responsables des mouvements faciaux.
- La détermination de mesures de référence pour la mimique faciale sur une population saine.

CHAPITRE 2 : MATÉRIEL ET MÉTHODE

2. Matériel et méthode

Ce chapitre détaillera la population d'étude, le matériel utilisé, le protocole mis en place, le traitement des données et leur exploitation.

2.1. Autorisations et respect de la législation en matière de recherche biomédicale

Conformément au code de la Santé Publique, titre II du livre premier relatif aux recherches biomédicales, et aux dispositions de la loi n°2004-801 du 6 août 2004 relative à la protection des personnes physiques à l'égard des traitements de données à caractère personnel et modifiant la loi n°78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés et des lois subséquentes qui l'ont modifiée, le projet a été soumis aux demandes d'autorisation avant le début des travaux :

Numéro ID-RCB : 2011-A00532-39 - Référence ANSM : B110825-40 - Référence CPP : 2011/23 - NCT02002572 - Référence du promoteur : PI11-DR-DAKPE.

2.2. Population étudiée

La population étudiée était constituée de volontaires sains afin de pouvoir constituer une base de données des mouvements « normaux », pouvant servir de référence.

Afin d'obtenir des données de référence, il était nécessaire de constituer une cohorte homogène. Différents critères entrent en ligne de compte, nous avons retenu l'âge et l'origine ethnique. Le visage se caractérise par un vieillissement cutané qui peut modifier les traits (rides) et le comportement biomécanique des tissus qui perdent leur élasticité. Ce vieillissement évolue différemment en fonction des individus, mais il est corrélé à l'âge, et peut être influencé par des facteurs extérieurs : environnement, pathologies, addictions... Il a été mesuré que l'apparition de rides évoluait lentement et à des degrés divers entre 20 et 40ans, puis plus rapidement après 40ans [83].

2.2.1. Critères de non inclusion

- Sujets de plus de 30 ans ;
- Sujets présentant une pathologie de la face ;
- Sujets présentant des troubles de l'expression ;
- Sujets pouvant avoir des difficultés de compréhension.

2.2.2. Critères d'inclusion

- Sujets majeurs de 30 ans maximum ;
- Sujets de type caucasien ;
- De sexe féminin ou masculin.

2.2.3. Critères d'exclusion

- Survenue d'une pathologie faciale durant la période d'essai ;
- Modification notable de la physionomie : par exemple une perte ou prise de poids conséquente ;
- Retrait de l'accord du sujet.

2.3. Matériel

La technologie choisie pour réaliser les mesures est la capture du mouvement en trois dimensions à l'aide de marqueurs. Il est donc nécessaire, pour procéder aux mesures, de placer des marqueurs réfléchissants sur la face du sujet. La capture est ensuite réalisée sur une plate-forme permettant l'acquisition du mouvement en 3 dimensions.

2.3.1. La plate-forme d'analyse du mouvement

2.3.1.1. Dispositif de capture du mouvement

2.3.1.1.1. La plate-forme « Technologie Sport-Santé » de l'Université de Technologie de Compiègne

La plate-forme « Technologie Sport Santé » du laboratoire de Biomécanique et Bio-ingénierie (UMR CNRS-UTC 7338) est installée au Centre d'innovation de l'université de Technologie de Compiègne. Les sujets d'étude de cette plate-forme de recherche sont la biomécanique et l'étude du mouvement.

La plate-forme est composée notamment d'un système de capture du mouvement (Equipex Figures) qui a permis notre étude des mouvements faciaux (Figure 27).



Figure 27 : Caméra Vicon™ T160 (à gauche) ; Caméra Vicon™ Bonita.(à droite)

Le système de capture du mouvement utilisé est composé de 17 caméras optoélectroniques T160 et de deux Bonita vidéo de la marque Vicon™.

La caméra Vicon™ T160 permet une résolution maximale de 16 Mégapixels et une fréquence maximale de 120Hz. Elle émet un rayonnement infra-rouge qui est renvoyé par des marqueurs réfléchissants. Un filtre occultant la lumière visible permet ensuite d'obtenir une image en pixels du déplacement de ces marqueurs grâce à des capteurs photoélectriques.

La caméra Vicon™ Bonita permet d'obtenir une image vidéo haute résolution (1280 x 720 pixels) et à une fréquence maximale de 120 images/sec. Superposable aux images 3D, elle facilite le repérage des marqueurs tout en permettant un contrôle visuel du mouvement capturé.

Le système de capture du mouvement Vicon™ utilisé comprend trois unités principales (Figure 28) :

- Les caméras : 17 caméras optoélectroniques et 2 Bonita vidéos.
- Une interface qui permet de connecter et synchroniser les 19 caméras.
- Un ordinateur connecté à l'interface, permettant l'acquisition et le traitement des données de capture.

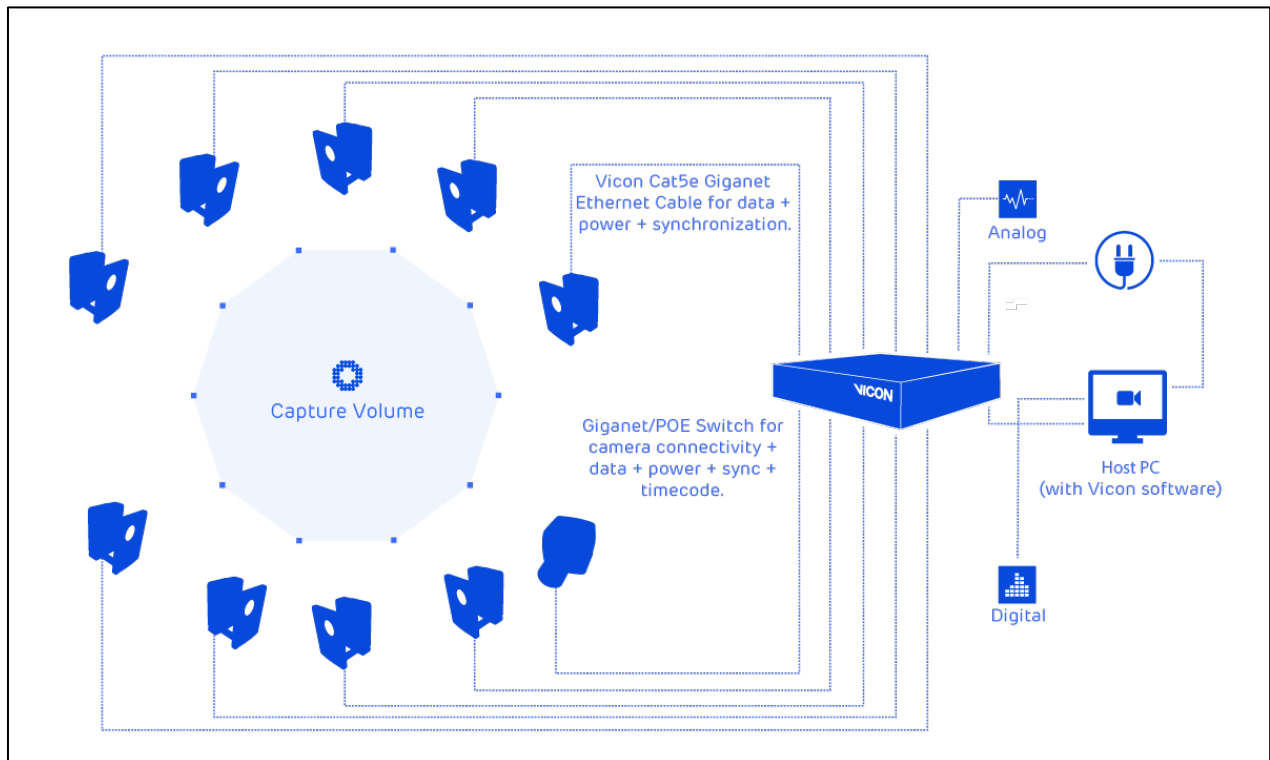


Figure 28 : Fonctionnement du système Vicon™ (source : www.vicon.com).

2.3.1.1.2. Champ de capture

Le champ de capture (Figure 29) est le volume couvert par les caméras. Pour une capture optimale du mouvement, le sujet devra être placé au centre du champ de capture.

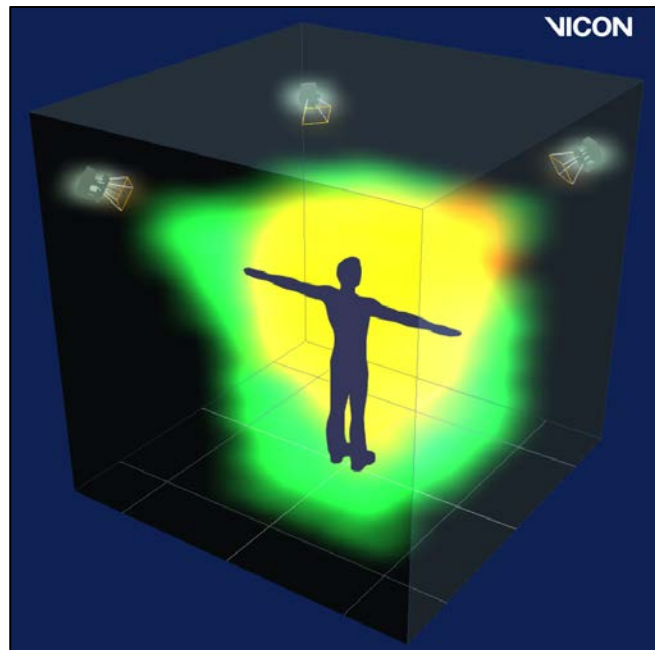


Figure 29 : Le champ de capture est la zone de couverture du mouvement par les caméras. Dans cet exemple, la portée de chacune des caméras est en vert, leur intersection, qui correspond au champ de capture est en jaune. (Source : www.vicon.com)

En ce qui concerne la capture des mouvements de la face, le champ optimal devait donc inclure principalement la face antérieure du sujet.

Ainsi, pour un sujet assis, les caméras ont dû être placées face à lui, en plongée et contre-plongée pour ne pas être occultées par les reliefs de la face. De même, des caméras ont été placées de part et d'autre du sujet afin d'élargir le champ sur les parties latérales et postérieures de la face.

Les figures 30 et 31 présentent l'emplacement des 17 caméras optoélectroniques et des deux Bonita dans notre protocole. Le sujet se place assis sur une chaise au milieu du champ.

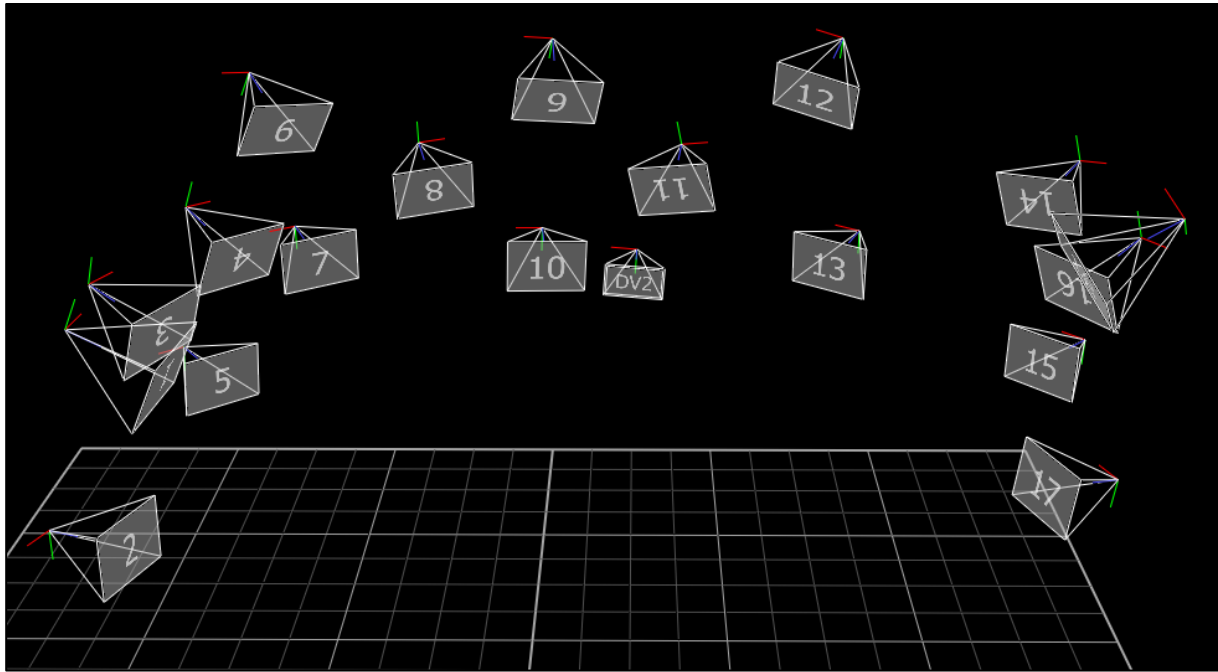


Figure 30 : Le champ de capture est disposé de manière à avoir une couverture optimale des mouvements de la face.



Figure 31 : Emplacement des caméras.

2.3.1.2. Dispositif de recueil et d'analyse des données

Le recueil et l'analyse des données étaient assurés par un ordinateur dédié. Le logiciel Vicon™ Nexus permettant la configuration, la capture et l'exportation des données.

2.3.2. Les marqueurs

La technologie de motion capture Vicon^{Ltd} nécessite l'utilisation de marqueurs réfléchissants qui seront traqués par des caméras infra-rouges placées autour du sujet. Afin d'obtenir une capture du mouvement de qualité, les marqueurs ne doivent pas être masqués lors des déplacements, et il faut maintenir une distance suffisante entre eux pour éviter les phénomènes de « *swapping* » (permutations de marqueurs).

2.3.2.1. Choix du type de marqueur

Il existe une large palette de tailles et formes de marqueurs réfléchissants. Les plus fréquemment utilisés sont des marqueurs sphériques dont le diamètre peut être compris entre 6,5mm et 50mm. Compte tenu de la finesse des mouvements faciaux, ces marqueurs sont trop volumineux. Des marqueurs plus petits sont également commercialisés : hémisphériques, ils sont de tailles comprises entre 4 et 2,5mm.

On retrouve plus rarement des marqueurs sphériques de 1,5mm (Figure 32) dont la surface de contact avec la peau est très réduite. Ce modèle a semblé être le plus pertinent dans la mesure où le marqueur va épouser totalement les déplacements des tissus faciaux, très finement mobiles.



Figure 32 : Marqueurs réfléchissants de 1,5mm utilisés dans ce protocole.

2.3.2.2. Pose des marqueurs

Le nombre et l'emplacement des marqueurs sont le résultat d'un compromis entre l'anatomie de la face, ses axes de déplacement, et les possibilités techniques. La méthode de pose consistait à trouver le moyen de placer des marqueurs de manière reproductible avec la fixation adéquate.

Traditionnellement, les marqueurs sont positionnés sur des repères osseux sous cutanés afin d'éviter les mouvements parasites des tissus mous. La capture des mouvements faciaux inverse cette logique : il ne s'agit pas ici de capturer des déplacements de membres (os et articulations), mais de tissus mous : musculature faciale et peau. Les marqueurs sont donc placés ici sur les reliefs du visage : protubérances, fossettes ; zones les plus mobiles.

2.3.2.2.1. Nombre et emplacement

L'Annexe I décrit les étapes successives qui ont conduit à l'élaboration du protocole de pose.

Nous avons ainsi positionné 105 marqueurs sur la face du sujet (Figure 33).

L'emplacement de chacun des marqueurs et leurs dénominations sont détaillés dans le tableau XV.

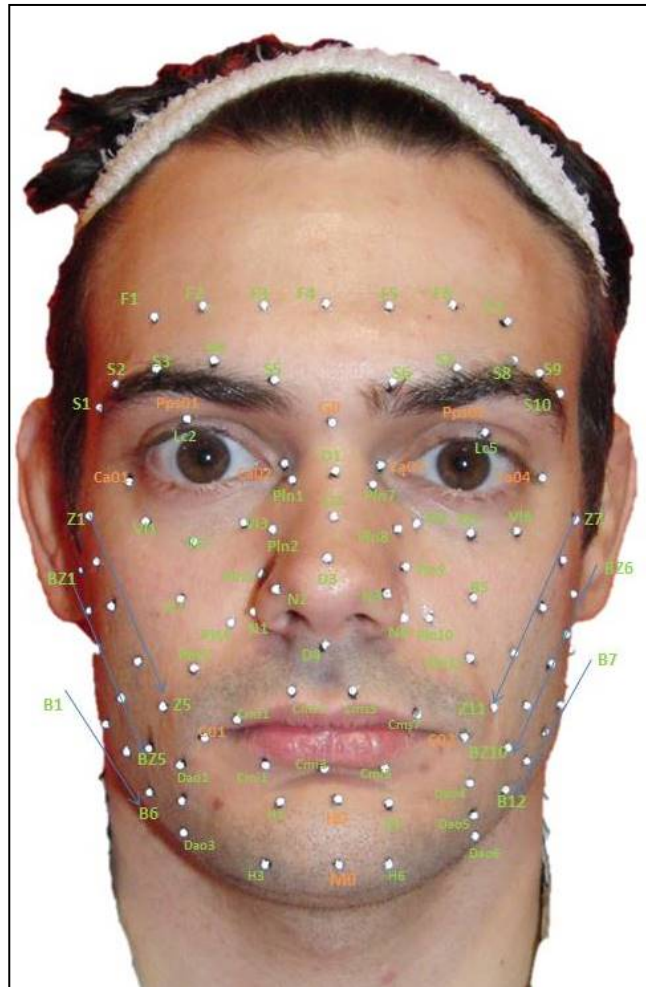
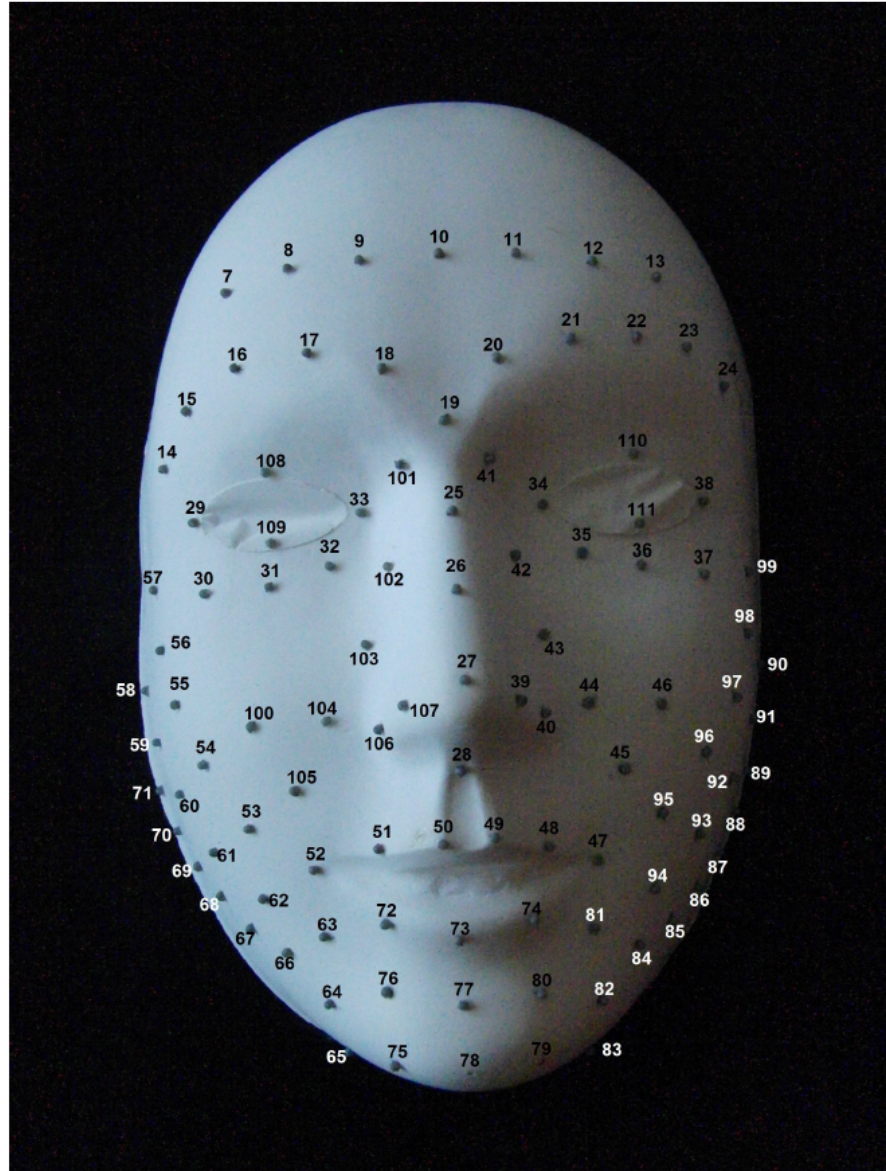


Figure 33: Protocole de pose à 105 marqueurs.

| Ordre | Nom | Groupe |
|-------|-------|----------------------------------|
| 1 | M1 | |
| 2 | M2 | Points fixes Goutière |
| 3 | M3 | |
| 4 | A1 | |
| 5 | A2 | Points fixes Oreille |
| 6 | A3 | |
| 7 | F1 | |
| 8 | F2 | |
| 9 | F3 | |
| 10 | F4 | Ligne frontale |
| 11 | F5 | |
| 12 | F6 | |
| 13 | F7 | |
| 14 | S1 | |
| 15 | S2 | |
| 16 | S3 | |
| 17 | S4 | |
| 18 | S5 | |
| 19 | G0 | Ligne des sourcils |
| 20 | S6 | |
| 21 | S7 | |
| 22 | S8 | |
| 23 | S9 | |
| 24 | S10 | |
| 25 | D1 | |
| 26 | D2 | Dorsum du nez |
| 27 | D3 | |
| 28 | D4 | |
| 29 | Ca01 | Cantus externe Dt |
| 30 | VI1 | |
| 31 | VI2 | Valée des larme Dt |
| 32 | VI3 | |
| 33 | Ca02 | Cantus interne Dt |
| 34 | Ca03 | Cantus interne G |
| 35 | VI4 | |
| 36 | VI5 | Valée des larme G |
| 37 | VI6 | |
| 38 | Ca04 | Cantus externe G |
| 39 | N3 | |
| 40 | N4 | Aile narinaire G |
| 41 | Pln7 | |
| 42 | Pln8 | |
| 43 | Pln9 | Ligne para-latéro-nasale G |
| 44 | Pln10 | |
| 45 | Pln11 | |
| 46 | R5 | Point releveur G |
| 47 | C02 | Commissure G |
| 48 | Cms7 | |
| 49 | Cms5 | Ligne cutanéomuqueuse supérieure |
| 50 | Cms3 | |
| 51 | Cms1 | |
| 52 | C01 | Commissure D |
| 53 | Z5 | |
| 54 | Z4 | |
| 55 | Z3 | Ligne Zygomatique Dt |
| 56 | Z2 | |
| 57 | Z1 | |



| | | |
|-----|-------|----------------------------------|
| 58 | BZ1 | |
| 59 | BZ2 | |
| 60 | BZ3 | Ligne intermédiaire Dt |
| 61 | BZ4 | |
| 62 | BZ5 | |
| 63 | Dao1 | Ligne Triangulaire des lèvres Dt |
| 64 | Dao2 | |
| 65 | Dao3 | |
| 66 | B6 | |
| 67 | B5 | |
| 68 | B4 | Ligne bussinateur Dt |
| 69 | B3 | |
| 70 | B2 | |
| 71 | B1 | |
| 72 | Cmi1 | Ligne cutanéomuqueuse inférieure |
| 73 | Cmi3 | |
| 74 | Cmi5 | |
| 75 | H3 | |
| 76 | H1 | |
| 77 | H0 | Houpe du menton |
| 78 | M0 | |
| 79 | H6 | |
| 80 | H4 | |
| 81 | Dao4 | Ligne Triangulaire des lèvres G |
| 82 | Dao5 | |
| 83 | Dao6 | |
| 84 | B12 | |
| 85 | B11 | |
| 86 | B10 | Ligne bussinateur G |
| 87 | B9 | |
| 88 | B8 | |
| 89 | B7 | |
| 90 | BZ6 | |
| 91 | BZ7 | |
| 92 | BZ8 | Ligne intermédiaire G |
| 93 | BZ9 | |
| 94 | BZ10 | |
| 95 | Z11 | |
| 96 | Z10 | |
| 97 | Z9 | Ligne Zygomatique G |
| 98 | Z8 | |
| 99 | Z7 | |
| 100 | R2 | Point releveur Dt |
| 101 | Pln1 | |
| 102 | Pln2 | Ligne para-latéro-nasale Dt |
| 103 | Pln3 | |
| 104 | Pln4 | |
| 105 | Pln5 | |
| 106 | N1 | Aile narinaire Dt |
| 107 | N2 | |
| 108 | Pps01 | Paupière Dt |
| 109 | Lc2 | |
| 110 | Pps02 | Paupière G |
| 111 | Lc5 | |

Tableau XV: Emplacement des 105 marqueurs du protocole de pose définitif.

2.3.2.2.2. Méthode de pose

La pose des marqueurs répondait à deux exigences principales :

- Une fixation suffisamment forte pour empêcher tout déplacement de marqueurs au cours du mouvement, mais aussi facile à retirer pour ne pas endommager la peau ou les phanères.
- Un placement juste et reproductible des marqueurs pour éviter des biais liés à un décalage des points de référence.

Les marqueurs réfléchissant de 1,5 millimètre ont l'avantage et l'inconvénient d'avoir une surface de contact très réduite avec la peau. Cela permet d'un côté de suivre le mouvement des tissus faciaux de manière fidèle, mais nécessite l'emploi d'une colle capable d'avoir une forte adhésion sur une surface réduite.

De plus, s'agissant d'une application sur des parties superficielles du corps humain, il est indispensable d'utiliser une colle à visée cosmétique. Compte tenu de la proximité immédiate de muqueuses (yeux, bouche, narines), nous avons exclu les colles utilisant des solvants au profit de colles aqueuses.

Nous avons donc utilisé la colle Pros-Aide® II. **Les étapes qui ont conduit à ce choix sont détaillées en Annexe II.**

Le placement à main levée ne s'est pas révélé être une méthode fiable. Il conduit d'une part à une répartition approximative des marqueurs sur la face du sujet, mais aussi à des oublis fréquents de marqueurs. Afin d'améliorer la technique de pose, et de s'assurer d'un placement pertinent, reproductible et standardisé des marqueurs, il a été nécessaire de confectionner un outil.

Un masque réalisé sur mesure sur le sujet (Figure 34), et percé à l'emplacement de chacun des marqueurs, nous a permis de servir de guide pour la pose des marqueurs. **Sa fabrication est réalisée en plusieurs étapes détaillées en Annexe III.**

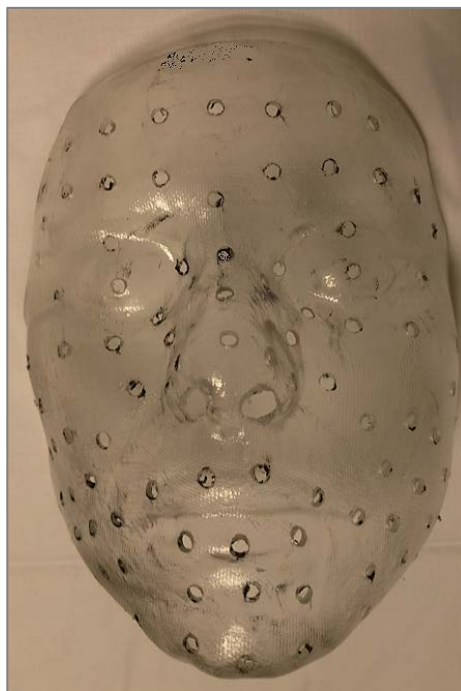


Figure 34: Masque guidant la pose des marqueurs.

2.3.3. Les référentiels fixes

Un mouvement se définit par le déplacement d'un point mobile par rapport à un point fixe. Lors de l'étude des mouvements de la mimique faciale, les points mobiles vont donc être matérialisés par les marqueurs réfléchissants. En revanche, il n'existe pas de points fixes « évidents » sur la face : des tissus mous et très mobiles recouvrent la majeure partie du massif facial.

La musculature et les tissus de la face sont supportés par les différentes pièces osseuses constituant la boîte crânienne. Celles-ci sont soudées entre elles à l'exception de la mandibule qui est mobile.

Il a fallu donc identifier un point fixe de référence ; placé sur le massif facial, fiable, facilement accessible, et naturellement non invasif.

Trois possibilités ont été étudiées (Figure 35) :

- Un bandeau péricrânien
- Un dispositif placé sur le pavillon de l'oreille
- Un dispositif fixé sur le maxillaire.

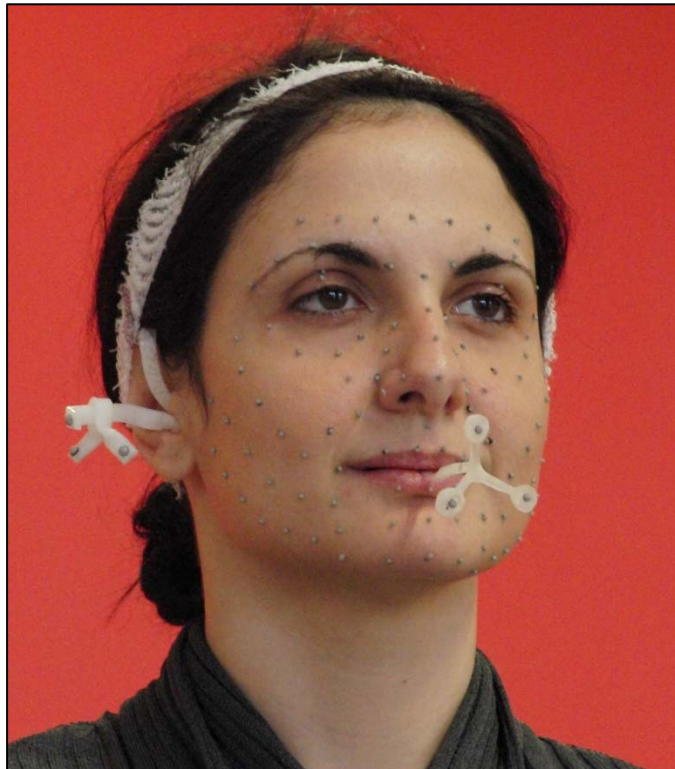


Figure 35 : Vue d'ensemble des différents dispositifs servant de "référentiel fixe".

2.3.3.1. Le référentiel maxillaire

Le référentiel maxillaire est constitué d'une gouttière placée sur les dents. Il supporte une tige sur laquelle sont fixés les marqueurs réfléchissants.

Celle-ci est réalisée sur mesure par un dentiste selon les procédés couramment utilisés en orthodontie : moulage, thermoformage. Les matériaux à usage médical sont les mêmes que ceux utilisés en pratique clinique (Figures 36 et 37).



Figure 36 : La gouttière permet l'occlusion de l'articulé dentaire.



Figure 37 : La tige supportant les marqueurs est positionnée de manière à ne pas gêner l'occlusion labiale.

La dentition du maxillaire est le seul accès direct à l'ossature crânienne, sans interposition de tissus mous. Le référentiel maxillaire (Figure 38) va donc retranscrire de manière fidèle les mouvements du crâne (mouvements cervicaux et déplacements du sujet). Ce référentiel fixe peut être considéré comme très fiable puisqu'il est solidement ancré sur une pièce osseuse.

Les détails de sa conception et les différents prototypes sont détaillés en Annexe IV.



Figure 38 : Le référentiel maxillaire permet de supporter 3 marqueurs réfléchissants. Il retransmet les mouvements du crâne par l'intermédiaire du maxillaire.

2.3.3.2. *Le référentiel auriculaire*

Le pavillon de l'oreille présente des muscles intrinsèques (muscle du tragus, de l'Hélix, de l'antitragus, transverse et obliques) et extrinsèques (muscles auriculaires). Initialement dédiés à l'orientation du conduit auditif chez l'animal, ceux-ci ont une action minime chez l'homme.

Considérant que les mouvements étudiés dans ce protocole influençaient peu ou pas la position et l'orientation des oreilles, nous avons mis en place un second dispositif « point fixe » sur le pavillon de l'oreille (Figure 39).

Ce dispositif, secondaire car moins fiable sera comparé au référentiel maxillaire. Il se place à la manière d'un appareil auditif en prenant appui sur le pavillon et la conque de l'oreille.



Figure 39 : Le référentiel auriculaire est un dispositif thermoformé sur le sujet à l'aide d'un plastique basse température à usage médical.

Les différents prototypes et leur évaluation sont détaillés en Annexe V.

2.3.3.3. *Autres référentiels fixes*

Un bandeau péri-crânien supportant 4 marqueurs a également été testé. Celui-ci n'a cependant pas été retenu car il est difficile de le placer de manière reproductible sur un même sujet. En effet, le bandeau peut glisser, pivoter et est parfois difficile à placer en fonction de la chevelure.

2.4. Méthode

2.4.1. Protocole de mouvements

2.4.1.1. *Mouvements retenus*

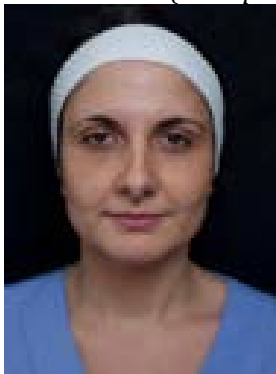
Le protocole de capture des mouvements de la mimique faciale s'est intéressé à cinq mouvements représentatifs des différentes zones d'action de la face. Ainsi, sont concernés par ces mouvements, les tissus mous de la zone frontale, des zones orbiculaires, des zones jugales, des lèvres et du menton. Le choix de ces mouvements est hérité du projet de recherche SIMOVI [84], et ont ainsi été choisis en cohérence avec les travaux déjà menés par l'équipe.

Pour la réalisation de ces mouvements, il est demandé à la personne examinée de s'asseoir sur une chaise mains sur les genoux. Si nécessaire, un bandeau est placé sur la chevelure afin de dégager le front. Il est alors placé en arrière de la ligne d'implantation des cheveux. Les sujets féminins sont démaquillés. Les boucles d'oreilles et autres piercings sont ôtés.

Les consignes sont lues par l'examineur au volontaire.

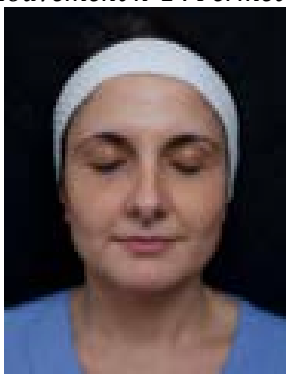
Description des mouvements :

Position neutre (statique) :



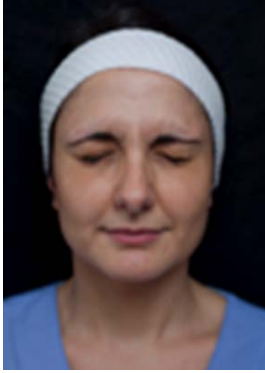
C'est la position de départ des cinq mouvements. La personne est non éblouie, épaules basses et relâchées, le dos droit. Son visage est détendu, sans expression (expression neutre) ; ses yeux sont ouverts, le regard droit, sourcils relâchés, sans crispation mandibulaire. Le clignement palpébral naturel est autorisé. L'examineur pourra demander à l'examiné de « faire un visage le plus neutre possible ».

Mouvement n°1 : Fermeture normale des paupières (M1) :



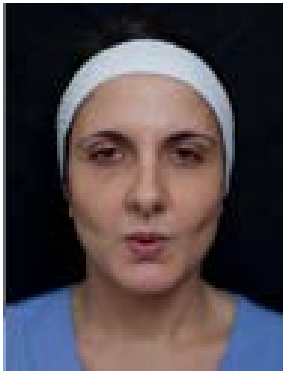
Consigne donnée : Abaissement de la paupière supérieure en conservant initialement le regard droit. Le mouvement doit être effectué tranquillement sans forcer.

Mouvement n°2 : Fermeture forcée des paupières (M2) :



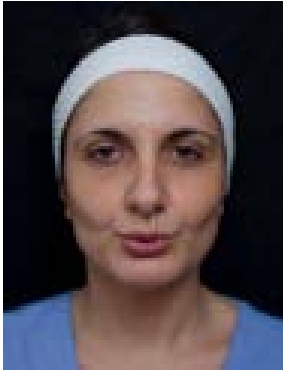
Consigne donnée : Abaissement de la paupière supérieure en conservant initialement le regard droit en forçant le mouvement pour fermer au maximum les paupières. On veillera à ce que le sujet ne réalise pas le mouvement en 2 Temps.

Mouvement n°3 : Protrusion labiale sur le son « O » (M3) :



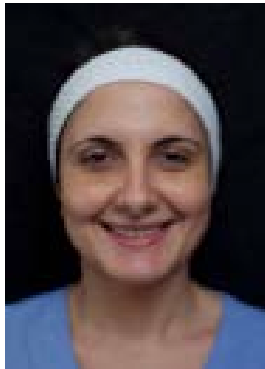
Consigne donnée : prononcer la lettre « O », sans tenir le son mais en maintenant les lèvres dans leur position la plus protruse (la plus poussée en avant). On veillera à ce que le sujet ne maintienne pas le son « O », ni ne gonfle les joues.

Mouvement n°4 : Protrusion labiale sur le son « POU » (M4) :



Consigne donnée : Prononcer le son « pou » (sans tenir le son mais en maintenant les lèvres dans leur position la plus protruse (la plus poussée en avant). On veillera à ce que le sujet ne maintienne pas le son « pou », ni ne gonfle les joues.

Mouvement n°5 : Étirement des commissures en découvrant les dents (M5) :



Consigne donnée : Sourire en découvrant les dents.

2.4.1.2. *Mouvements annexes*

Afin de compléter les mesures, des mouvements non standardisés ont également été réalisés. Ils permettent d'appréhender le comportement cinématique global de la face lors de certaines actions.

Parmi-eux, on trouve le mouvement n°6 : sourire spontané (M6) : Ce mouvement était capturé à l'insu du sujet, si celui-ci manifestait un sourire durant la séance.

Des exercices articulatoires ont également été capturés. Il s'agit de phrases qui sont notamment utilisées en orthophonie pour l'évaluation et la rééducation des troubles de la prononciation :

- *P1 : Le vent souffle.*
- *P2 : il fait tout noir.*
- *P3 : un gâteau à la crème.*
- *P4 : J'ai perdu ma bicyclette.*
- *P5 : Maman a mis le parapluie dans le jardin.*
- *P6 : Mon oncle a acheté un journal illustré au kiosque.*
- *P7 : J'aimerais bien m'asseoir dans l'herbe mouillée toute fraîche.*
- *P8 : Pierre a fait un beau bateau de bois avec son canif pointu.*
- *P9 : Jean demande à son père de l'emmener voir les clowns au cirque.*

2.4.2. Workflow du protocole de capture du mouvement de la mimique faciale

La figure 40 synthétise le protocole d'acquisition des mouvements de la mimique faciale mise en œuvre dans ce travail de thèse.

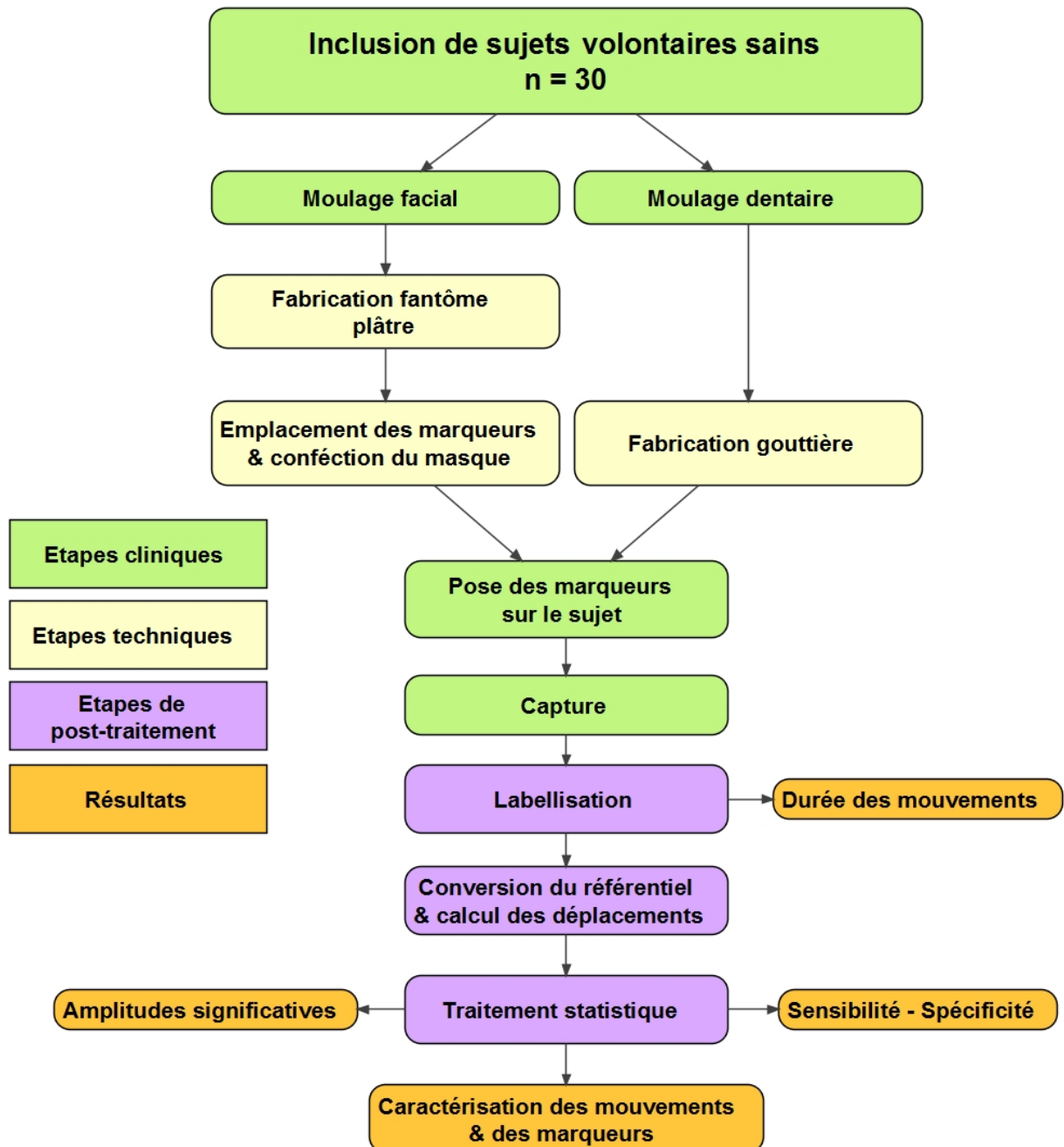


Figure 40: Déroulé du protocole.

2.4.3. Protocole de capture du mouvement

2.4.3.1. Renseignement socio-administratifs et médicaux

Avant de réaliser les mesures sur les volontaires, ceux-ci devaient remplir un formulaire de consentement ainsi qu'une fiche d'information médicale vérifiant l'absence de critère de non-inclusion/exclusion.

2.4.3.2. Capture du moulage en plâtre

La première session pour un sujet commençait toujours par une capture des marqueurs placés sur son moulage en plâtre.

L'intérêt était notamment d'enregistrer la position théorique des marqueurs avant leur application sur le sujet.

2.4.3.3. Pose des marqueurs

Une fois la position théorique des marqueurs enregistrée, ceux-ci étaient ensuite transférés sur la face du sujet.

Les emplacements des marqueurs sont alors marqués sur la face du sujet à l'aide du masque percé et d'un crayon de maquillage (feutre type « *Eye Liner* »).

Un ou deux poseurs disposaient d'une paire de précelles (pince chirurgicale) et d'un petit pinceau pour appliquer la colle et les marqueurs. Afin de s'assurer qu'aucun marqueur ne soit omis, ceux-ci étaient transférés directement de l'empreinte en plâtre au même emplacement sur la face du sujet.

Le temps de pose des marqueurs était chronométré, ainsi que le nom et le nombre de poseurs.

2.4.3.4. Acquisition sur le sujet

Les captures ont été réalisées à une fréquence de 100Hz.

2.4.3.4.1. Statique – position neutre

La première mesure réalisée sur le sujet consistait à une capture du sujet en position neutre (cf. 2.4.1.1). Cette mesure statique nous permettait d'obtenir une position de référence par rapport aux mouvements qui sont ensuite demandés.

2.4.3.4.2. Protocole du mouvement

Une fois la mesure statique réalisée, les cinq mouvements (M1 à M5) du protocole sont capturés séparément.

Puis, chacun des cinq mouvements est réalisé trois fois d'affilée (M1x3 à M5x3), avec une période de repos de 10 secondes entre chaque répétition.

Finalement le sujet doit réaliser l'enchaînement des cinq mouvements (protocole complet) avec une période de 10 secondes entre chaque mouvement.

Enfin les phrases P1 à P9 sont capturés.

2.5. Traitement des données

2.5.1. Reconstruction des données

La première étape de traitement des données consiste à reconstruire les données brutes issues des caméras pour obtenir des données en 3D.

Le logiciel Vicon™ Nexus propose une série de paramètres permettant de configurer au mieux cette reconstruction. Les paramètres retenus sont représentés sur la Figure 41 figure 41.

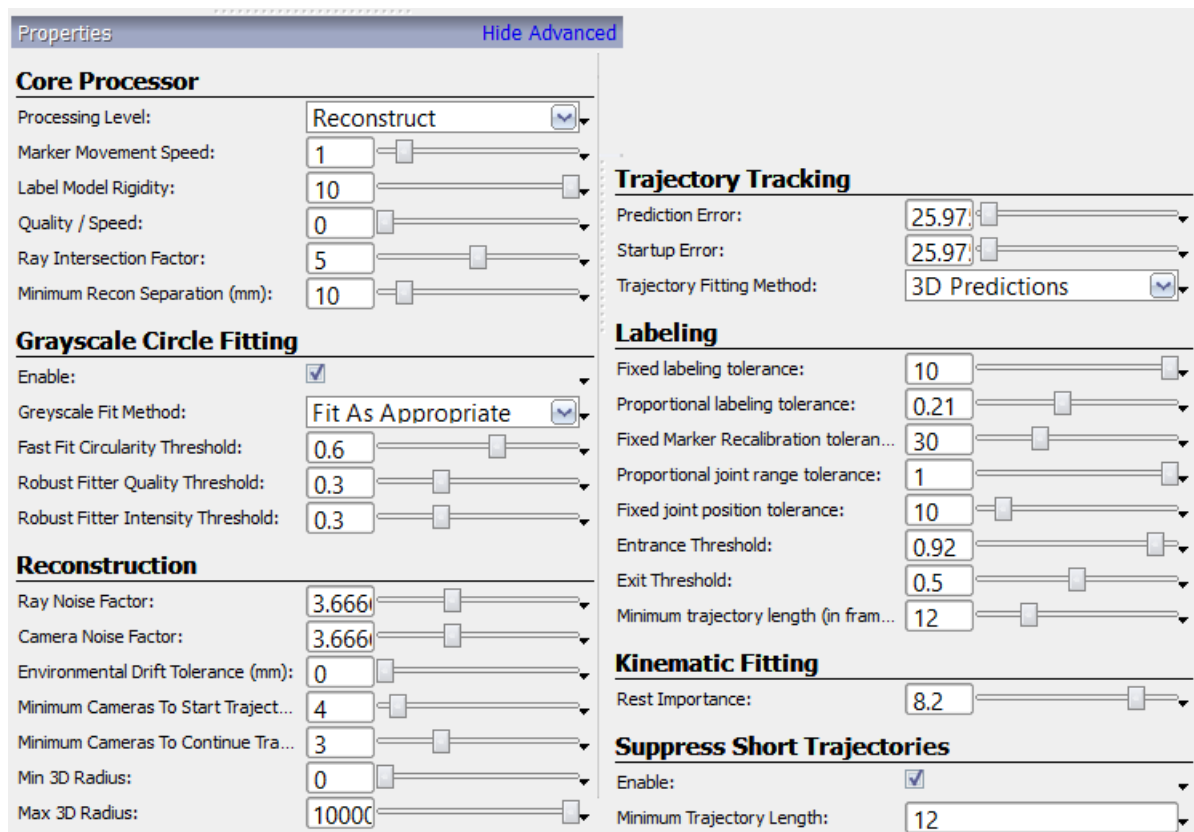


Figure 41: Paramètres de reconstruction (Nexus).

2.5.2. Labellisation des données

Une fois les données reconstruites, celle-ci sont visualisables sous forme d'un nuage de points (Figure 42).

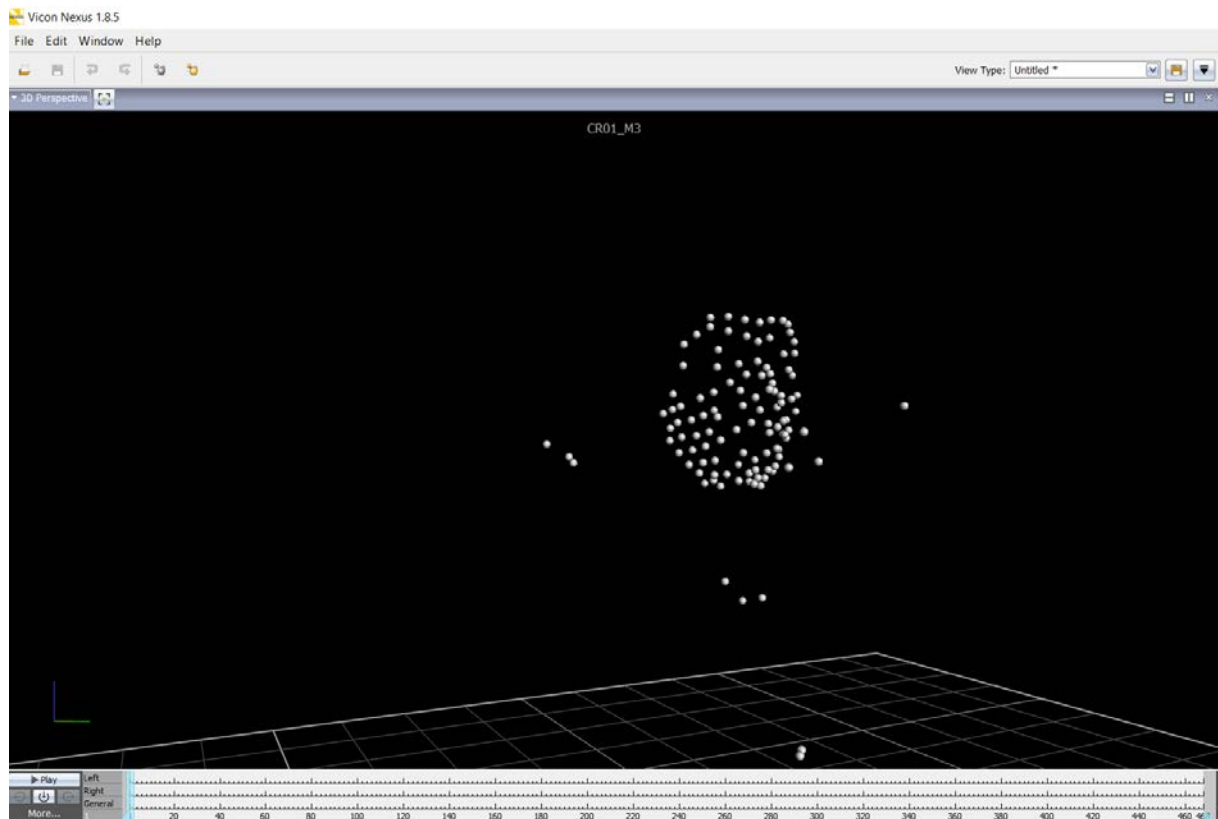


Figure 42: Données obtenues après reconstruction.

Ce nuage de point ne permet pas un suivi du mouvement. En effet, il est nécessaire d'associer les marqueurs dans le temps. Ce processus s'appelle la labélisation.

La labélisation va consister à identifier chacun des marqueurs et de s'assurer qu'ils restent correctement identifiés durant toute la séquence. La labélisation va également permettre de supprimer les artefacts de capture. Par exemple, nous pouvons observer sur la figure 42 des marqueurs au niveau de la poitrine du sujet, il s'agit en réalité d'un collier brillant. Ces artefacts ont donc été supprimés.

Le temps de labélisation est variable d'un sujet à l'autre (de 20 minutes à 3 heures par mouvement). Celui-ci dépend de la durée de la séquence, mais surtout de la qualité des données obtenues : lorsque des marqueurs sont manquants ou instables, le processus peut devenir très chronophage.

2.5.3. Exportation des données

Les données labélisées sont exploitables pour l'analyse du mouvement. Le logiciel Nexus 1 ne permet pas un traitement mathématique ou statistique de ces données. Seule la trajectoire des marqueurs dans le référentiel de capture peut être visualisée (Figure 43).

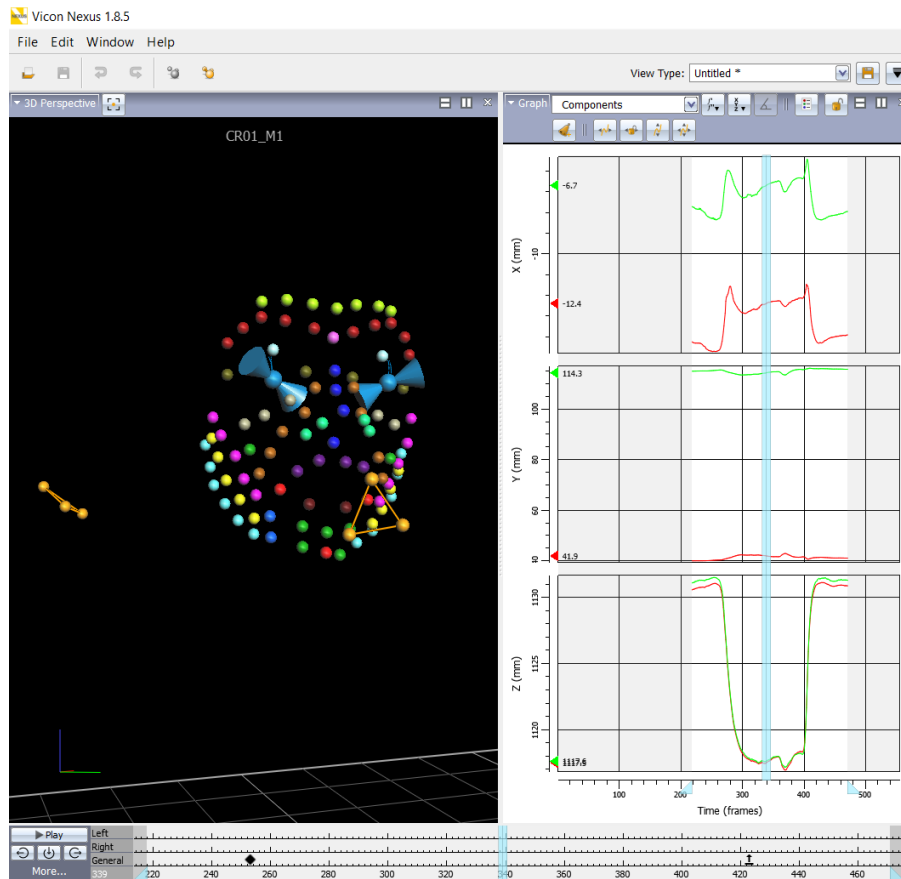


Figure 43 : Trajectoire de deux marqueurs (Lc2 et Lc5) au cours du mouvement 1, dans le référentiel de capture.

Afin de pouvoir procéder à un traitement mathématique et/ou statistique des données, celles-ci sont exportées sous forme de fichiers au format ANSCI « *Comma-separated values* » ou « **.csv* ». Nous avons ainsi obtenu des données quantitatives (coordonnées x,y,z,t) qu'il est possible de lire sous forme de tableaux (Figure 44).

| Field # | X | Y | Z | X | Y | Z | X | Y | Z | X | Y | Z | X | Y | Z |
|---------|-------------|------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | -200,459106 | 609,580078 | 647,611145 | -193,575897 | 587,60675 | 623,938843 | -192,896545 | 617,03418 | 619,905762 | -32,581457 | 717,858521 | 671,761563 | -37,552908 | 697,519836 | 686,032654 |
| 2 | -200,460083 | 609,593445 | 647,620361 | -193,576004 | 587,613464 | 623,9505 | -192,902695 | 617,042786 | 619,912537 | -32,568449 | 717,862915 | 671,753113 | -37,543943 | 697,5271 | 666,023987 |
| 3 | -200,460114 | 609,610107 | 647,623535 | -193,575928 | 587,62262 | 623,956825 | -192,909564 | 617,052795 | 619,914246 | -32,569253 | 717,868347 | 671,748953 | -37,631026 | 697,536987 | 666,019437 |
| 4 | -200,458603 | 609,629772 | 647,616333 | -193,575455 | 587,634033 | 623,958496 | -192,903381 | 617,06366 | 619,90741 | -32,523519 | 717,874695 | 671,718811 | -37,513998 | 697,5495 | 656,991516 |
| 5 | -200,455139 | 609,650085 | 647,595276 | -193,574728 | 587,647156 | 623,948364 | -192,894807 | 617,074768 | 619,908909 | -32,891601 | 717,881958 | 671,692566 | -37,893082 | 697,565514 | 656,966792 |
| 6 | -200,449448 | 609,671517 | 647,558228 | -193,571823 | 587,661377 | 623,926255 | -192,880203 | 617,085815 | 619,857605 | -32,854622 | 717,890198 | 671,660522 | -32,868851 | 697,581665 | 656,936218 |
| 7 | -200,441376 | 609,692749 | 647,520503 | -193,566772 | 587,675598 | 623,893093 | -192,860311 | 617,096375 | 619,812439 | -32,814438 | 717,899719 | 671,622925 | -32,842144 | 697,600281 | 656,899902 |
| 8 | -200,430704 | 609,712708 | 647,437317 | -193,557098 | 587,688599 | 623,843689 | -192,839419 | 617,106618 | 619,754415 | -32,773663 | 717,911011 | 671,580383 | -37,814049 | 697,619629 | 656,858993 |
| 9 | -200,417079 | 609,730408 | 647,338704 | -193,548002 | 587,698853 | 623,785705 | -192,807343 | 617,113953 | 619,68457 | -32,735371 | 717,924744 | 671,533691 | -37,785908 | 697,639038 | 656,811768 |
| 10 | -200,403046 | 609,745178 | 647,272254 | -193,51568 | 587,705322 | 623,719116 | -192,776489 | 617,119141 | 619,60679 | -32,702538 | 717,941711 | 671,483887 | -37,759212 | 697,657776 | 656,762329 |
| 11 | -200,387924 | 609,756165 | 647,184418 | -193,485626 | 587,707397 | 623,646118 | -192,743332 | 617,120728 | 619,521481 | -32,677448 | 717,96228 | 671,432668 | -37,735355 | 697,675537 | 656,711426 |
| 12 | -200,374428 | 609,761 | 647,090512 | -193,446403 | 587,704834 | 623,569136 | -192,708572 | 617,117708 | 619,431716 | -32,64644 | 717,980511 | 671,379795 | -37,715523 | 697,693222 | 656,661011 |
| 13 | -200,360046 | 609,765258 | 647,026897 | -193,411153 | 587,697998 | 623,491821 | -192,673569 | 617,110168 | 619,345581 | -32,655151 | 718,013794 | 671,327771 | -37,700558 | 697,708111 | 656,61261 |
| 14 | -200,347061 | 609,762329 | 646,921509 | -193,3759 | 587,687134 | 623,416887 | -192,640396 | 617,098081 | 619,259644 | -32,658211 | 718,040391 | 671,277039 | -37,690746 | 697,723572 | 656,567444 |
| 15 | -200,332081 | 609,753602 | 646,838905 | -193,345688 | 587,672546 | 623,346436 | -192,611435 | 617,081848 | 619,178528 | -32,669838 | 718,073181 | 671,230042 | -37,685753 | 697,73915 | 656,525994 |
| 16 | -200,314774 | 609,73822 | 646,763306 | -193,322159 | 587,653992 | 623,282776 | -192,588547 | 617,06189 | 619,104126 | -32,688881 | 718,10321 | 671,187195 | -37,684448 | 697,751282 | 656,488464 |
| 17 | -200,293364 | 609,715698 | 646,692932 | -193,304535 | 587,631042 | 623,226318 | -192,57222 | 617,038025 | 619,038025 | -32,714677 | 718,132385 | 671,149648 | -37,687862 | 697,763428 | 656,45078 |
| 18 | -200,27095 | 609,688635 | 646,630432 | -193,290833 | 587,60321 | 623,177121 | -192,561523 | 617,01001 | 618,968095 | -32,744236 | 718,15979 | 671,11615 | -37,694881 | 697,774719 | 656,426331 |
| 19 | -200,248856 | 609,649658 | 646,576782 | -193,27861 | 587,570068 | 623,134583 | -192,554504 | 616,977356 | 618,932555 | -32,778244 | 718,184753 | 671,088379 | -37,70771 | 697,786194 | 656,402771 |
| 20 | -200,228729 | 609,607423 | 646,532166 | -193,265717 | 587,531616 | 623,097717 | -192,548996 | 616,940661 | 618,899734 | -32,814476 | 718,206482 | 671,065552 | -37,728558 | 697,799438 | 656,384827 |
| 21 | -200,211212 | 609,546012 | 646,496155 | -193,25058 | 587,487976 | 623,065918 | -192,54306 | 616,898193 | 618,859173 | -32,853225 | 718,224487 | 671,047418 | -37,757862 | 697,814941 | 656,372375 |
| 22 | -200,196213 | 609,508911 | 646,468314 | -193,232313 | 587,439758 | 623,038835 | -192,535231 | 616,852173 | 618,823747 | -32,892219 | 718,238525 | 671,032559 | -37,792976 | 697,831482 | 656,366258 |
| 23 | -200,18306 | 609,454956 | 646,447388 | -193,217039 | 587,387695 | 623,015869 | -192,52446 | 616,802612 | 618,812378 | -32,930614 | 718,248657 | 671,022461 | -37,829536 | 697,848802 | 656,35907 |

Figure 44 : Exemple de fichier csv.

Parallèlement à la labélisation, la durée des mouvements a été chronométrée. Les données obtenues via Nexus indiquent l'amorce du mouvement et la fin du mouvement. Ces données temporelles ont également été exportées sous forme de fichiers csv. Les fichiers ont été compilés et les durées moyennes des cinq mouvements du protocole ont été calculées à l'aide du logiciel « R ».

2.5.4. Conversion des données

Les données cinématiques, exportées sous forme de coordonnées dans le temps (x,y,z,t) ont nécessité une conversion afin de permettre le traitement statistique.

Tout d'abord, il a été nécessaire de changer de référentiel. La capture des mouvements faciaux était réalisée dans un repère ne prenant pas en compte les mouvements de toutes les articulations des membres et du tronc. Ces mouvements vont alors avoir une répercussion sur l'orientation et la position de la tête dans ce référentiel.

Les mouvements de la face sont réalisés par rapport à un point fixe « extrémité céphalique » défini ici par un repère composé des trois marqueurs placés sur le maxillaire (Ma1, Ma2, Ma3). Les nouvelles coordonnées de déplacement ont donc été calculées dans ce repère.

Une fois les nouvelles coordonnées obtenues, et afin de pouvoir comparer les déplacements de marqueurs, il a été calculé des déplacements relatifs par rapport à la position statique. Pour cela, la distance relative depuis la capture en position neutre – statique a été calculée pour chacun des marqueurs, et en fonction du temps. Ces calculs ont été réalisés sur Matlab® dans le laboratoire de biomécanique et de bioingénierie de l'Université de Technologie de Compiègne.

Pour finir, ces données ont été compilées sous formes de déplacements moyens, maximaux, et au 75^{ème} percentile pour chacun des mouvements et chacun des sujets dans une base de données unique permettant l'exploitation statistique. Cette dernière étape a été réalisée à l'aide des logiciels « R » et Microsoft® Excel®.

2.6. Exploitation des données

Après capture et traitement des données, nous disposons d'une base de données de déplacements (Annexe VI) pour l'analyse des amplitudes de déplacement moyennes, maximales et au 75^{ème} percentile.

Nous avons choisi d'analyser les valeurs moyennes, au 75 percentile et les valeurs maximales pour éviter d'avoir une interprétation faussée par les moyennes. Les valeurs maximales nous permettent de connaître la course totale du mouvement. Par ailleurs, afin d'éviter de voir certaines analyses faussées par d'éventuels artefacts dans les valeurs maximales, nous avons également calculé le 75^{ème} percentile.

2.6.1. Amplitudes des déplacements relatifs

Les calculs des amplitudes de déplacement, comparées à la position statique, ou comparées avec d'autres mouvements ont été réalisés à l'aide du logiciel SAS® Enterprise (data mining et traitement statistique).

Pour l'analyse des données, qui proviennent d'observations répétées (amplitudes de déplacements) chez des individus différents mais aussi pour de mêmes individus, il a été choisi d'utiliser un modèle mixte d'ANOVA. Pour cela, c'est la procédure « mixed » de SAS® qui a été utilisée [85].

2.6.2. Corrélations

Les analyses de corrélation entre mouvements isolés et mouvements répétés ont été réalisées à l'aide du coefficient de corrélation de Pearson. Ceux-ci ont été calculés à l'aide du logiciel de traitement statistique « R ».

2.6.3. Symétries

L'analyse de la symétrie entre l'hémiface droite et l'hémiface gauche a été réalisée pour la symétrie globale à l'aide d'un test t pour échantillons appariés avec le logiciel « R ». La symétrie individuelle des marqueurs a quant à elle été réalisée à l'aide du logiciel SAS® Enterprise selon la même procédure que pour les amplitudes de déplacement.

2.6.4. Durées

La comparaison de la durée des mouvements avec les mesures de Dakpé et al. [86] a été réalisée à l'aide d'un test de Wilcoxon signé.

2.6.5. Caractérisation des marqueurs

Lorsque l'on dispose d'une base de données quantitatives, avec un nombre d'observations élevées (n=375 captures, pour 111 marqueurs), il est difficile d'appréhender la proximité entre les mesures par des tableaux de corrélation ou lors d'analyses avec des variables isolées.

L'analyse multivariée va permettre de considérer un grand nombre de variables de manière conjointe. L'une des méthodes les plus fréquemment utilisée est l'analyse en composante principale (ACP). L'ACP nous a permis de visualiser les observations afin d'identifier des groupes homogènes de marqueurs. Il a donc été possible de déterminer des corrélations entre ces marqueurs, mais aussi entre un axe de représentation (facteur) et des marqueurs.

Le poids (l'importance) de chacun des marqueurs sur les axes a été calculé à l'aide des cosinus carrés.

Nous avons choisi de figurer les résultats de l'ACP sous forme de « biplot de corrélation » (diagramme en double projection) [87]. Ce diagramme permet d'exploiter un maximum d'informations en faisant figurer simultanément nos marqueurs (sous forme de points) et nos mouvements (sous formes de vecteurs). Le biplot permet une représentation imagée facilitant l'interprétation : il est alors possible de corréler un marqueur à un axe, mais aussi à un mouvement.

Cette forme de représentation n'est fiable que si la somme des pourcentages de variabilité associés aux axes (F1 et F2) est élevée, ce qui est notre cas (>80%).

Ensuite, les données ont été partitionnées afin d'identifier des groupes de marqueurs. Pour ce faire, nous avons complété l'ACP avec une analyse en cluster. La méthode choisie a été la classification *k-means* (ou nuée dynamique) qui permet d'affecter chacun des marqueurs à une classe.

L'un des inconvénients de cette méthode est qu'elle ne permet pas de déterminer le nombre de classe optimal. La Classification Ascendante Hiérarchique ou la méthode du « coude » n'ont pas permis de déterminer un nombre de classes cliniquement pertinent. Ainsi nous avons arbitrairement choisi de déterminer cinq classes, après avoir réalisé l'analyse en cluster sur 3 à 6 classes. L'analyse en cinq classes étant la seule qui présentait une interprétation clinique claire.

Le critère de classification était le déterminant de W : matrice de covariance intra-classe commune (*pooled within covariance matrix*) qui est moins sensible aux effets d'échelle.

Tous ces calculs ont été réalisés sous « R » (FactoMineR) [87].

2.6.6. Sensibilité et spécificité

En médecine, les tests diagnostiques sont généralement définis par leur sensibilité et leur spécificité. La sensibilité est la capacité d'un test à donner un résultat positif quand le sujet est malade. La spécificité est la capacité d'un test à donner un résultat négatif quand le sujet n'est pas malade. La valeur diagnostique d'un test clinique est donc d'autant meilleure que la sensibilité et la spécificité sont bonnes.

Les calculs de sensibilité et de spécificité ont été réalisés à partir des valeurs d'amplitudes maximales de 342 captures : mouvements isolés et répétés des cinq mouvements et des captures statiques. Les calculs de sensibilité et de spécificité ont été réalisés à l'aide de la méthode de courbes « *Receiver Operating Characteristic* » ou ROC.

Dans le cas d'un examen dont le résultat est quantitatif (amplitudes de déplacement), il est nécessaire de définir un seuil à partir duquel le résultat sera considéré comme positif ou négatif. Le choix de ce seuil est guidé par la réalisation d'une courbe ROC. Cette courbe va permettre de définir la valeur seuil pour laquelle la sensibilité et la spécificité du test sont les meilleurs.

Ces calculs ont été réalisés avec XLStat®-Biomed.

Les indices suivants ont été calculés :

- **La valeur diagnostique.** La valeur diagnostique d'un examen peut également s'exprimer par sa valeur prédictive positive (VPP) : probabilité d'être malade si le test est positif, et sa valeur prédictive négative (VPN) : probabilité d'être malade si le test est négatif.
- **L'exactitude.** L'exactitude d'un test se définit par le rapport :

$$\text{Exactitude} = \frac{\text{Vrais positifs} + \text{Vrais négatifs}}{\text{Vrais positifs} + \text{Vrais négatifs} + \text{Faux positifs} + \text{Faux négatifs}}$$

Plus cette valeur est proche de 1 meilleur est le test.

- **L'aire sous la courbe** (*Area Under the Curve* – AUC). Elle correspond à la probabilité que l'amplitude de déplacement seuil du marqueur donne un résultat positif parmi toutes les valeurs seuil possibles. Dans l'idéal, l'AUC est égale à 1. Un modèle bien discriminant doit avoir une AUC entre 0,87 et 0,9. Un modèle ayant une AUC supérieure à 0.9 est excellent.

- **Le rapport de vraisemblance** (*Likelihood Ratio* - LR). Il décrit l'apport d'un test au diagnostic [88]. Contrairement à la valeur prédictive, ce rapport ne dépend pas de l'effectif de malades/non malades.

Le rapport de vraisemblance positif (LR+) décrit la vraisemblance d'avoir un test positif si on est malade. Il varie de 0 à l'infini. Un LR+ >10 signifie un apport important au diagnostic [89].

Il se calcule de la manière suivante :

$$LR+ = \frac{\text{Sensibilité}}{1 - \text{Spécificité}}$$

Le rapport de vraisemblance négatif (LR-) mesure la vraisemblance d'avoir un test négatif si on n'est pas malade ; plus le LR- est proche de 0, plus le test permet d'exclure le diagnostic.

Il se calcule de la manière suivante :

$$LR- = \frac{1 - \text{Sensibilité}}{\text{Spécificité}}$$

2.6.7. Graphiques et figures

Les différentes représentations de données ont été réalisées sur « R », Microsoft® Excel® 2016, XLStat® Addinsoft et Microsoft® Visio® 2013.

CHAPITRE 3 :

RÉSULTATS

3. Résultats

Ce chapitre présentera les résultats de l'étude, à savoir les statistiques descriptives, l'évaluation du protocole, la caractérisation des mouvements, et l'évaluation de la méthode diagnostique.

3.1. Statistiques descriptives

3.1.1. Population

Entre 2014 et 2016, 31 sujets ont été inclus, dont une exclusion. Le sujet exclu présentait une imposante barbe rendant la prise de mesure impossible.

Le Tableau XVI décrit la population de sujets sains qui ont participé à l'étude. Le sex-ratio était de 0,58.

Tableau XVI : population étudiée.

| Population de sujets sains | | |
|-----------------------------|------------------------|---------|
| Nombre de sujets | n = 30 | |
| Age des sujets | 25,64 ans | (±2,92) |
| dont femmes : n = 19 | | |
| | âge : 25,40 ans | (±3,15) |
| dont hommes : n = 11 | | |
| | âge : 26,05 ans | (±2,58) |

3.1.2. Données

Avec ces 30 sujets, il a été possible de réaliser 411 captures. Après le post-traitement, 91,24% d'entre elles étaient exploitables (Tableau XVII).

Tableau XVII : données obtenues pour les 30 sujets inclus.

| | Total | % |
|--------------------------------|-------|--------|
| Nombre de capture : | 411 | |
| Captures exploitables : | 375 | 91,24% |

Parmi les captures exploitables, certaines ont été réalisées à plusieurs reprises sur un même sujet comme détaillé dans le Tableau XVIII.

Tableau XVIII : Données acquises sur les n =30 sujets sains inclus. (M0 : Statique ; Cplt : complet).

| | M0 | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | 3M1 | 3M2 | 3M3 | 3M4 | 3M5 | Cplt |
|------------------------------------|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Nb. de capture : | 37 | 34 | 34 | 34 | 34 | 34 | 34 | 34 | 34 | 34 | 34 | 34 |
| Captures exploitables : | 35 | 31 | 32 | 32 | 32 | 32 | 28 | 31 | 31 | 33 | 28 | 30 |
| <i>dont :</i> | | | | | | | | | | | | |
| Nb. de sujet différents (n) | 28 | 27 | 28 | 28 | 28 | 28 | 24 | 27 | 27 | 29 | 24 | 26 |
| <i>un même sujet :</i> | | | | | | | | | | | | |
| avec 2 sessions | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 3 sessions | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 4 et plus | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

3.2. Évaluation de la qualité du protocole de mesure

Dans cette partie sont détaillés les résultats en lien avec la validation de la méthode et de la technique d'analyse. Cela concerne notamment la préparation du sujet et la fiabilité des données obtenues.

3.2.1. Temps de pose des marqueurs

Le temps de pose des marqueurs a diminué au fur et à mesure de l'avancée du projet (Figure 45).

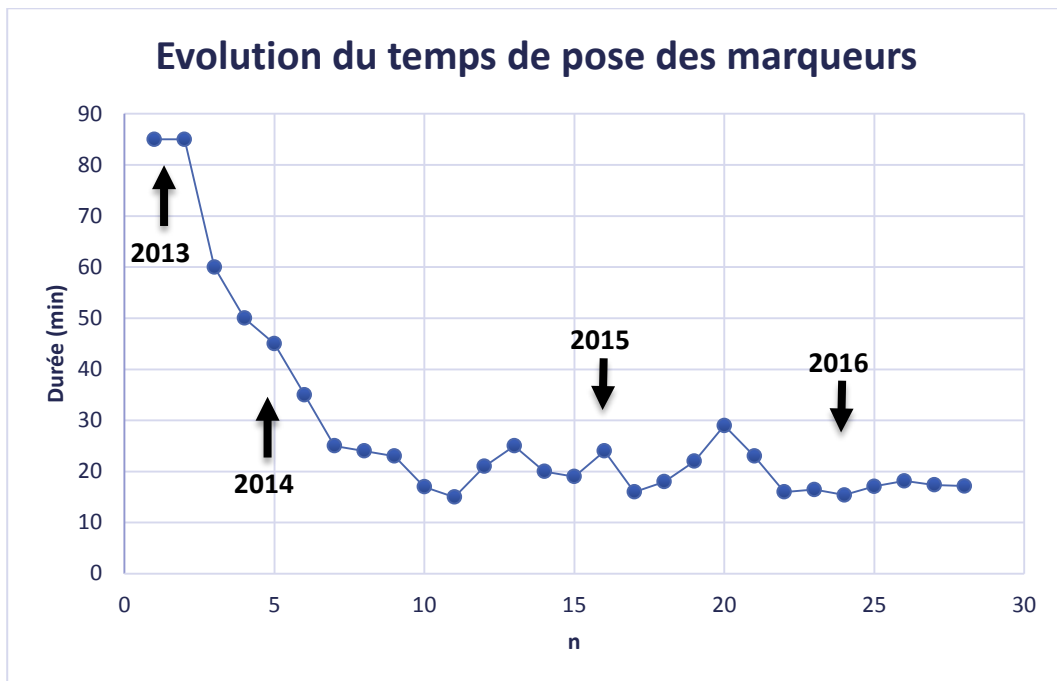


Figure 45 : Le temps de pose des marqueurs a diminué entre 2013 et 2016.

3.2.2. Précision de la mesure et marge d'erreur

La vitesse maximale des mouvements faciaux documentée dans la littérature [66] est évaluée à 135mm.s^{-1} . Ce mouvement concerne l'occlusion palpébrale. Afin de garantir une analyse optimale du mouvement, les paramètres de capture doivent permettre de mesurer des mouvements avec une amplitude et une fréquence au moins équivalente.

3.2.2.1. Paramètres métrologiques

3.2.2.1.1. Fréquence de mesure

Toutes les captures de ce protocole ($n=411$) ont été réalisées à une fréquence de 100Hz.

3.2.2.1.2. Précision de mesure

A l'aide d'un objet de taille connu, la précision de mesure de la plateforme d'analyse du mouvement a pu être mesurée. Elle était dans le cadre de notre protocole de l'ordre de 0,10 mm. Les résultats seront donc interprétés arrondis au dixième de millimètre.

3.2.2.1.3. Précision de reconstruction tridimensionnelle

3.2.2.1.3.1. Référentiel fixe Maxillaire

Le référentiel fixe maxillaire, défini par les marqueurs « Ma1, Ma2 et Ma3 », a été défini arbitrairement comme immobile. Ces déplacements ont été comparés par rapport à la valeur nulle théorique. Nous avons enregistré des déplacements moyens significatifs ($p<0.002$) de ces marqueurs (Tableau XIX et Figure 46). Ainsi, l'amplitude maximale est enregistrée sur le marqueur « Ma3 » soit 0,1mm ($\pm 0,1\text{mm}$). Cette amplitude peut être assimilée à la marge d'erreur de reconstruction tridimensionnelle.

Tableau XIX : Déplacement enregistrés pour les trois marqueurs du référentiel fixe.

| | Amplitude max. | Erreur standard | Amplitude 75pc | Erreur standard | Amplitude moyenne | Erreur standard |
|------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| Ma1 | 0,08336 | 0,03323 | 0,01293 | 0,002265 | 0,009116 | 0,001711 |
| Ma2 | 0,09736 | 0,01788 | 0,02559 | 0,00529 | 0,01742 | 0,003367 |
| Ma3 | 0,1451 | 0,05686 | 0,0236 | 0,004506 | 0,01662 | 0,003126 |

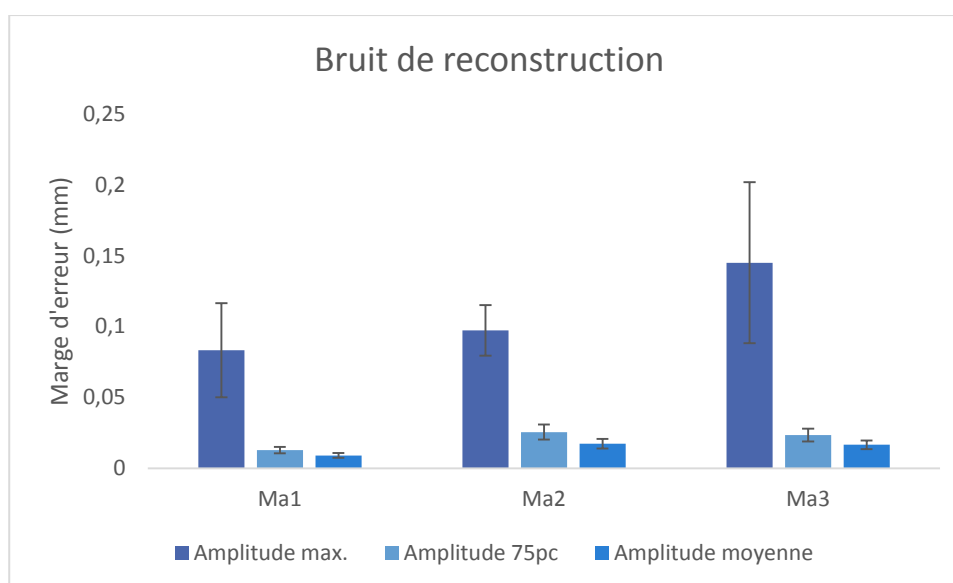


Figure 46 : Bruit de reconstruction.

3.2.2.1.3.2. Référentiel fixe auriculaire (A1-A2-A3)

Le référentiel fixe « auriculaire », par rapport à la position statique, se déplace de manière significative au cours de l'ensemble des mouvements étudiés (Tableau XX et Figure 47).

Tableau XX: déplacements moyens du référentiel fixe auriculaire au cours de l'ensemble des mouvements.

| Marqueur | Déplacement (mm) | Erreur Standard | Limite inf. | Limite sup. | p value |
|----------|------------------|-----------------|-------------|-------------|---------|
| A1 | 0,8 | 0,1 | 0,5 | 1,0 | <.0001 |
| A2 | 0,8 | 0,1 | 0,6 | 1,0 | <.0001 |
| A3 | 0,7 | 0,1 | 0,5 | 0,9 | <.0001 |

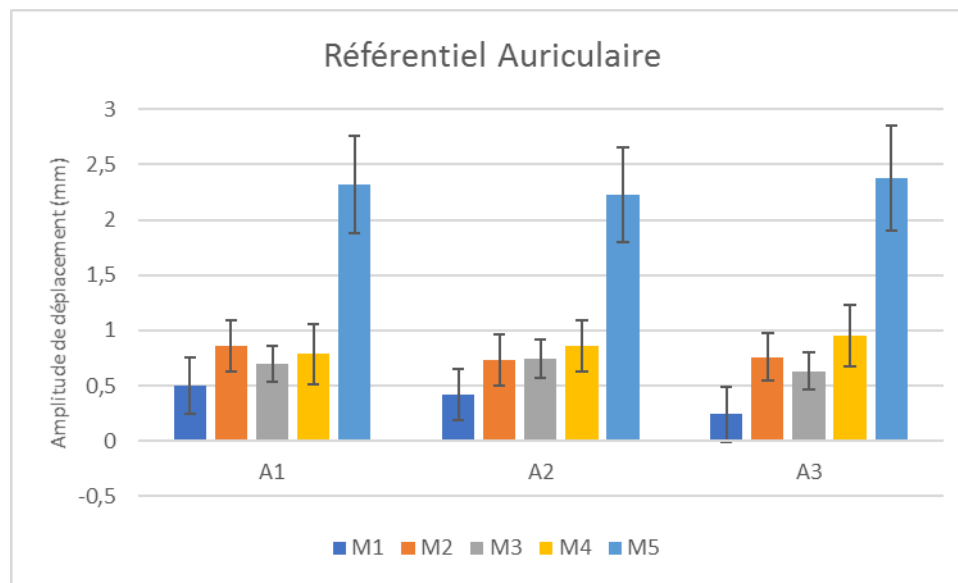


Figure 47 : Amplitude moyenne de déplacement du référentiel auriculaire lors de la réalisation des 5 mouvements, comparé à la position statique.

Au total, avec une précision de mesure et une précision de reconstruction tridimensionnelle de 0,1mm ($\pm 0,1$), nous pouvons estimer une précision des valeurs mesurées au dixième de millimètre.

3.2.3. Fiabilité des marqueurs

Parmi les captures exploitables, certains marqueurs étaient parfois non fonctionnels ou instables. Le Tableau XXI indique la présence de chacun des marqueurs sur l'ensemble des captures. Ceux-ci sont classés par ordre de fiabilité. La figure 48 représente la localisation des marqueurs les moins fiables.

Tableau XXI: Fiabilité des marqueurs.

| Marqueur | nb de captures | % présence | Marqueur | nb de captures | % présence | Marqueur | nb de captures | % présence |
|-------------|----------------|------------|-------------|----------------|------------|--------------|----------------|------------|
| F2 | 372 | 99% | Z11 | 359 | 95% | Cms5 | 341 | 90% |
| F5 | 372 | 99% | S9 | 354 | 94% | Dao2 | 339 | 90% |
| F6 | 372 | 99% | Ca01 | 355 | 94% | Dao5 | 339 | 90% |
| S5 | 372 | 99% | VI5 | 356 | 94% | Z1 | 337 | 89% |
| D2 | 371 | 99% | Cms7 | 353 | 94% | B6 | 336 | 89% |
| Ma1 | 367 | 98% | BZ5 | 356 | 94% | BZ9 | 338 | 89% |
| Ma3 | 370 | 98% | H3 | 353 | 94% | VI4 | 331 | 88% |
| A1 | 368 | 98% | H6 | 354 | 94% | Pln10 | 331 | 88% |
| A2 | 370 | 98% | Z10 | 356 | 94% | B8 | 333 | 88% |
| F4 | 370 | 98% | F1 | 352 | 93% | Pln5 | 333 | 88% |
| G0 | 369 | 98% | Z4 | 351 | 93% | B10 | 328 | 87% |
| S7 | 369 | 98% | B2 | 352 | 93% | B9 | 327 | 86% |
| VI6 | 368 | 98% | H0 | 352 | 93% | BZ7 | 326 | 86% |
| R5 | 368 | 98% | BZ8 | 352 | 93% | Pln3 | 325 | 86% |
| Z2 | 368 | 98% | Z7 | 349 | 93% | Ca03 | 321 | 85% |
| Dao1 | 369 | 98% | Pln2 | 349 | 93% | Pln7 | 321 | 85% |
| Z9 | 367 | 98% | S3 | 346 | 92% | Ca02 | 319 | 84% |
| Ma2 | 364 | 97% | VI1 | 348 | 92% | BZ6 | 318 | 84% |
| S6 | 366 | 97% | VI2 | 347 | 92% | C01 | 314 | 83% |
| D1 | 364 | 97% | VI3 | 348 | 92% | BZ1 | 309 | 82% |
| D3 | 364 | 97% | C02 | 347 | 92% | Pln11 | 307 | 81% |
| Z5 | 365 | 97% | Z3 | 347 | 92% | B1 | 308 | 81% |
| BZ2 | 366 | 97% | B5 | 346 | 92% | Dao3 | 305 | 80% |
| BZ3 | 365 | 97% | B11 | 348 | 92% | Dao6 | 299 | 79% |
| F3 | 361 | 96% | Pln4 | 348 | 92% | B7 | 301 | 79% |
| F7 | 361 | 96% | S4 | 345 | 91% | Pln1 | 301 | 79% |
| S8 | 361 | 96% | S10 | 344 | 91% | Cmi5 | 298 | 78% |
| B4 | 360 | 96% | N3 | 342 | 91% | D4 | 294 | 77% |
| B3 | 362 | 96% | Cms3 | 342 | 91% | Cmi1 | 293 | 77% |
| H4 | 363 | 96% | Cms1 | 343 | 91% | Pln9 | 285 | 75% |
| R2 | 363 | 96% | Dao4 | 344 | 91% | N1 | 273 | 71% |
| S1 | 359 | 95% | B12 | 342 | 91% | N4 | 258 | 67% |
| S2 | 357 | 95% | BZ10 | 344 | 91% | Cmi3 | 235 | 61% |
| Ca04 | 357 | 95% | Z8 | 345 | 91% | Pps02 | 152 | 38% |
| BZ4 | 359 | 95% | N2 | 342 | 91% | Pps01 | 137 | 34% |
| H1 | 359 | 95% | A3 | 341 | 90% | Lc2 | 136 | 33% |
| M0 | 359 | 95% | Pln8 | 340 | 90% | Lc5 | 128 | 31% |

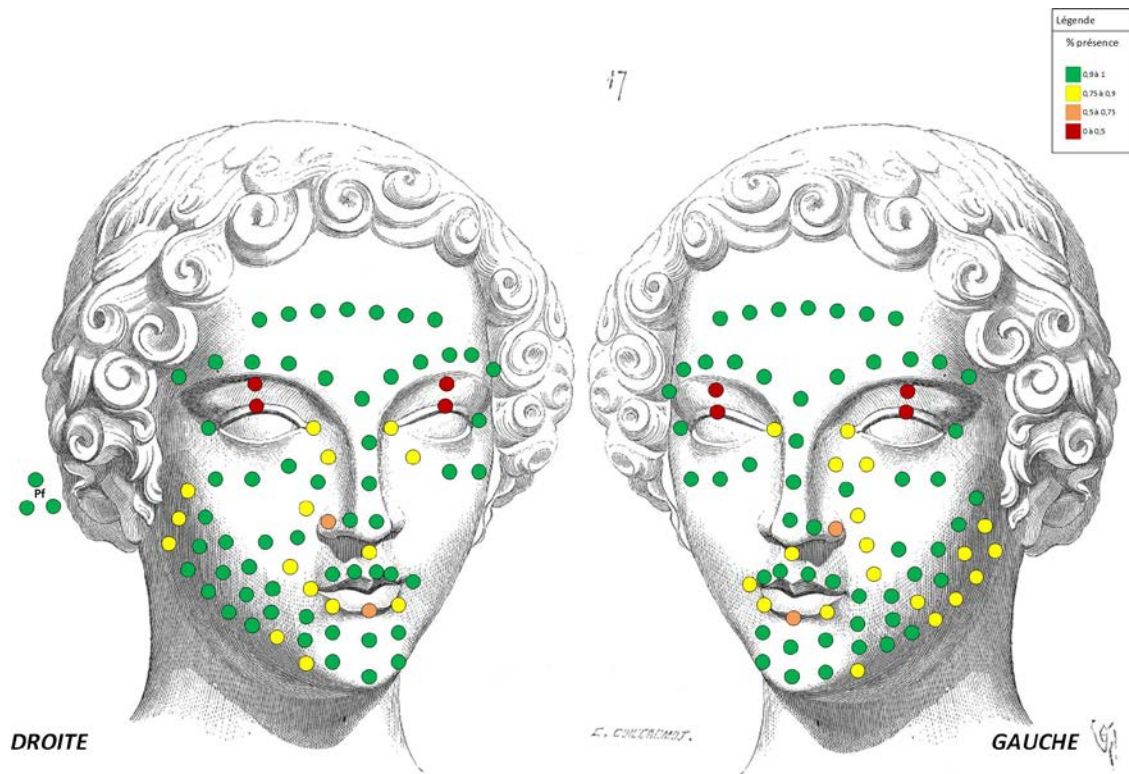


Illustration : « Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle » - Eugène Viollet-le-Duc (1856).

Figure 48 : Fiabilité des marqueurs. En vert les marqueurs identifiés dans plus de 90% des captures.

Tableau XXII : Fiabilité des marqueurs par mouvement pour les 10 marqueurs les moins fiables. En rouge, les mouvements d'intérêt de ces marqueurs.

| | Lc5 | Lc2 | Pps01 | Pps02 | Cmi3 | N4 | N1 | Pln9 | D4 | Cmi1 | Cmi5 | Da06 | B7 | Pln1 |
|-----------|-----|-----|-------|-------|------|-----|-----|------|-----|------|------|------|-----|------|
| M1 | 33% | 37% | 23% | 30% | 80% | 77% | 87% | 87% | 87% | 93% | 90% | 83% | 77% | 87% |
| M2 | 20% | 17% | 27% | 30% | 77% | 70% | 73% | 70% | 83% | 87% | 93% | 83% | 80% | 80% |
| M3 | 27% | 40% | 33% | 37% | 43% | 63% | 73% | 73% | 83% | 70% | 77% | 77% | 80% | 87% |
| M4 | 30% | 33% | 40% | 37% | 50% | 57% | 63% | 77% | 83% | 57% | 70% | 73% | 83% | 80% |
| M5 | 23% | 30% | 37% | 43% | 67% | 77% | 83% | 73% | 60% | 80% | 80% | 80% | 77% | 87% |
| Statique | 90% | 87% | 80% | 90% | 83% | 73% | 87% | 90% | 90% | 93% | 90% | 90% | 80% | 80% |
| TOTAL (%) | 37% | 41% | 40% | 45% | 67% | 70% | 78% | 78% | 81% | 80% | 83% | 81% | 80% | 84% |

Le Tableau XXII présente le pourcentage de présence des marqueurs les moins fiables par mouvement. Cinq marqueurs sont présents pour moins de 50% dans certains mouvements. La faible détection des marqueurs « Lc » et « Pps » est liée au fait que ceux-ci sont masqués lors de l'ouverture des paupières.

3.2.4. Reproductibilité de mesure

3.2.4.1. Amplitude de déplacement

Les valeurs caractéristiques des amplitudes moyennes de déplacement interindividuelles (n=28) sont détaillées en Annexe VII. Ces données présentent notamment l'écart-type (SD) et la moyenne

des amplitudes de déplacements. L'écart-type et le coefficient de variation permettent notamment d'apprécier la variabilité de la mesure, et donc sa reproductibilité.

Tableau XXIII : Amplitudes moyennes de déplacement, écarts-types moyens et coefficients de variation (CV) pour n = 28 sujets ayant réalisés les cinq mouvements et une prise statique.

| <i>n = 28</i> | Amplitude moyenne | Ecart-type moyen | CV |
|-----------------|--------------------------|-------------------------|-----------|
| <i>Statique</i> | 0,2 | 0,22 | 92% |
| <i>M1</i> | 0,4 | 0,39 | 89% |
| <i>M2</i> | 1,7 | 0,86 | 51% |
| <i>M3</i> | 1,1 | 0,58 | 51% |
| <i>M4</i> | 1,1 | 0,52 | 46% |
| <i>M5</i> | 2,4 | 0,97 | 40% |

Le Tableau XXIII montre des coefficients de variation importants, notamment lorsque les moyennes sont de faible amplitude.

Par ailleurs, des séries de mesures intra individuelles ont été réalisées sur deux sujets. Elles portent sur la position statique avec quatre mesures répétées à distance (Annexe VIII). Nous avons pu réaliser également deux répétitions du protocole complet (les cinq mouvements à la suite) sur trois sujets (Annexe IX). Ce faible effectif ne nous permet que d'estimer des tendances.

Concernant les mesure intra-individuelles statiques, nous retrouvons une variabilité importante, mais inférieure à la précision de mesure pour le sujet 2 (Tableau XXIV).

Tableau XXIV : Amplitudes moyennes de déplacement, écarts-types moyens et coefficients de variation (CV) pour deux sujets ayant réalisé à distance, quatre fois une capture statique.

| <i>Statique</i> | Amplitude moyenne | Ecart-type moyen | CV |
|-----------------|--------------------------|-------------------------|-----------|
| <i>Sujet 2</i> | 0,1 | 0,07 | 46% |
| <i>Sujet 5</i> | 0,3 | 0,20 | 66% |

Pour la réalisation du protocole complet sur trois sujets, nous retrouvons des coefficients de variation compris entre 16 et 19% selon les sujets (Tableau XXV).

Tableau XXV : Amplitudes moyennes de déplacement, écarts-type et coefficients de variation (CV) pour trois même sujets ayant réalisé à distance, deux fois le protocole complet.

| | Amplitude moyenne | Ecart-type moyen | CV |
|----------------|--------------------------|-------------------------|-----------|
| <i>Sujet 1</i> | 1,4 | 0,27 | 19% |
| <i>Sujet 2</i> | 1,4 | 0,24 | 18% |
| <i>Sujet 5</i> | 1,5 | 0,23 | 16% |

3.2.4.2. Profils de déplacement

Les cinq mouvements ont été étudiés de manière isolée (M1-M2-M3-M4-M5) et lors de trois répétitions du même mouvement (M1x3-M2x3-M3x3-M4x3-M5x3).

Le Tableau XXVI dénombre les marqueurs qui présentent une amplitude de déplacement significativement supérieure lors d'un mouvement répété trois fois par rapport au mouvement isolé.

Tableau XXVI : Différence d'amplitude maximale moyenne entre les mouvements isolés et les mouvements répétés.

| Amplitude maximale | Nb. Marqueurs significatifs à p < 0.05 | Différence moyenne (mm) | SD | CV |
|--------------------|--|-------------------------|-----|--------|
| M1 | 31 | -0,6 | 0,1 | -13,9% |
| M2 | 97 | -1,1 | 0,1 | -12,0% |
| M3 | 79 | -1,0 | 0,2 | -16,2% |
| M4 | 54 | -1,0 | 0,2 | -18,9% |
| M5 | 32 | -1,3 | 0,2 | -12,6% |

Les tableaux XXVII à XXIX représentent les corrélations entre mouvements isolés et mouvements répétés. **Nous observons une forte corrélation entre chacun des mouvements isolés et les mouvements répétés trois fois (vert).** Par ailleurs, nous pouvons noter que les mouvements M3 et M4 sont également fortement corrélés entre eux.

Tableau XXVII : Matrice de corrélation (Pearson) entre mouvements isolés et mouvements répétés trois fois. Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha = 0,05$ pour les amplitudes moyennes.

| Mouvement | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | 3M1 | 3M2 | 3M3 | 3M4 | 3M5 |
|-----------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
| M1 | 1 | 0,601 | -0,138 | -0,151 | -0,089 | 0,960 | 0,560 | 0,137 | -0,087 | -0,199 |
| M2 | 0,601 | 1 | -0,503 | -0,523 | -0,272 | 0,535 | 0,980 | -0,321 | -0,482 | -0,330 |
| M3 | -0,138 | -0,503 | 1 | 0,977 | 0,731 | 0,042 | -0,436 | 0,953 | 0,976 | 0,763 |
| M4 | -0,151 | -0,523 | 0,977 | 1 | 0,799 | 0,038 | -0,458 | 0,928 | 0,987 | 0,827 |
| M5 | -0,089 | -0,272 | 0,731 | 0,799 | 1 | 0,103 | -0,222 | 0,705 | 0,785 | 0,986 |

Tableau XXVIII : Matrice de corrélation (Pearson) entre mouvements simples et mouvements répétés trois fois. Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha = 0,05$ pour les amplitudes maximales.

| Mouvement | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | 3M1 | 3M2 | 3M3 | 3M4 | 3M5 |
|-----------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| M1 | 1 | 0,506 | 0,070 | 0,052 | 0,029 | 0,958 | 0,430 | 0,152 | 0,028 | 0,045 |
| M2 | 0,506 | 1 | -0,422 | -0,430 | -0,196 | 0,574 | 0,987 | -0,336 | -0,437 | -0,173 |
| M3 | 0,070 | -0,422 | 1 | 0,981 | 0,756 | 0,111 | -0,385 | 0,980 | 0,980 | 0,776 |
| M4 | 0,052 | -0,430 | 0,981 | 1 | 0,780 | 0,098 | -0,395 | 0,972 | 0,980 | 0,801 |
| M5 | 0,029 | -0,196 | 0,756 | 0,780 | 1 | 0,098 | -0,144 | 0,751 | 0,749 | 0,992 |

Tableau XXIX : Matrice de corrélation (Pearson) entre mouvements simples et mouvements répétés trois fois. Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha = 0,05$ pour les amplitudes au 75^{ème} percentile.

| Mouvement | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | 3M1 | 3M2 | 3M3 | 3M4 | 3M5 |
|-----------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| M1 | 1 | 0,520 | -0,168 | -0,173 | -0,114 | 0,974 | 0,425 | 0,110 | -0,066 | -0,190 |
| M2 | 0,520 | 1 | -0,539 | -0,555 | -0,283 | 0,492 | 0,954 | -0,373 | -0,503 | -0,323 |
| M3 | -0,168 | -0,539 | 1 | 0,964 | 0,711 | -0,068 | -0,465 | 0,945 | 0,978 | 0,751 |
| M4 | -0,173 | -0,555 | 0,964 | 1 | 0,799 | -0,072 | -0,493 | 0,900 | 0,974 | 0,825 |
| M5 | -0,114 | -0,283 | 0,711 | 0,799 | 1 | -0,008 | -0,280 | 0,640 | 0,743 | 0,990 |

La figure 49 permet de visualiser une bonne corrélation et une bonne concordance des données pour les mesures isolées et les mesures répétées.

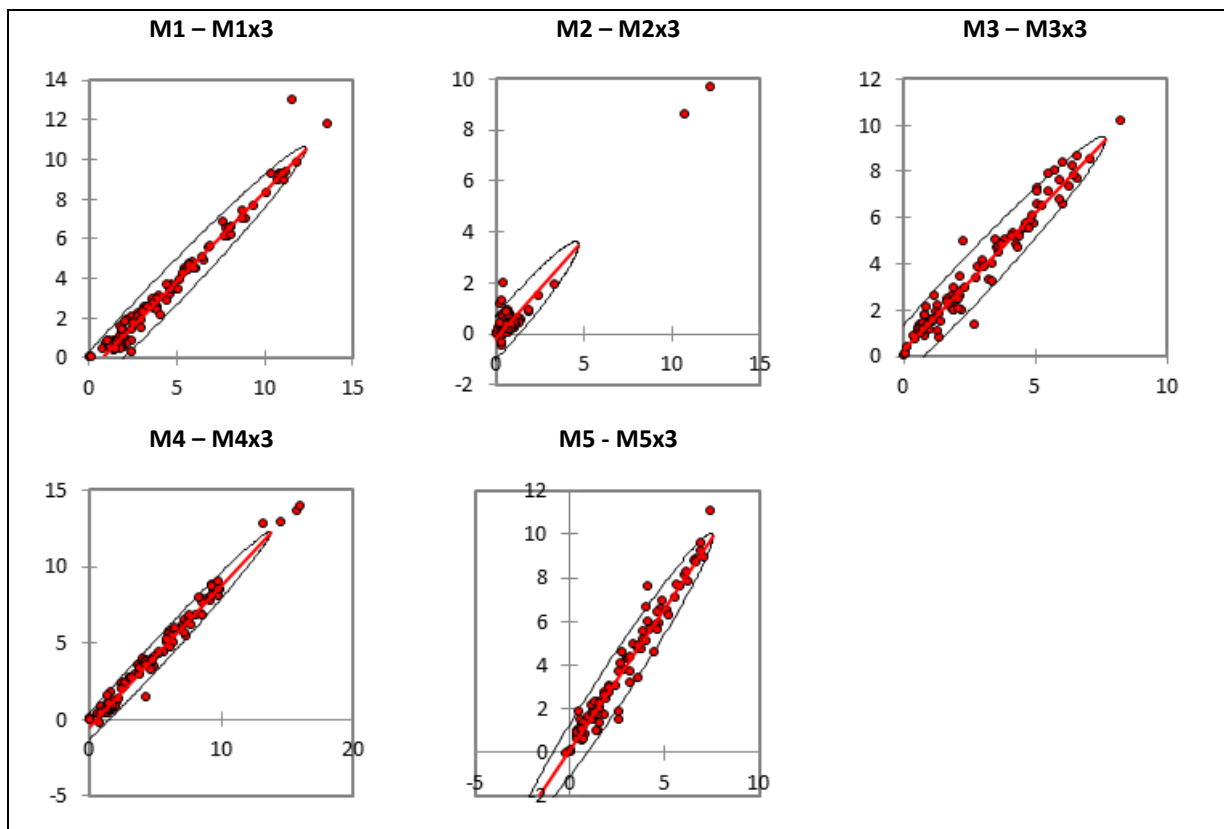


Figure 49 : Nuage de points et corrélation (Pearson) entre mouvements isolés (ordonnée) et mouvements répétés trois fois (abscisse) pour les amplitudes maximales.

La figure 50 représente la corrélation mesurée entre M3 et M4. Nous pouvons constater une dispersion et une moins bonne concordance des données.

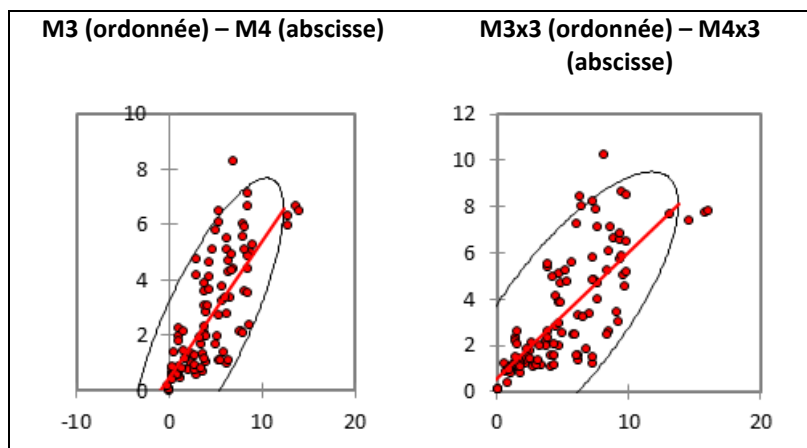


Figure 50 : Nuage de points et corrélation (Pearson) entre les deux mouvements de protrusion labiale (M3 : son « O » et M4 : son « pou »).

3.2.5. Symétrie des mouvements faciaux

Sur les 111 marqueurs, 96 étaient placés sur les deux hémifaces. Les marqueurs restants étaient placés sur la ligne médiane. Afin d'évaluer la symétrie des mouvements faciaux, nous avons comparé l'amplitude de déplacement relatif de chacune des 48 paires de marqueurs.

La comparaison des deux hémifaces à l'aide d'un t-test pour échantillons appariés (Tableau XXX) a permis d'identifier une asymétrie des mouvements M3 et M4 pour les valeurs moyennes. Cette asymétrie n'est pas retrouvée pour les valeurs maximales (Tableau XXXI).

Tableau XXX : Comparaison des amplitudes moyennes de déplacement entre l'hémiface droite et l'hémiface gauche pour les cinq mouvements étudiés.

| <i>Mouvement</i> | Moyenne Dt (mm) | Moyenne G (mm) | Différence moyenne | p-value |
|------------------|------------------------|-----------------------|---------------------------|----------------|
| <i>M1</i> | 0,2 (±0,6) | 0,2 (±0,6) | 0,0 | 0,630 |
| <i>M2</i> | 1,6 (±1,3) | 1,7 (±1,4) | 0,1 | 0,131 |
| <i>M3</i> | 0,9 (±0,8) | 1,0 (±0,8) | 0,1 | 0,0002 |
| <i>M4</i> | 0,9 (±0,8) | 1,0 (±0,8) | 0,1 | 0,002 |
| <i>M5</i> | 2,2 (±1,6) | 2,2 (±1,6) | 0,0 | 0,179 |

Tableau XXXI : Comparaison des amplitudes maximales de déplacement entre l'hémiface droite et l'hémiface gauche pour les cinq mouvements étudiés.

| <i>Mouvement</i> | Moyenne Dt (mm) | Moyenne G (mm) | Différence moyenne | p-value |
|------------------|------------------------|-----------------------|---------------------------|----------------|
| <i>M1</i> | 0,7 (±1,4) | 0,6 (±1,2) | -0,1 | 0,055 |
| <i>M2</i> | 3,7 (±2,9) | 3,8 (±2,9) | 0,1 | 0,058 |
| <i>M3</i> | 2,5 (±1,9) | 2,6 (±1,9) | 0,1 | 0,085 |
| <i>M4</i> | 2,7 (±1,9) | 2,7 (±1,9) | 0,0 | 0,312 |
| <i>M5</i> | 4,6 (±3,2) | 4,6 (±3,3) | 0,0 | 0,407 |

La figure 51 présente les différences d'amplitude de chacun des marqueurs.

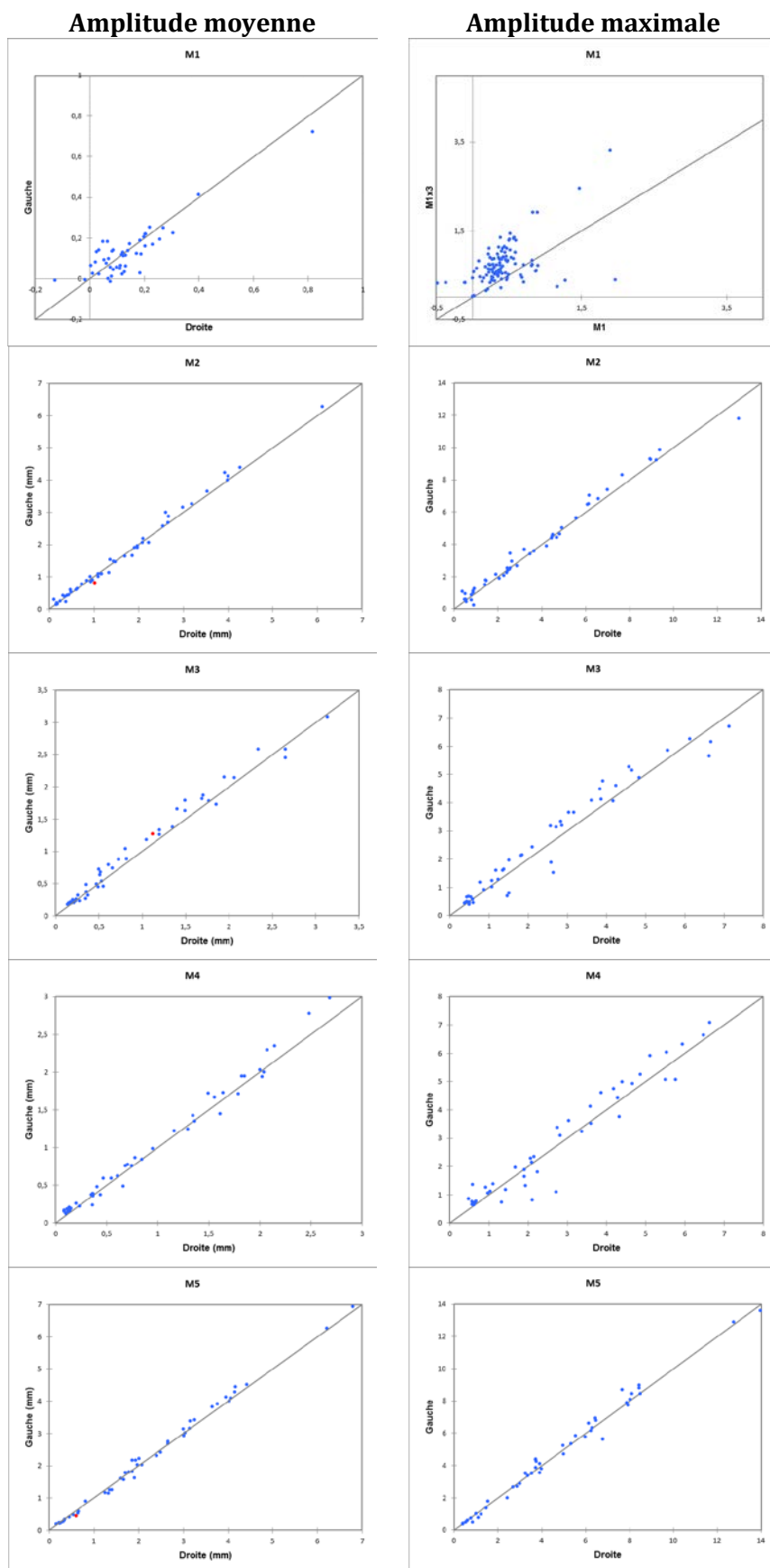


Figure 51 : Écart de déplacement des marqueurs entre l'hémiface droite et l'hémiface gauche pour les valeurs moyennes et maximales.

Après une analyse via un modèle mixte d'ANOVA, il a été possible d'identifier des marqueurs présentant une asymétrie significative (c'est-à-dire une amplitude significativement différente d'un côté ou de l'autre pour une paire de marqueurs) (Tableaux XXXII et XXXIII).



Tableau XXXII : Marqueurs présentant une asymétrie significative pour les amplitudes moyennes.

| <i>Marqueurs</i> | <i>Mouvement</i> | <i>Différence</i> | <i>Erreur standard</i> | <i>Latéralité</i> | <i>p-value</i> |
|------------------|------------------|-------------------|------------------------|-------------------|----------------|
| <i>Ca02-Ca03</i> | M2 | 0,3mm | 0,1mm | Gauche (- 21%) | 0,02 |
| | M5 | 0,1mm | 0,0mm | Gauche (-10%) | 0,01 |
| <i>BZ2-BZ7</i> | M3 | 0,1mm | 0,1mm | Droite (-23%) | 0,02 |
| <i>S2-S9</i> | M5 | 0,2mm | 0,1mm | Gauche (-38%) | 0,04 |
| <i>F2-F6</i> | M5 | 0,1mm | 0,0mm | Gauche (-21%) | 0,05 |
| <i>F3-F5</i> | M5 | 0,1mm | 0,0mm | Gauche (-13%) | 0,04 |

Tableau XXXIII : Marqueurs présentant une asymétrie significative pour les amplitudes maximales.

| <i>Marqueurs</i> | <i>Mouvement</i> | <i>Différence</i> | <i>Erreur standard</i> | <i>Latéralité</i> | <i>p-value</i> |
|------------------|------------------|-------------------|------------------------|-------------------|----------------|
| <i>Dao2-Dao5</i> | M3 | 0,5mm | 0,2mm | Droite (-13%) | 0,01 |
| <i>Z4-Z10</i> | M4 | 0,4mm | 0,2mm | Droite (-2%) | 0,05 |

3.3. Analyse des mouvements

L'ensemble des mouvements a été étudié par rapport à la position « statique (M0) ». Pour cela, nous avons calculé pour chacun des marqueurs, l'amplitude de déplacement par rapport à la position statique. Après une analyse par une méthode mixte d'ANOVA, les marqueurs présentant une amplitude de déplacement significative ($p < 0,05$) par rapport à la position statique ont été décrits dans cette partie.

3.3.1. Mobilité globale de la face durant la réalisation du protocole

La réalisation des cinq mouvements étudiés en une seule capture a permis d'identifier les zones animées et les zones non mobilisées par le protocole de capture. La figure 52 représente les amplitudes moyennes, maximales et au 75^{ème} percentile des mouvements réalisés. La figure 53 représente la localisation des marqueurs en fonction de leur amplitude.

Les figures sont représentées en vis-à-vis afin de faciliter leur lecture.

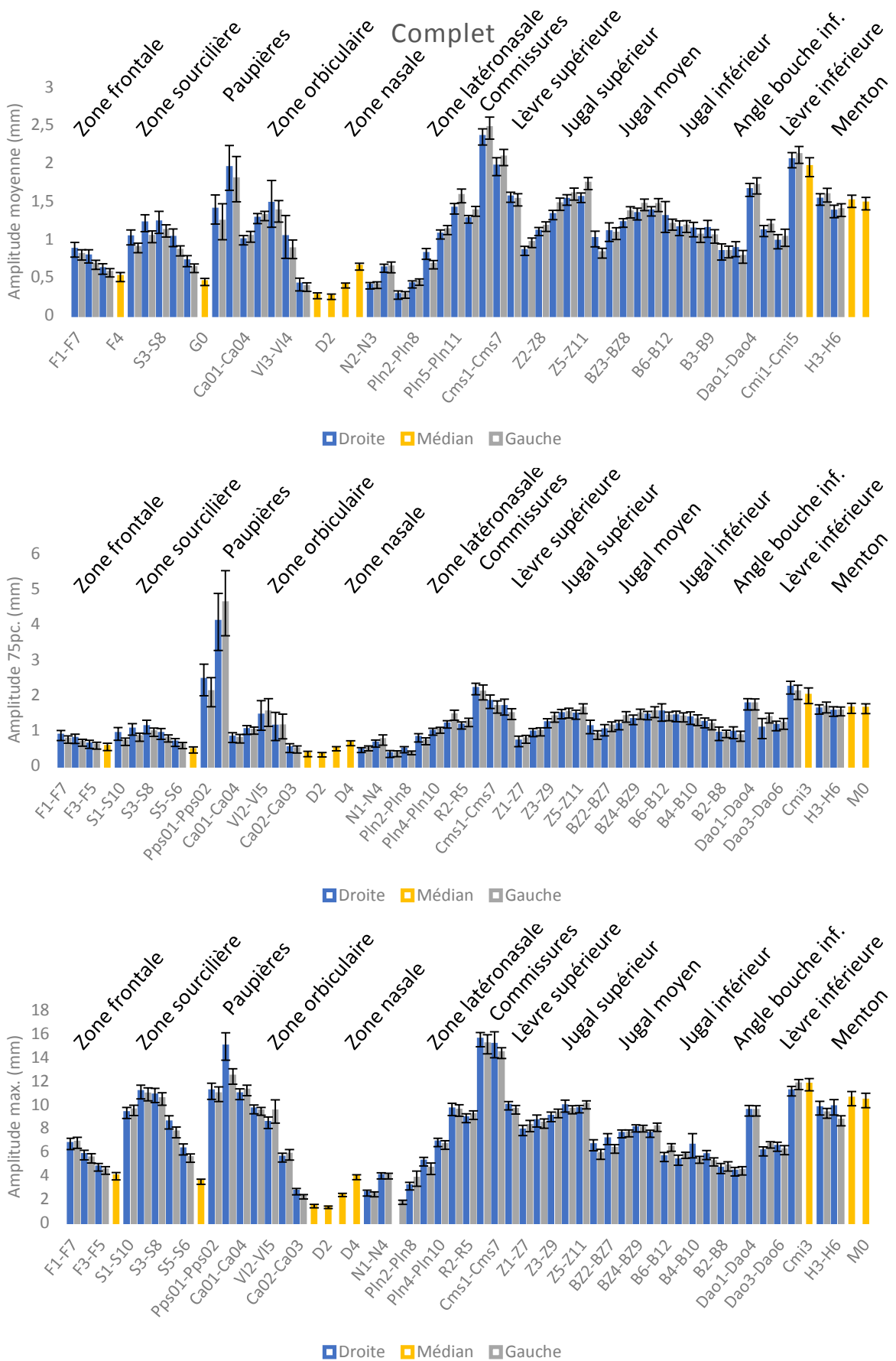
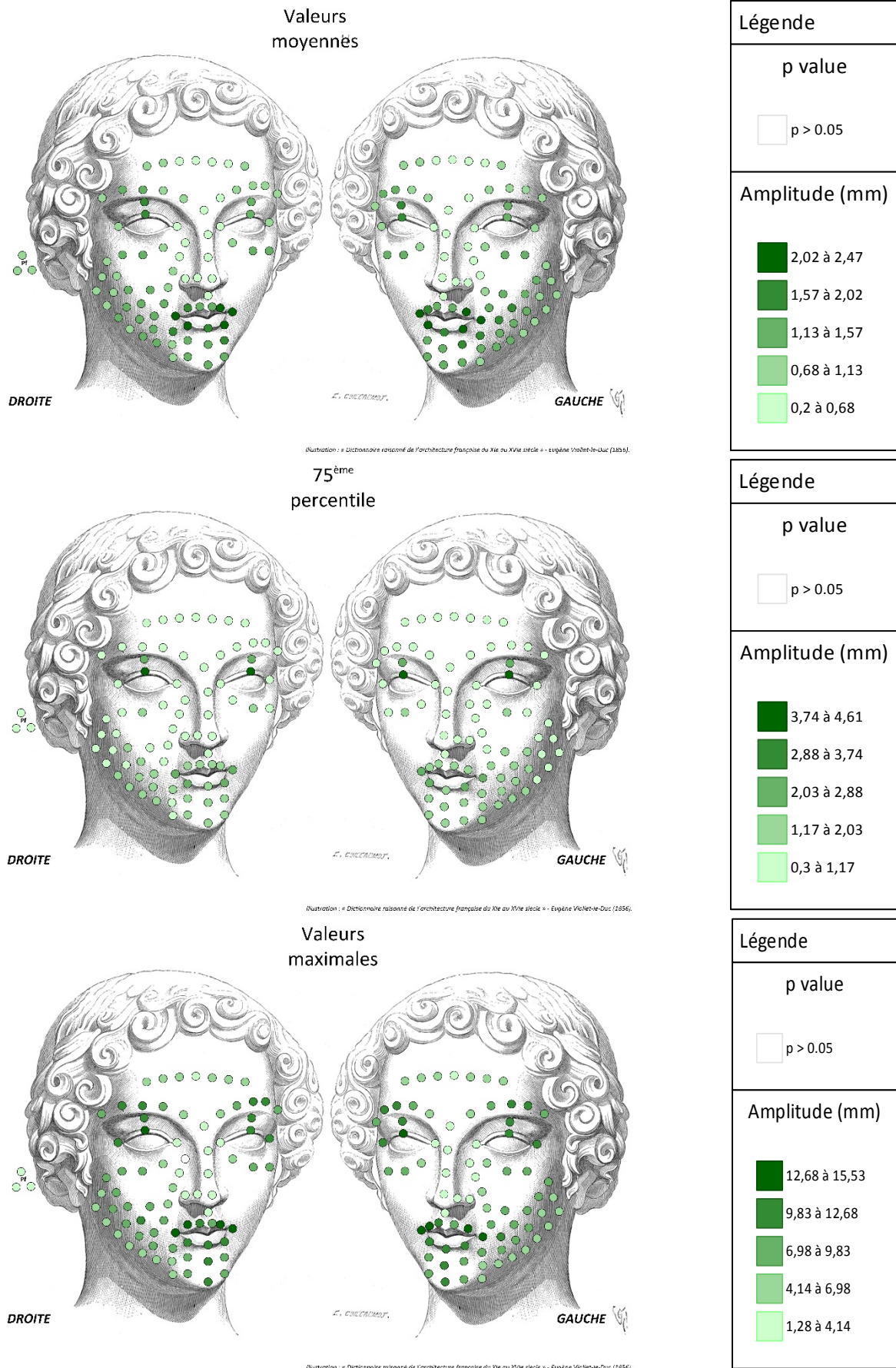


Figure 52 : Amplitude de déplacement des marqueurs sur l'ensemble de protocole.



3.3.1.1. Marqueurs les moins mobiles

Les marqueurs les moins mobiles sont localisés sur le Dorsum du nez (Tableau XXXIV). L'amplitude du déplacement de « D2 » est bien inférieure aux mouvements du référentiel auriculaire.

Tableau XXXIV : marqueurs les moins mobiles sur l'ensemble du protocole.



| Marqueur | Amplitude moy. (mm) | Erreur Standard | Limite inf. | Limite sup. | p value |
|----------|---------------------|-----------------|-------------|-------------|---------|
| D2 | 0,24 | 0,03 | 0,17 | 0,31 | <.0001 |
| D1 | 0,25 | 0,04 | 0,18 | 0,33 | <.0001 |
| Pln1 | 0,26 | 0,06 | 0,15 | 0,37 | <.0001 |
| Pln7 | 0,26 | 0,04 | 0,18 | 0,35 | <.0001 |

3.3.1.2. Marqueurs les plus mobiles

Les marqueurs les plus mobiles sont localisés sur la zone péribuccale (Tableau XXXV).

Tableau XXXV : marqueurs les plus mobiles sur l'ensemble du protocole.



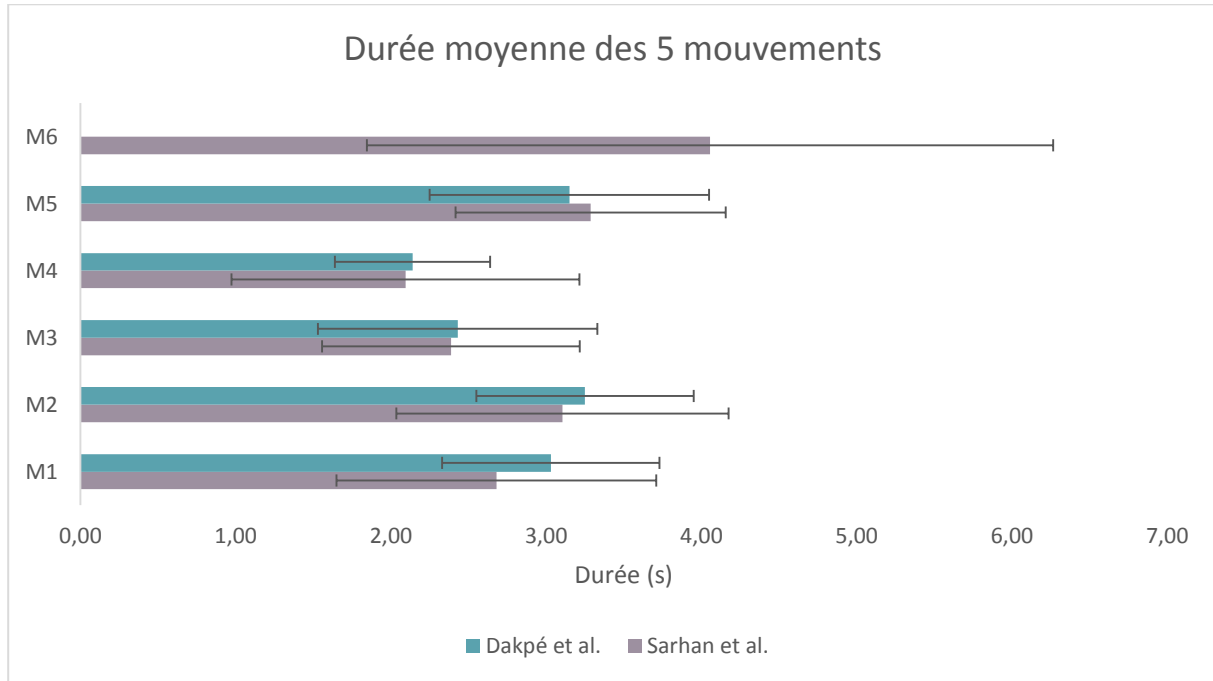
| Marqueur | Amplitude moy. (mm) | Erreur Standard | Limite inf. | Limite sup. | p value |
|----------|---------------------|-----------------|-------------|-------------|---------|
| C02 | 2,5 | 0,2 | 2,2 | 2,8 | <.0001 |
| C01 | 2,3 | 0,1 | 2,1 | 2,6 | <.0001 |
| Cmi5 | 2,1 | 0,1 | 1,9 | 2,3 | <.0001 |
| Cms7 | 2,1 | 0,1 | 1,9 | 2,3 | <.0001 |
| Cmi1 | 2,0 | 0,1 | 1,8 | 2,2 | <.0001 |
| Cms1 | 2,0 | 0,1 | 1,7 | 2,2 | <.0001 |
| Cmi3 | 2,0 | 0,1 | 1,7 | 2,2 | <.0001 |
| Lc5 | 1,9 | 0,3 | 1,4 | 2,5 | <.0001 |
| Lc2 | 1,8 | 0,3 | 1,2 | 2,4 | 0,0019 |
| Z11 | 1,7 | 0,1 | 1,6 | 1,9 | <.0001 |
| Dao4 | 1,7 | 0,1 | 1,5 | 1,9 | <.0001 |
| Dao1 | 1,7 | 0,1 | 1,5 | 1,8 | <.0001 |
| Z10 | 1,6 | 0,1 | 1,4 | 1,8 | <.0001 |
| H4 | 1,6 | 0,1 | 1,4 | 1,8 | <.0001 |
| Pln11 | 1,6 | 0,1 | 1,4 | 1,8 | <.0001 |

3.3.2. Durée de réalisation des mouvements faciaux

La durée de chacun des mouvements a été mesurée à partir des captures. L'amorce et la fin du mouvement ont été repérés visuellement à partir d'un visionnage frame par frame de l'enregistrement à 100fps.

Tableau XXXVI: Durée moyenne des cinq mouvements du protocole et de M6 : sourire spontané.

| Mouvement | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <i>n</i> | 33 | 33 | 33 | 32 | 33 | 18 |
| <i>Durée (s)</i> | 2,68 | 3,11 | 2,39 | 2,09 | 3,29 | 4,06 |
| <i>SD</i> | 1,03 | 1,07 | 0,83 | 1,12 | 0,87 | 2,21 |

**Figure 54 : Durées moyennes des mouvements capturés en secondes.**

Ces durées (Tableau XXXVI) ont été comparées aux données obtenues par Dakpé et al. [86] (Figure 54) à l'aide du test de Wilcoxon. Celui-ci nous indique qu'il n'y a pas de différence significative entre ces deux échantillons ($p= 0,343$).

3.4. Zones d'action des mouvements étudiés

Pour chacun des mouvements (M1 à M5), nous avons étudié l'amplitude moyenne, au 75^{ème} percentile et l'amplitude maximale du déplacement.

L'amplitude de déplacement est a été mesurée par rapport à la position statique de référence (M0).

Les figures 55 à 64 représentent l'amplitude de déplacements des marqueurs lors de la réalisation des cinq mouvements à savoir :

- Fermeture simple des paupières (M1)
- Fermeture forcée des paupières (M2)
- Protrusion labiale sur le son « O » (M3)
- Protrusion labiale sur le son « pou » (M4)
- Sourire volontaire découvrant les dents (M5).

Sur les graphiques et illustrations, seuls sont figurés les marqueurs présentant un déplacement significatif ($p < 0,05$) par rapport à la position statique.

Les figures sont représentées en vis-à-vis afin de faciliter leur lecture.

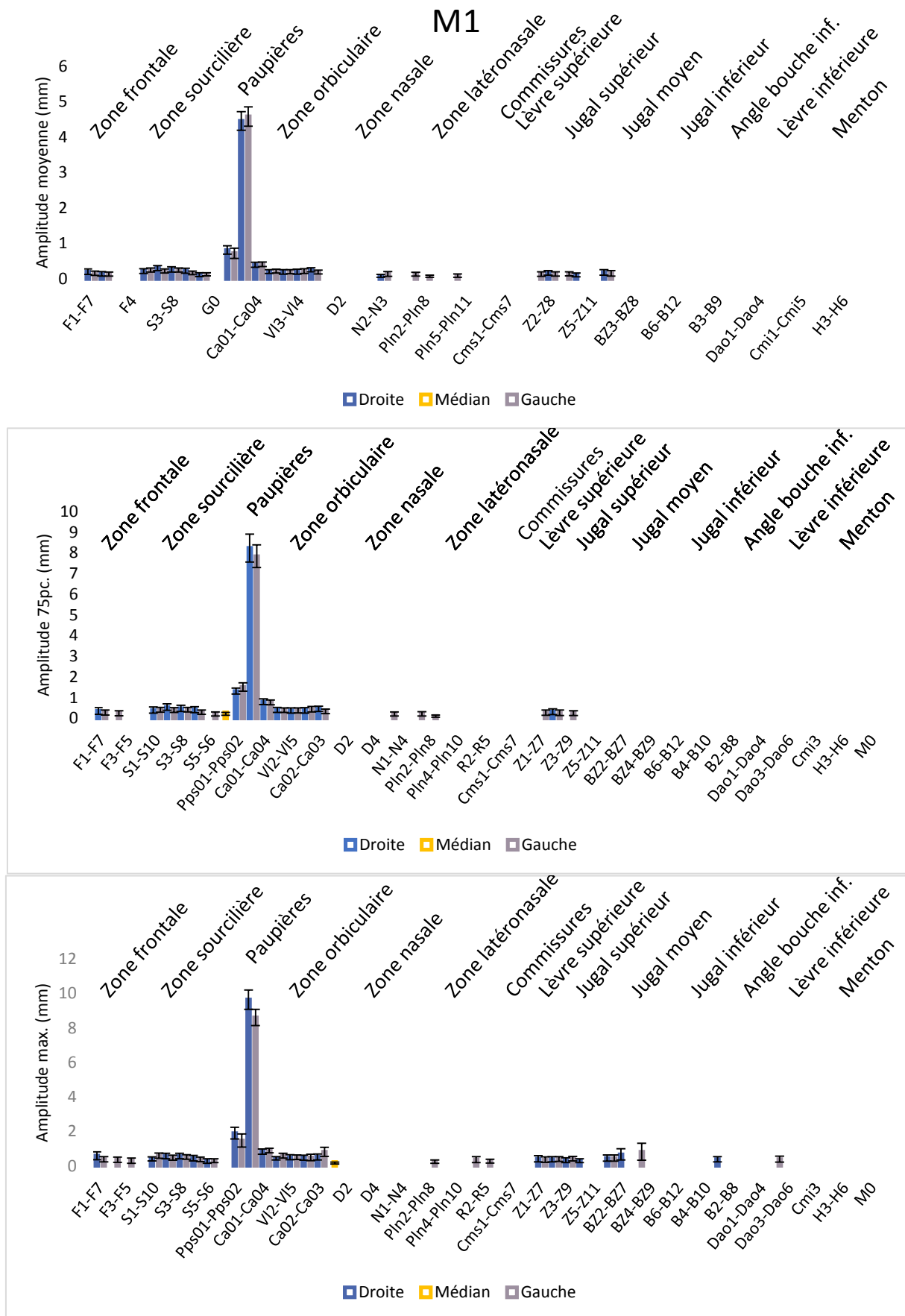


Figure 55 : Amplitude du mouvement (moyenne, 75 percentile et maximale) lors de la fermeture simple des paupières (M1).

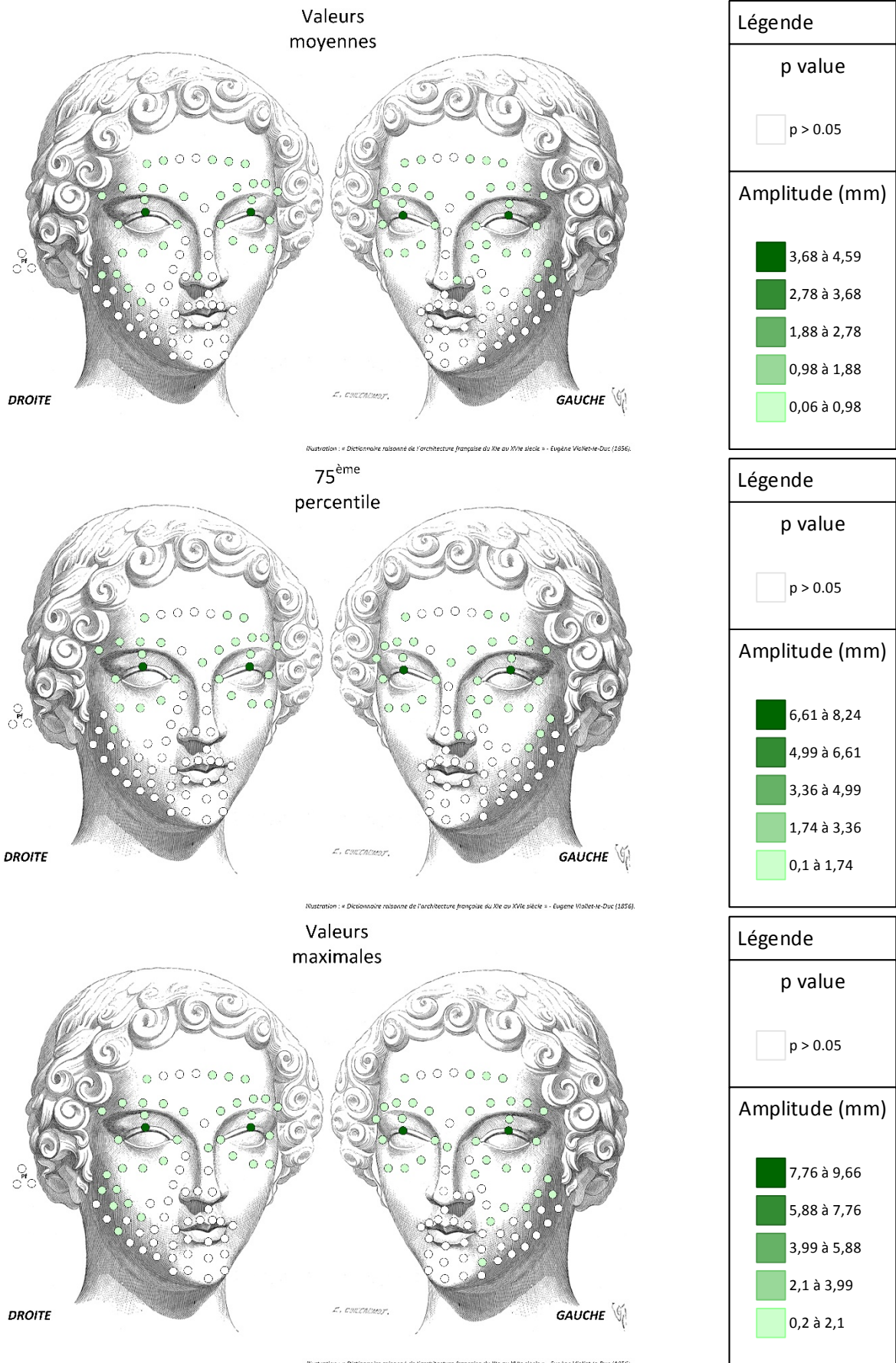


Figure 56 : Amplitude de déplacement lors de M1 pour les valeurs moyennes, au 75^{ème} percentile et pour les valeurs maximales.

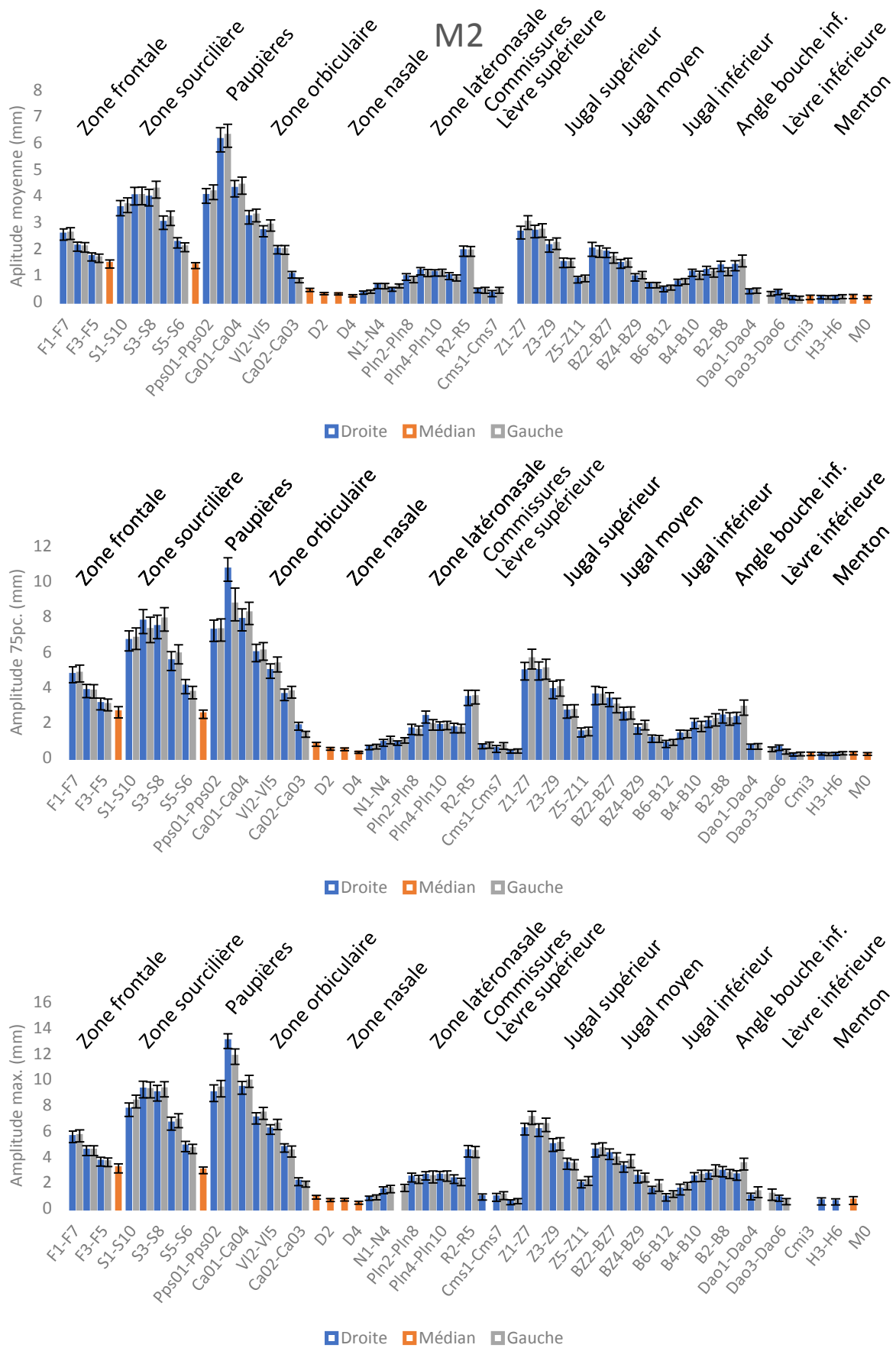


Figure 57 : Amplitude du mouvement (moyenne, 75 percentile et maximale) lors de la fermeture forcée des paupières (M2).

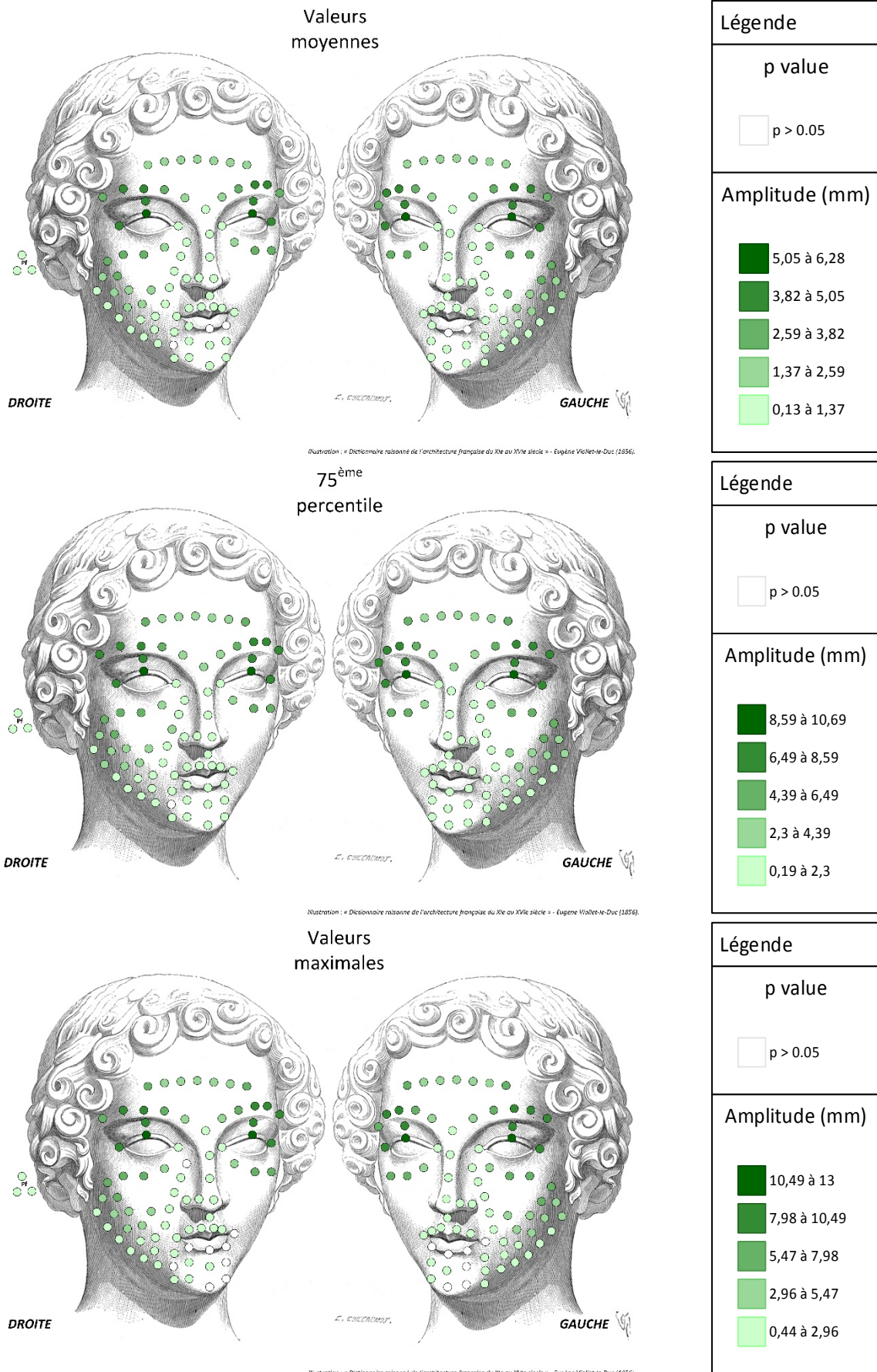


Figure 58 : Amplitude de déplacement lors de M2 pour les valeurs moyennes, au 75^{ème} percentile et pour les valeurs maximales.

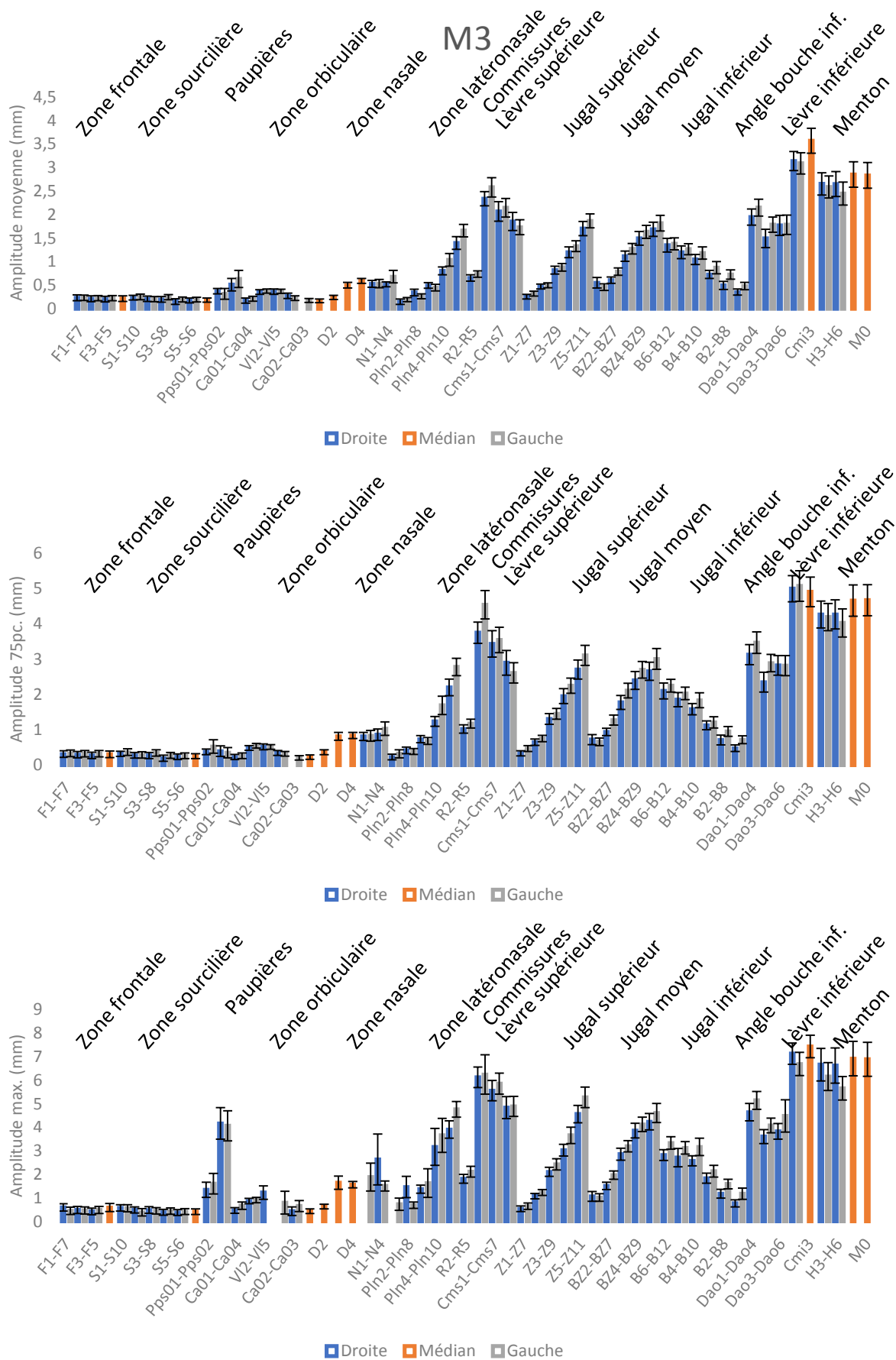


Figure 59 : Amplitude du mouvement (moyenne, 75 percentile et maximale) lors de la protrusion labiale sur le son « O » (M3).

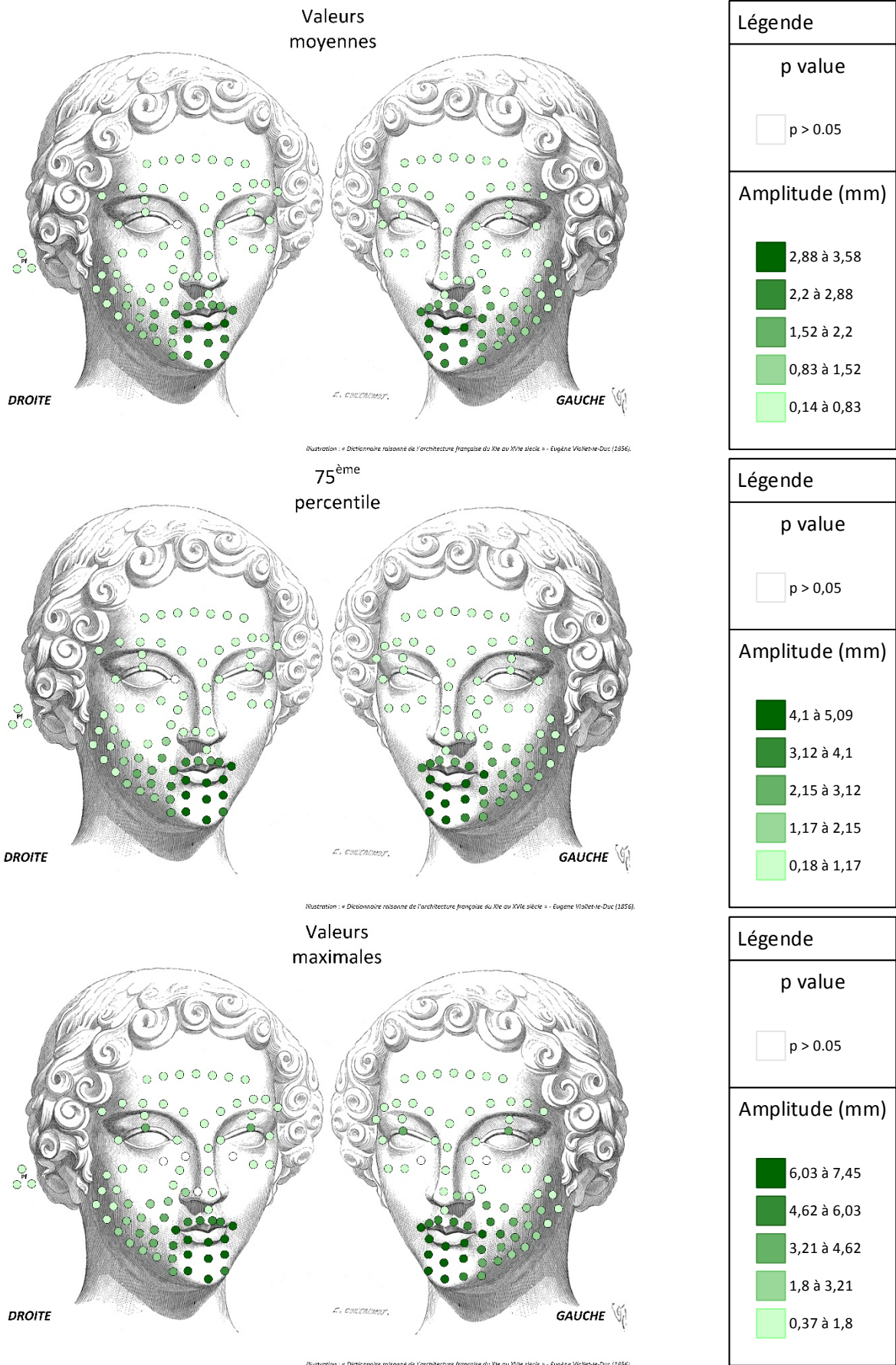


Figure 60 : Amplitude de déplacement lors de M3 pour les valeurs moyennes, au 75^{ème} percentile et pour les valeurs maximales.

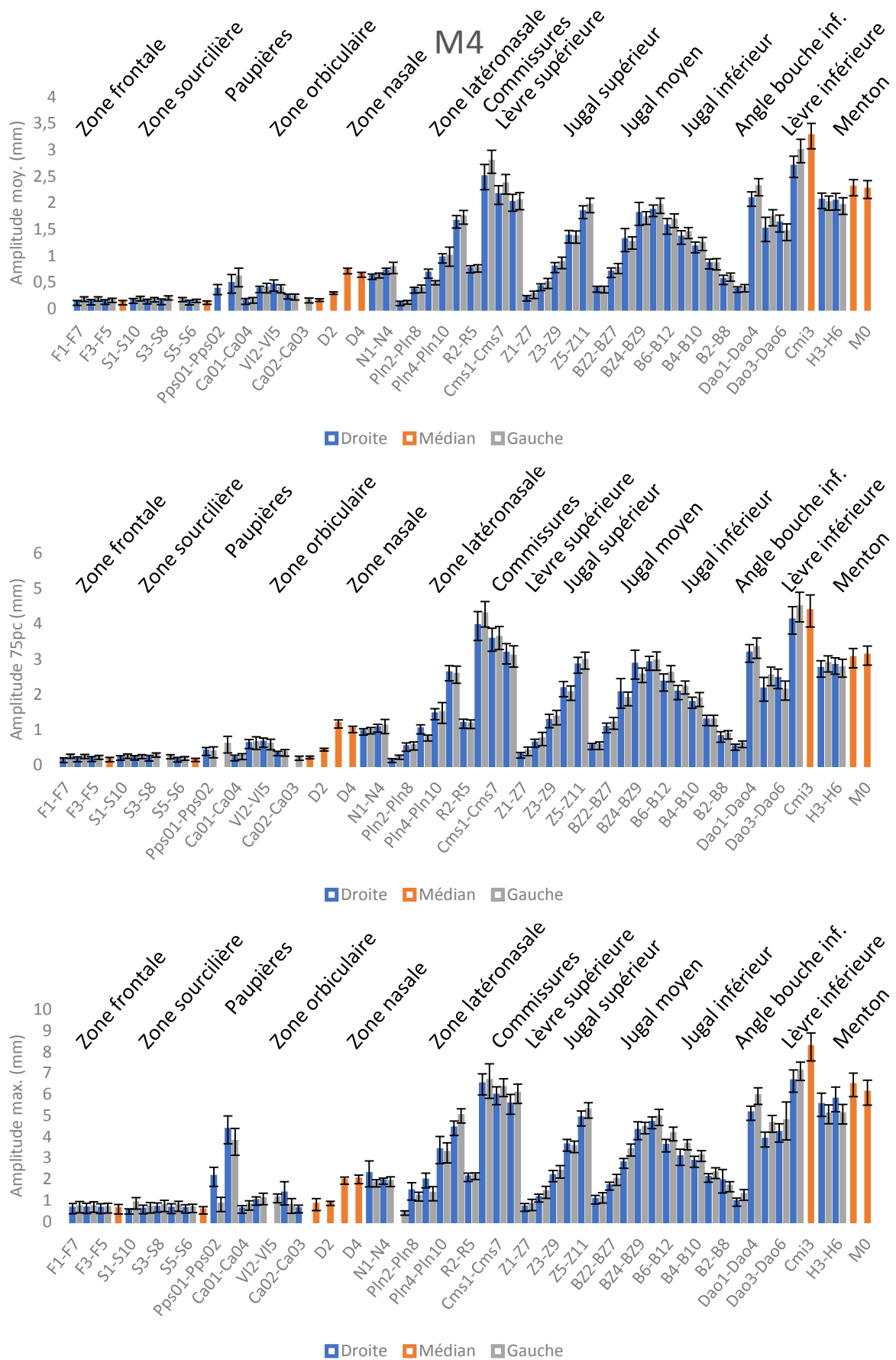
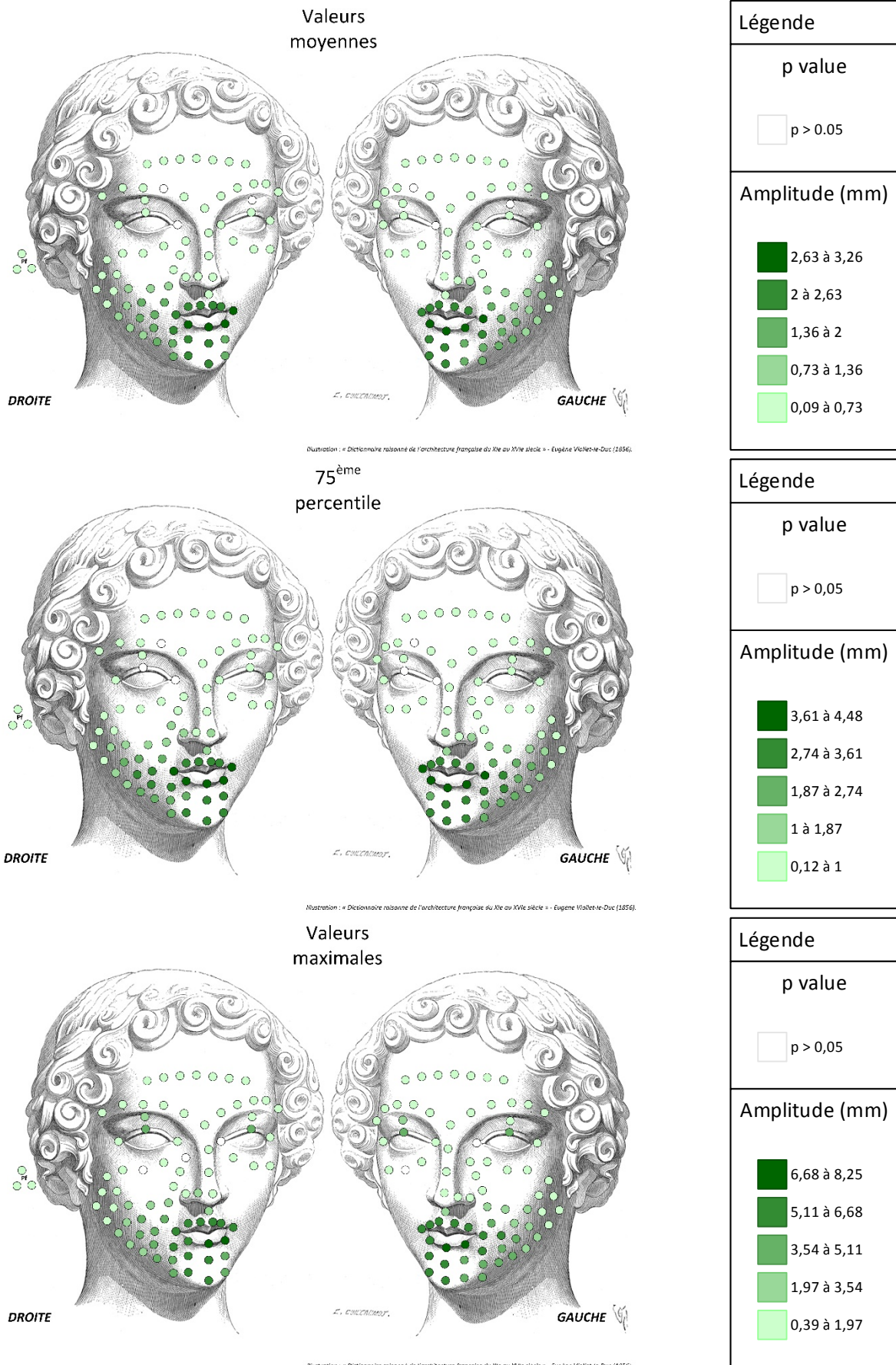


Figure 61 : Amplitude du mouvement (moyenne, 75 percentile et maximale) lors de la protrusion labiale sur le son « pou » (M4).



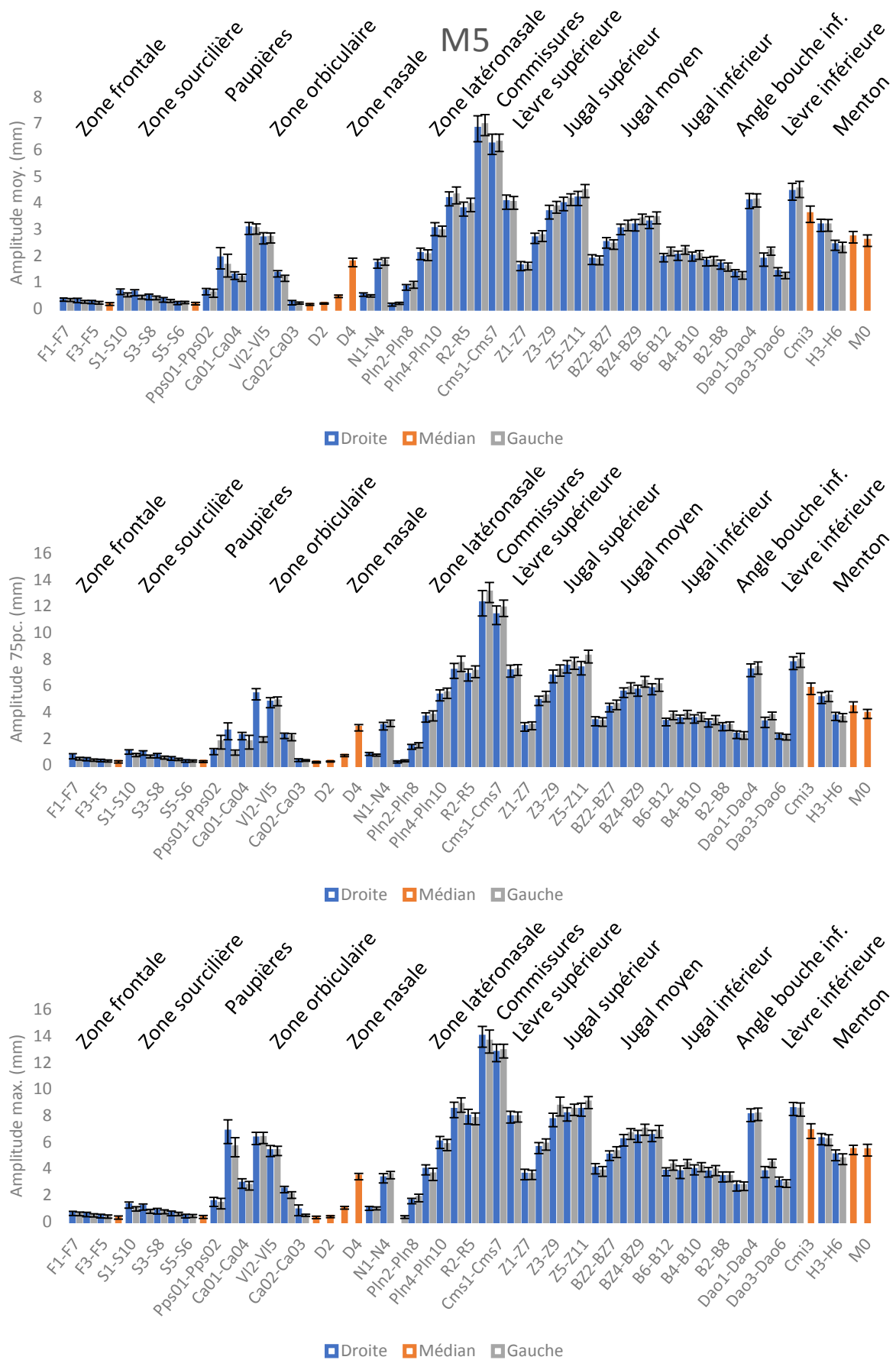


Figure 63 : Amplitude du mouvement (moyenne, 75 percentile et maximale) lors du sourire volontaire découvrant les dents (M5).

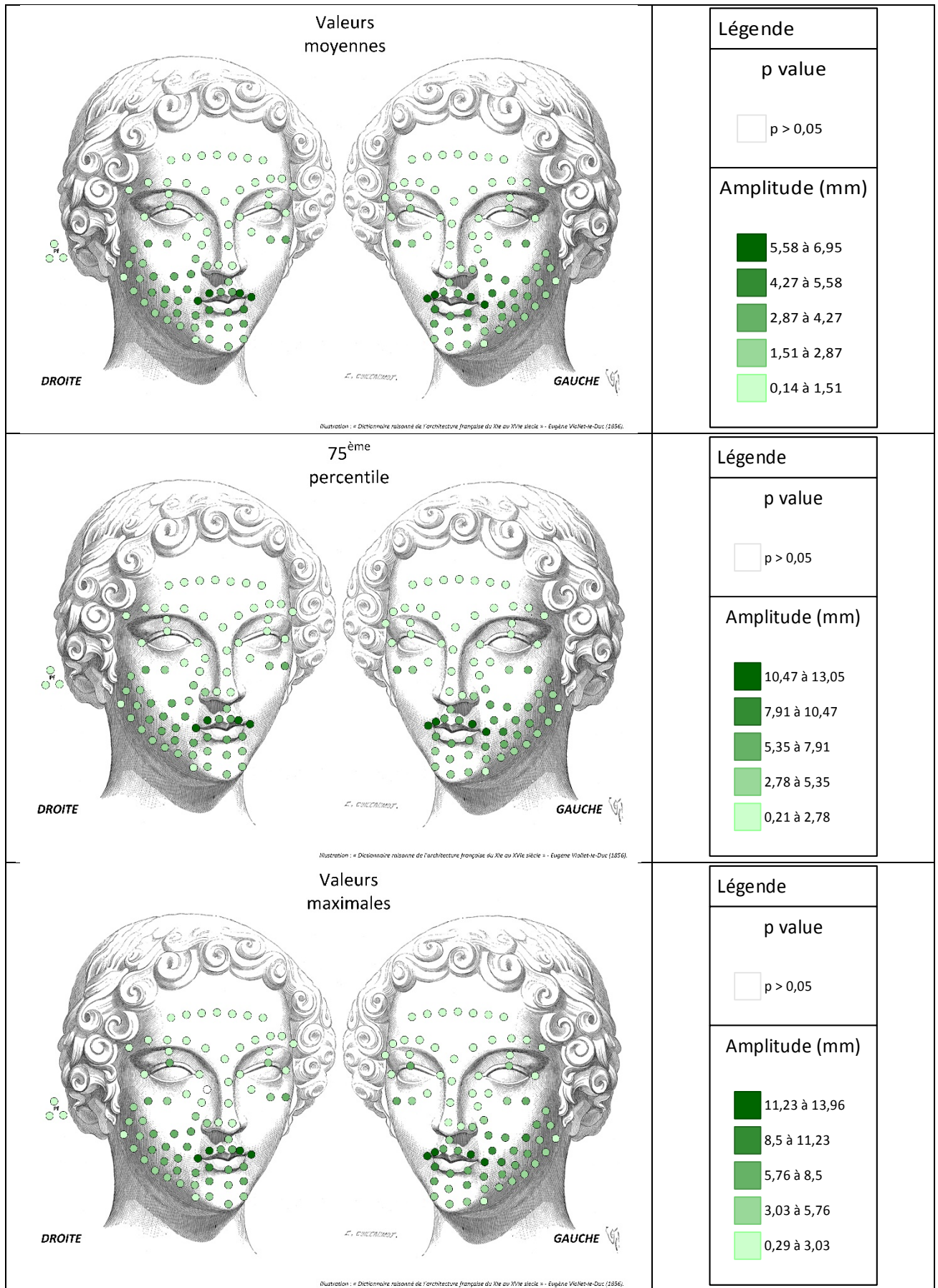


Figure 64 : Amplitude de déplacement lors de M5 pour les valeurs moyennes, au 75^{ème} percentile et pour les valeurs maximales.

3.5. Caractérisation des mouvements

3.5.1. Analyse en composante principale (ACP).

L'analyse en composante principale permet de résumer l'ensemble des données. Elle nous a permis notamment de faire ressortir des liens entre les données (marqueurs et mouvements). Elle a permis également de faciliter l'interprétation des données et de déterminer les tendances dominantes des différentes variables.

Les tableaux Tableau XXXVII à Tableau XXXIX présentent les cosinus carrés des variables « mouvements » lors de l'analyse en composante principale (ACP). Plus le cosinus carré est élevé, plus la variable est corrélée à un axe (F1 à F5). Nous pouvons donc observer que les mouvements seront les mieux interprétés sur les axes F1/F2.

Tableau XXXVII : Cosinus carrés des variables pour les valeurs moyennes.

| | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 |
|----|--------------|--------------|-------|-------|-------|
| M1 | 0,136 | 0,722 | 0,119 | 0,024 | 0,000 |
| M2 | 0,471 | 0,352 | 0,117 | 0,060 | 0,000 |
| M3 | 0,875 | 0,051 | 0,020 | 0,049 | 0,006 |
| M4 | 0,921 | 0,051 | 0,006 | 0,013 | 0,009 |
| M5 | 0,657 | 0,129 | 0,152 | 0,062 | 0,000 |

Tableau XXXVIII : Cosinus carrés des variables pour les valeurs maximales.

| | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 |
|----|--------------|--------------|-------|-------|-------|
| M1 | 0,005 | 0,827 | 0,147 | 0,022 | 0,000 |
| M2 | 0,296 | 0,508 | 0,153 | 0,043 | 0,000 |
| M3 | 0,927 | 0,020 | 0,009 | 0,035 | 0,009 |
| M4 | 0,945 | 0,017 | 0,004 | 0,024 | 0,010 |
| M5 | 0,712 | 0,051 | 0,165 | 0,073 | 0,000 |

Tableau XXXIX : Cosinus carrés des variables pour les valeurs au 75^{ème} percentile.

| | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 |
|----|--------------|--------------|-------|-------|-------|
| M1 | 0,141 | 0,697 | 0,148 | 0,014 | 0,000 |
| M2 | 0,494 | 0,281 | 0,172 | 0,054 | 0,000 |
| M3 | 0,872 | 0,040 | 0,014 | 0,066 | 0,009 |
| M4 | 0,924 | 0,047 | 0,003 | 0,012 | 0,015 |
| M5 | 0,648 | 0,130 | 0,143 | 0,078 | 0,001 |

Le Tableau XL et la Figure 65 présentent les corrélations entre variables et facteurs. Ne sont figurés que les facteurs F1 et F2, les autres facteurs n'ayant pas été retenus pour l'analyse. Ce tableau et cette figure décrivent une corrélation négative de M1 et M2 avec le facteur F1. Et une corrélation positive entre tous les autres mouvements et facteurs.

Tableau XL : Corrélations entre les variables « mouvement » et les facteurs :

| <i>Mouvement</i> | Amplitudes moyennes | | Amplitudes 75pc. | | Amplitudes maximales | |
|------------------|---------------------|-------|------------------|-------|----------------------|-------|
| | F1 | F2 | F1 | F2 | F1 | F2 |
| M1 | -0,368 | 0,850 | -0,376 | 0,835 | -0,071 | 0,909 |
| M2 | -0,687 | 0,593 | -0,703 | 0,530 | -0,544 | 0,713 |
| M3 | 0,935 | 0,226 | 0,934 | 0,201 | 0,963 | 0,142 |
| M4 | 0,960 | 0,227 | 0,961 | 0,217 | 0,972 | 0,129 |
| M5 | 0,811 | 0,359 | 0,805 | 0,361 | 0,844 | 0,225 |

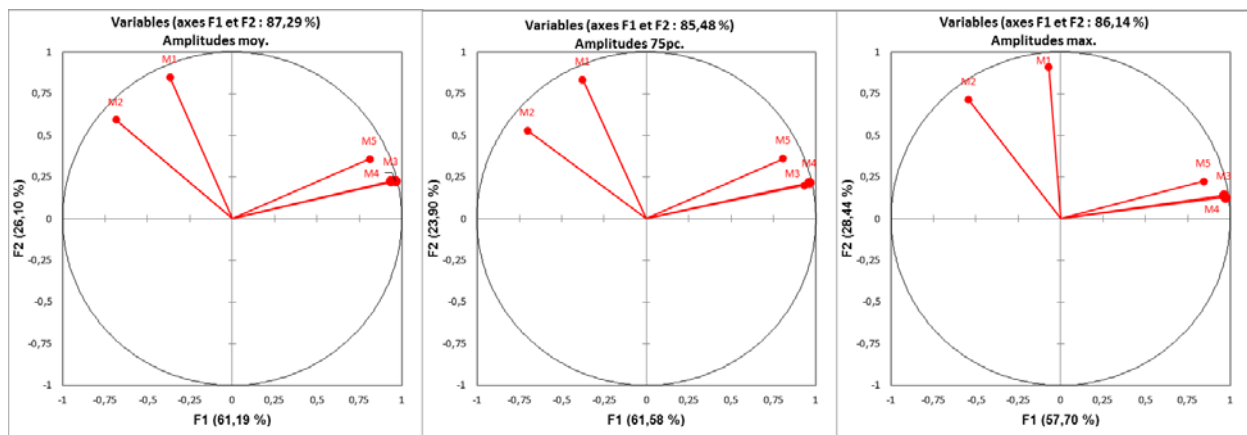


Figure 65 : Graphique des variables.

Les figures Figure 66 à Figure 68 superposent le cercle de corrélation des mouvements (factor map, en rouge) aux axes et les observations pour chacun des marqueurs (biplot, en bleu). Nous constatons que les mouvements touchant la partie inférieure de la face (M3-M4-M5) sont liés à l'axe F1. Une forte corrélation entre M3 et M4 est observable.

La représentation des marqueurs (bleu) sur la carte en deux dimensions permet d'identifier des tendances. Ainsi certains groupes de marqueurs partagent des caractéristiques. Ces groupes vont être objectivés par l'analyse en cluster.

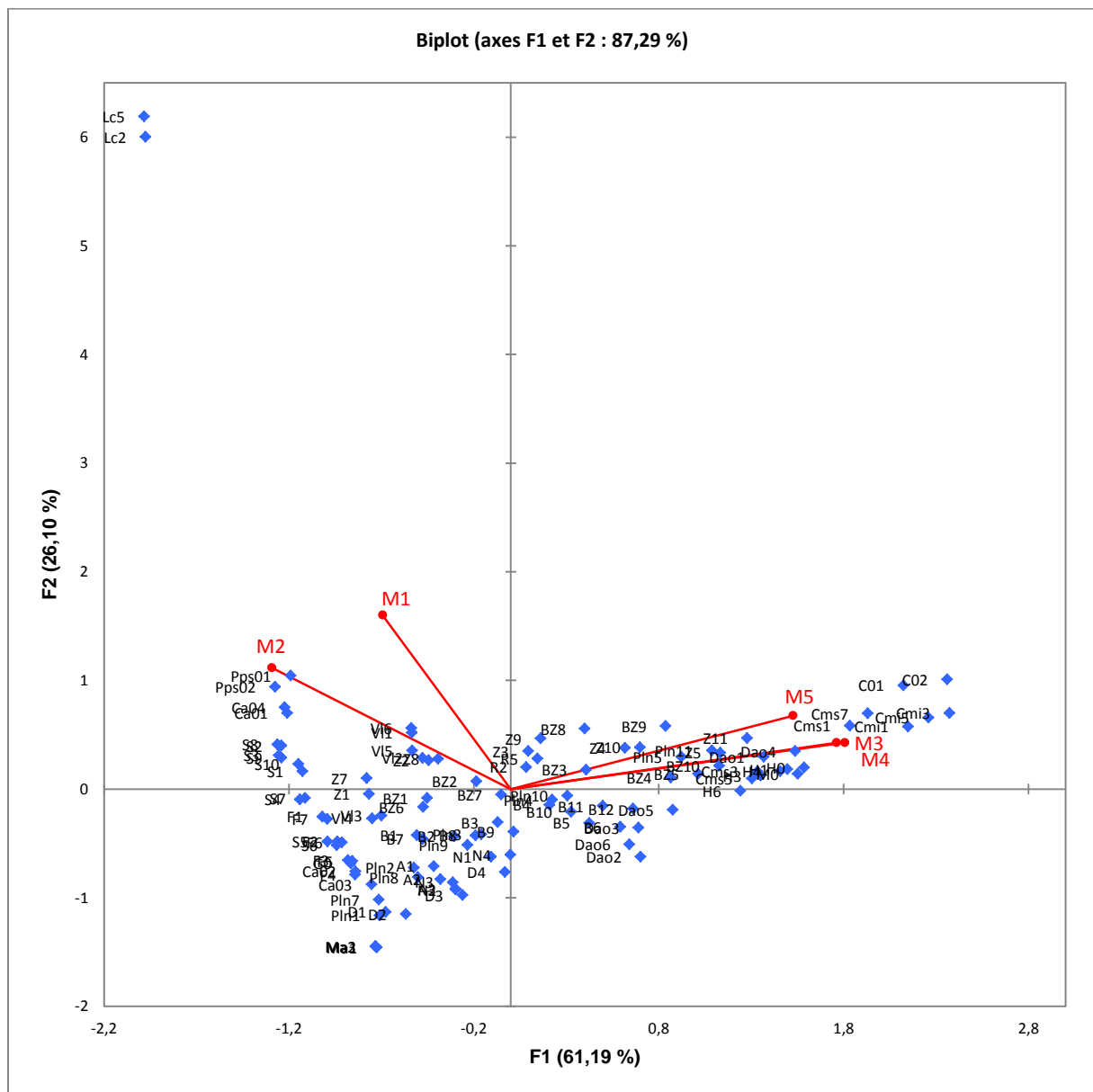


Figure 66 : Biplot et factor map pour les valeurs moyennes.

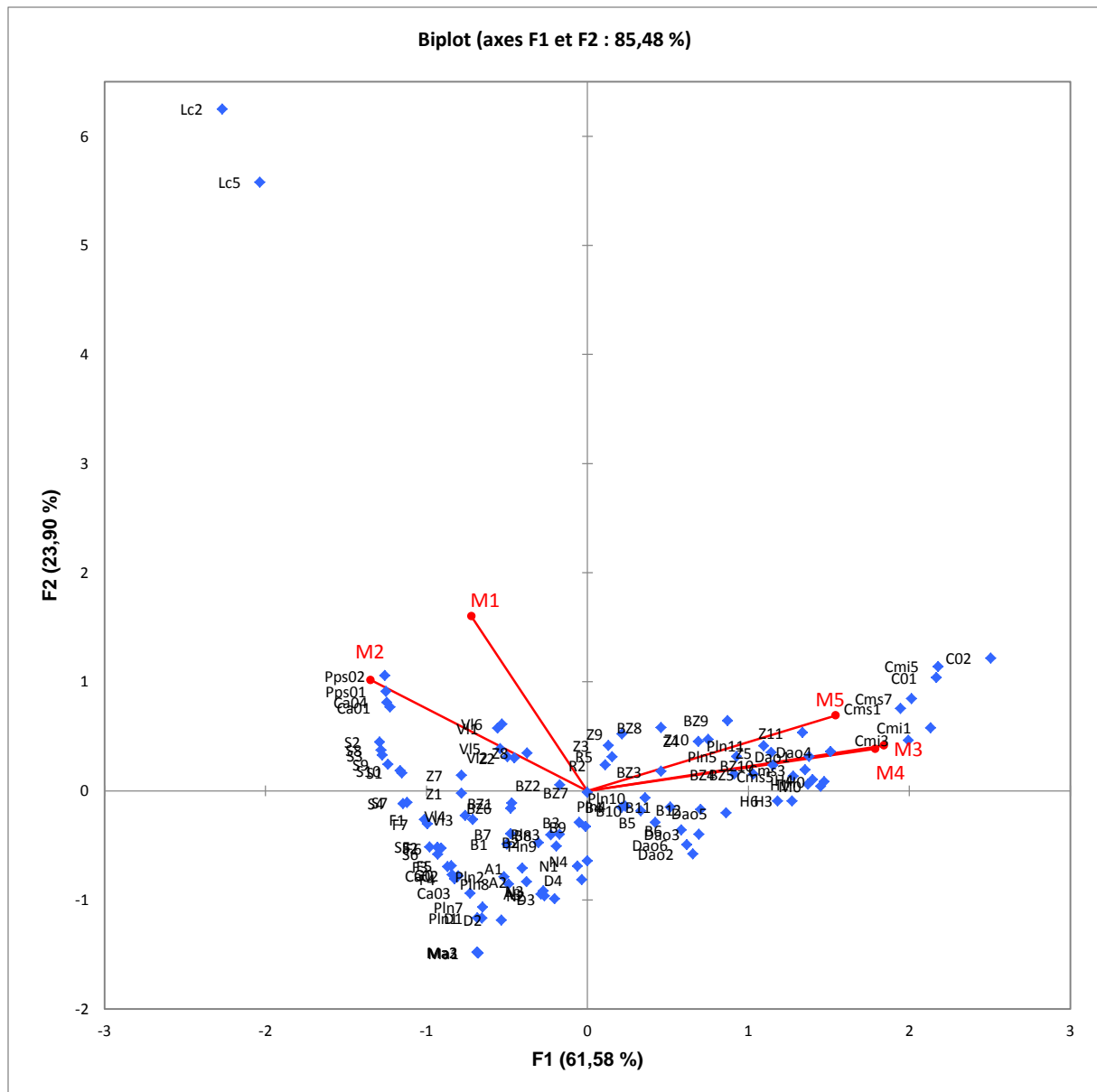


Figure 68 : Biplot et factor map pour les valeurs au 75^{ème} percentile.

3.5.2. Analyse en clusters

L'analyse en clusters ou le partitionnement des données est une méthode permettant de diviser les données en différents groupes. L'objectif ici est d'identifier des groupes de marqueurs caractéristiques des axes F1 et F2 et des mouvements M1 à M5.

Dans ce but, nous avons utilisé la classification k-means (ou nuée dynamique) avec cinq classes pour identifier les 5 groupes de marqueurs correspondant à nos mouvements.

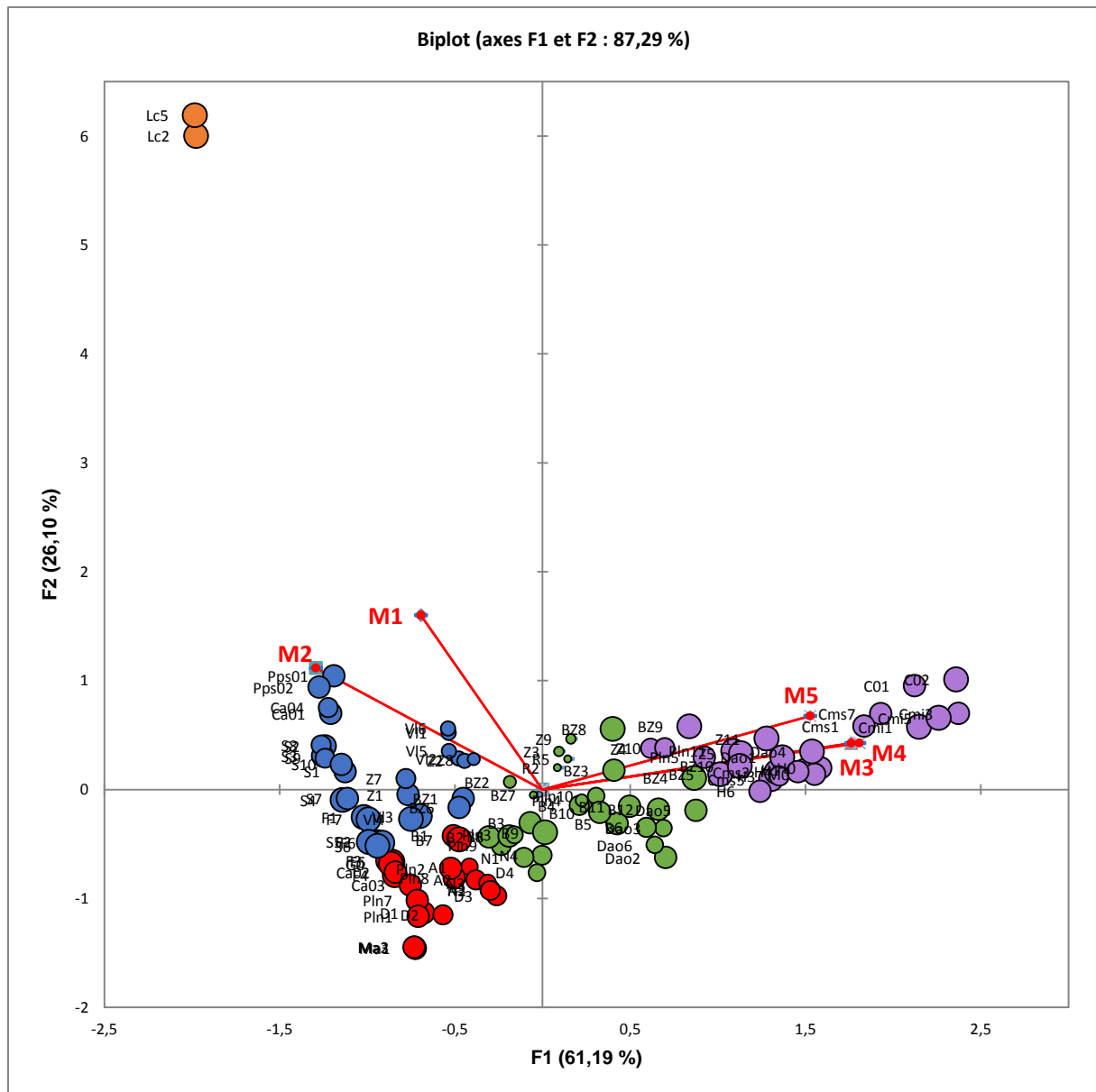


Figure 69 : K-means pour les valeurs moyennes. Chacun des groupes de marqueurs est représenté par une couleur. La taille du point est pondérée en fonction de sa proximité avec les axes F1 et F2.

Les figures 69 à 71 représentent à partir de l'analyse en composante principale les groupes de marqueurs identifiés par k-means. Les cinq groupes de marqueurs identifiés ont ensuite été figurés sur la figure 72 afin de faciliter l'interprétation. Le détail des classes est en Annexe X.

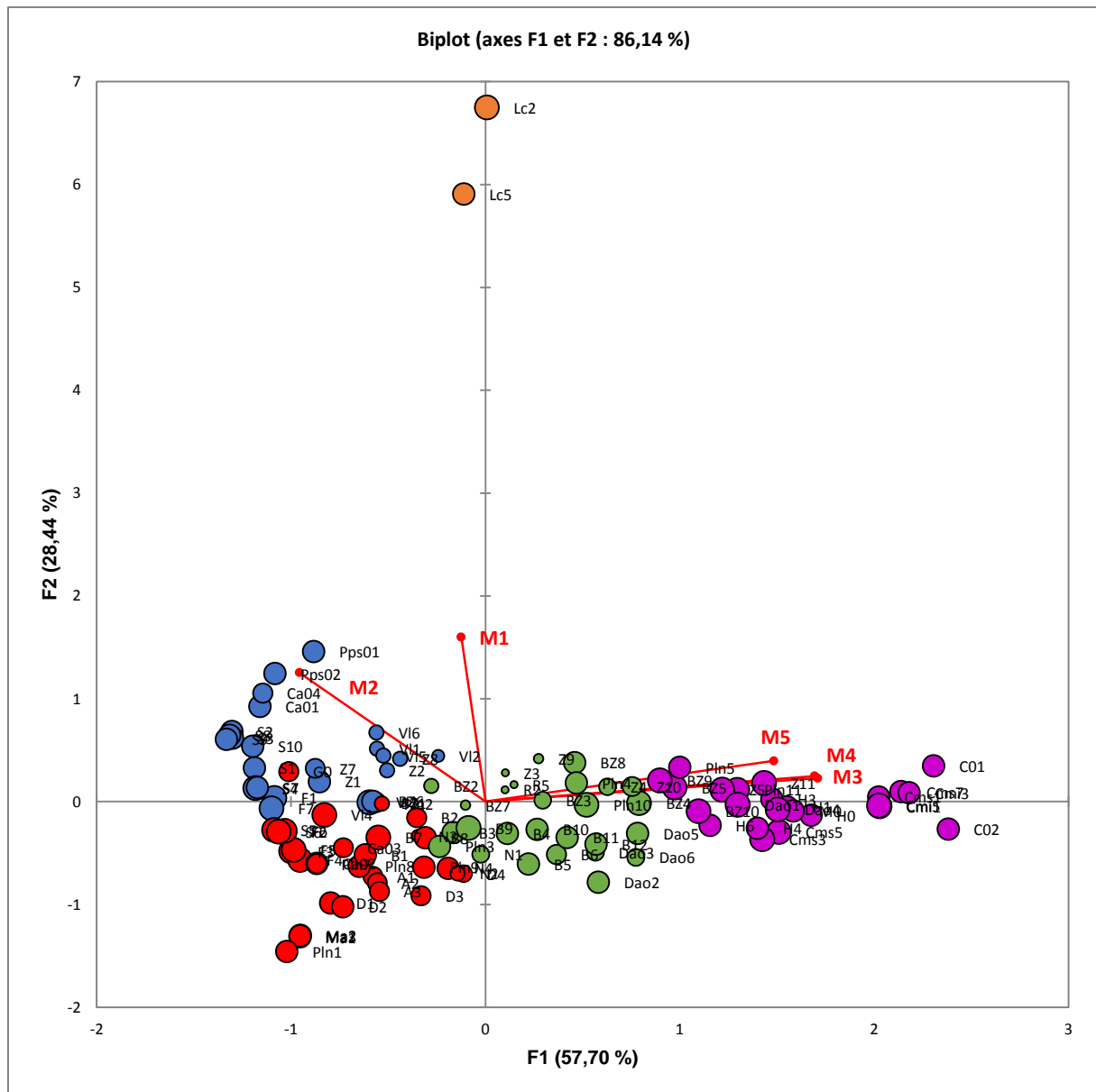


Figure 70 : K-means pour les valeurs maximales

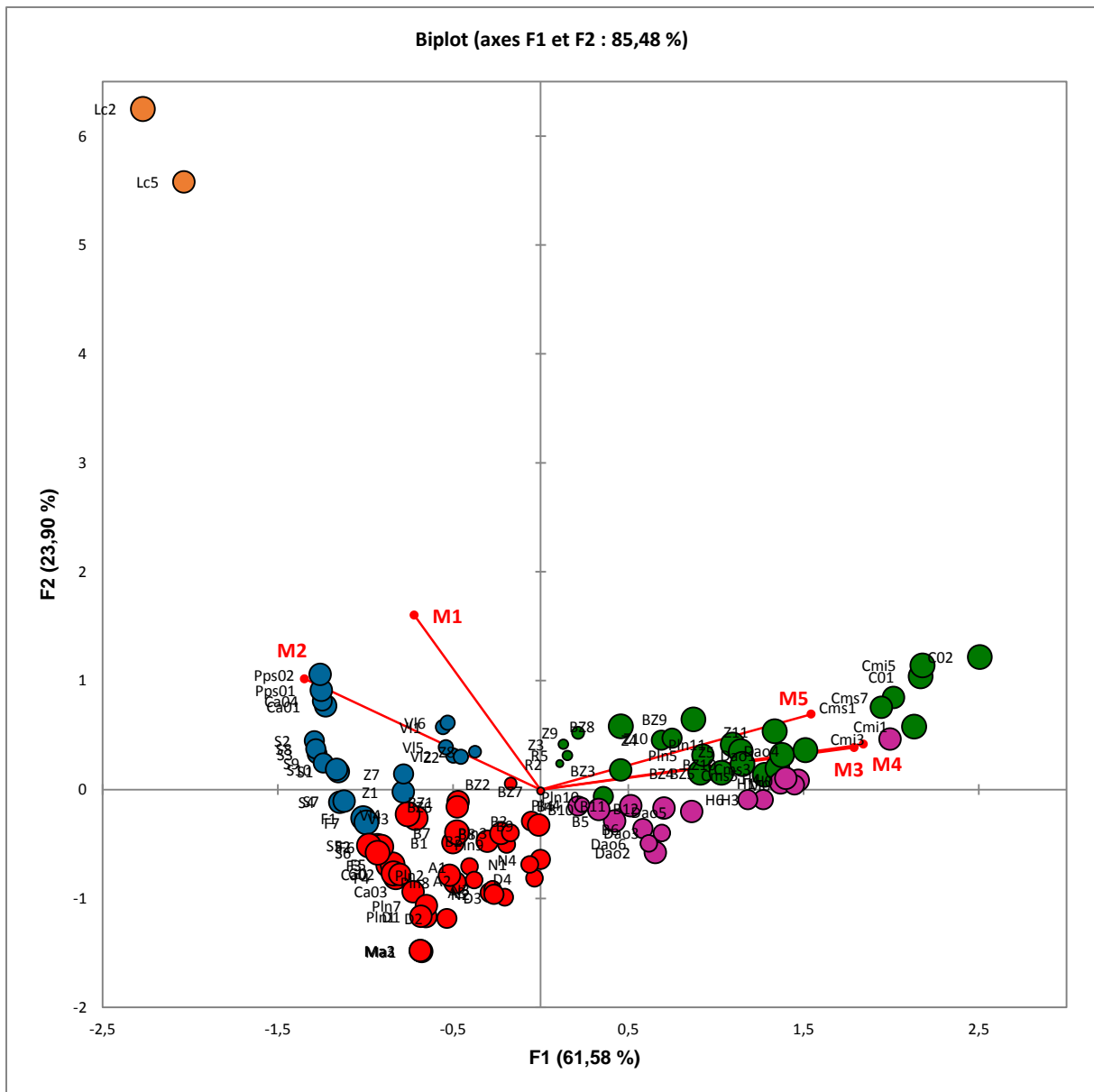


Figure 71 : K-means pour les valeurs au 75^{ème} percentile.

Valeurs moyennes

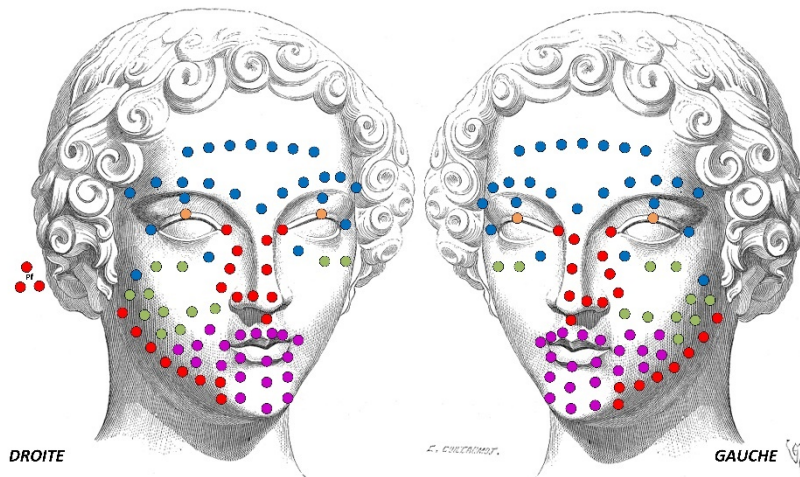


Illustration : « Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XIXe siècle » - Eugène Viollet-le-Duc (1856).

Valeurs 75pc.

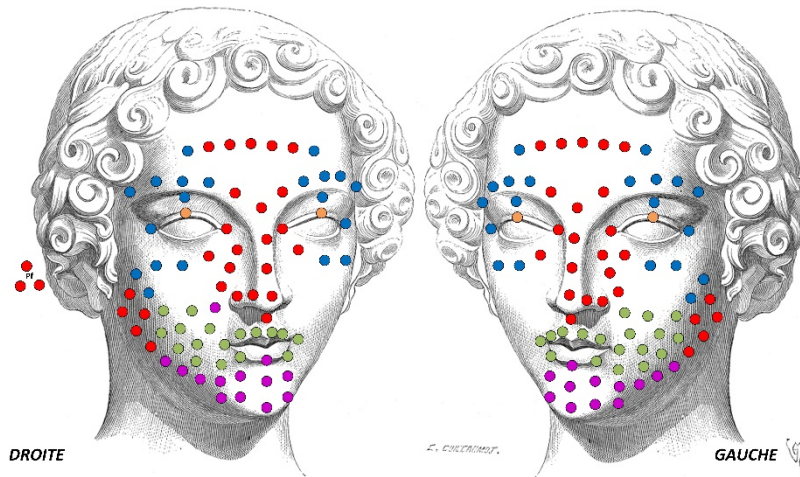


Illustration : « Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XIXe siècle » - Eugène Viollet-le-Duc (1856).



Valeurs maximales

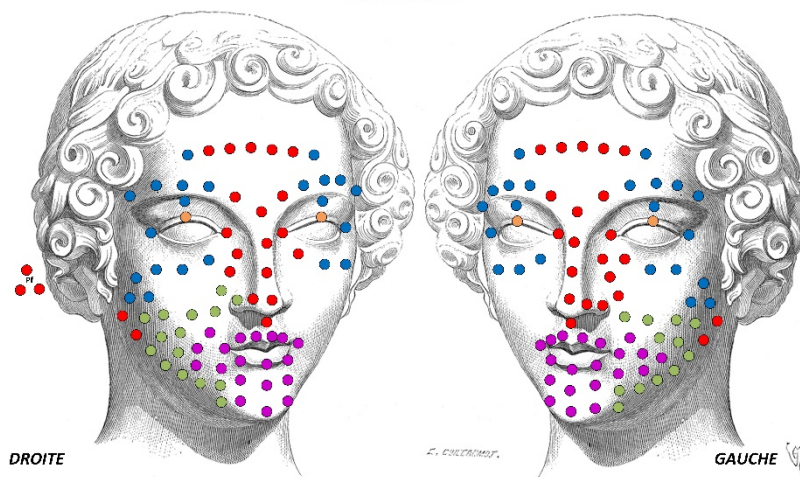


Illustration : « Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XIXe siècle » - Eugène Viollet-le-Duc (1856).

Figure 72 : Classes de déplacement déterminées par l'analyse en cluster de valeurs d'amplitude moyenne, au 75^{ème} percentile et maximale.

3.6. Évaluation de la méthode diagnostique

L'évaluation de la méthode diagnostique se base sur des calculs de sensibilité et de spécificité. Ces calculs, ainsi que la méthode ROC nous ont permis de décrire ici les différents indices décrivant la qualité d'un test : sensibilité, spécificité, valeur prédictive, exactitude, rapport de vraisemblance et aire sous la courbe.

Pour ces calculs, ce sont les valeurs maximales de déplacement qui ont été considérées.

3.6.1. Sensibilité et Spécificité des marqueurs pour M1

L'analyse en cluster a défini deux marqueurs caractéristiques du mouvement M1 : Lc2 et Lc5. Le Tableau XLI présente les valeurs seuils retenues.

Tableau XLI : Valeurs seuils retenues après analyse ROC pour M1.

| Marqueur | Observations | Amplitude seuil (mm) | Sensibilité | Spécificité | VPP | VPN | Exactitude |
|----------|--------------|----------------------|-------------|-------------|-----|-----|------------|
| Lc2 | 135 | 9,5 | 86% | 77% | 41% | 97% | 79% |
| Lc5 | 125 | 9,5 | 86% | 77% | 41% | 97% | 79% |

La courbe ROC (Figure 73) permet de calculer une aire sous courbe (AUC), un modèle idéal aurait une AUC=1.

Pour le mouvement 1, les AUC de Lc2 et Lc5 sont de 0,8.

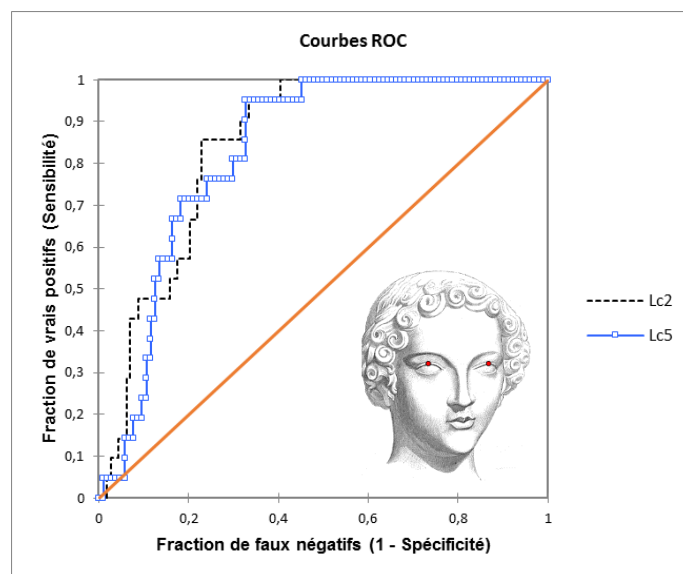


Figure 73 : Courbe ROC pour les marqueurs Lc2 et Lc5 pour la réalisation de M1.

3.6.2. Sensibilité et Spécificité des marqueurs pour M2

L'analyse en cluster a défini les marqueurs caractéristiques du mouvement M2 (Figure 72). Le Tableau XLII et la Figure 74 présentent les valeurs seuils retenues.

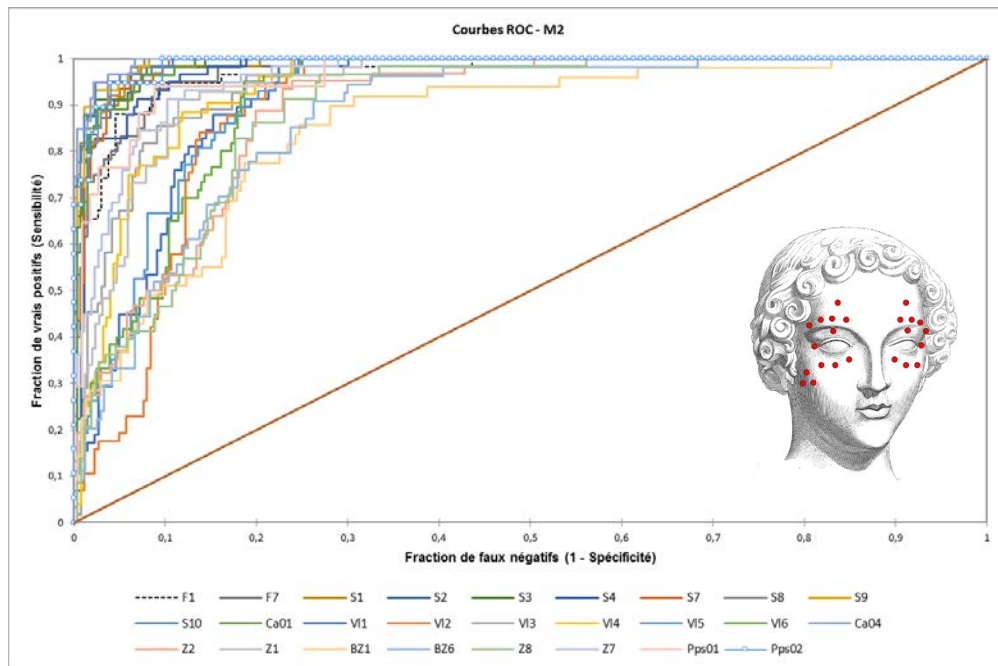


Figure 74 : Courbe ROC pour les marqueurs lors de la réalisation de M2.

Tableau XLII : Valeurs seuils retenues après analyse ROC pour M2.

| Marqueur | Observations | Amplitude seuil (mm) | Sensibilité | Spécificité | VPP | VPN | Exactitude | AUC |
|----------|--------------|----------------------|-------------|-------------|-----|------|------------|------|
| F1 | 324 | 2,7 | 95% | 91% | 69% | 99% | 91% | 0,97 |
| F7 | 332 | 2,4 | 95% | 90% | 67% | 99% | 91% | 0,97 |
| S1 | 330 | 3,6 | 98% | 93% | 76% | 100% | 94% | 0,99 |
| S2 | 328 | 3,8 | 98% | 94% | 76% | 100% | 95% | 0,99 |
| S3 | 320 | 3,5 | 98% | 92% | 72% | 100% | 93% | 0,99 |
| S4 | 317 | 2,7 | 97% | 88% | 65% | 99% | 90% | 0,98 |
| S7 | 340 | 2,3 | 100% | 90% | 68% | 100% | 91% | 0,98 |
| S8 | 332 | 3,2 | 100% | 92% | 74% | 100% | 94% | 0,99 |
| S9 | 325 | 2,9 | 100% | 92% | 73% | 100% | 93% | 0,99 |
| S10 | 317 | 4,8 | 95% | 98% | 90% | 99% | 97% | 0,99 |
| Ca01 | 327 | 5,6 | 96% | 93% | 73% | 99% | 93% | 0,98 |
| V11 | 321 | 3,9 | 98% | 78% | 49% | 100% | 81% | 0,92 |
| V12 | 319 | 4,2 | 95% | 79% | 50% | 99% | 82% | 0,90 |
| V13 | 320 | 2,7 | 96% | 81% | 51% | 99% | 84% | 0,95 |
| V14 | 304 | 3,6 | 88% | 88% | 61% | 97% | 88% | 0,94 |
| V15 | 329 | 3,3 | 100% | 75% | 46% | 100% | 79% | 0,92 |
| V16 | 339 | 4,9 | 95% | 81% | 52% | 99% | 84% | 0,91 |
| Ca04 | 330 | 5,0 | 100% | 93% | 77% | 100% | 95% | 0,99 |
| Z2 | 338 | 3,7 | 95% | 76% | 47% | 99% | 80% | 0,89 |
| Z1 | 310 | 4,8 | 91% | 89% | 64% | 98% | 89% | 0,94 |
| BZ1 | 284 | 3,1 | 90% | 72% | 40% | 97% | 75% | 0,85 |
| BZ6 | 294 | 2,9 | 91% | 74% | 44% | 97% | 77% | 0,87 |
| Z8 | 318 | 3,2 | 97% | 73% | 44% | 99% | 77% | 0,89 |
| Z7 | 321 | 4,9 | 91% | 90% | 66% | 98% | 90% | 0,96 |
| Pps01 | 130 | 5,4 | 94% | 91% | 62% | 99% | 92% | 0,97 |
| Pps02 | 143 | 6,7 | 95% | 96% | 78% | 99% | 96% | 0,99 |

3.6.3. Sensibilité et Spécificité des marqueurs pour M3

L'analyse en cluster a identifié une même zone d'action pour les mouvements M3 et M4. Les calculs ont donc été réalisés pour le même groupe de marqueurs. Le Tableau XLIII et la Figure 75 présentent les valeurs seuils retenues.

Tableau XLIII : Valeurs seuils retenues après analyse ROC pour M3.

| <i>Marqueur</i> | <i>Observations</i> | <i>Amplitude seuil (mm)</i> | <i>Sensibilité</i> | <i>Spécificité</i> | <i>VPP</i> | <i>VPN</i> | <i>Exactitude</i> | <i>AUC</i> |
|-----------------|---------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------|------------|------------|-------------------|------------|
| <i>Pln11</i> | 284 | 4,1 | 88% | 58% | 31% | 96% | 63% | 0,68 |
| <i>C02</i> | 320 | 3,7 | 95% | 53% | 31% | 98% | 61% | 0,68 |
| <i>Cms7</i> | 327 | 3,4 | 93% | 55% | 30% | 97% | 61% | 0,67 |
| <i>Cms5</i> | 315 | 3,3 | 87% | 60% | 31% | 96% | 64% | 0,71 |
| <i>Cms3</i> | 316 | 2,1 | 93% | 53% | 30% | 97% | 60% | 0,71 |
| <i>Cms1</i> | 317 | 3,8 | 89% | 58% | 31% | 96% | 64% | 0,67 |
| <i>C01</i> | 289 | 3,6 | 96% | 56% | 33% | 98% | 63% | 0,69 |
| <i>Z5</i> | 337 | 3,0 | 90% | 49% | 28% | 96% | 57% | 0,66 |
| <i>BZ5</i> | 330 | 2,2 | 97% | 42% | 28% | 98% | 52% | 0,69 |
| <i>Dao1</i> | 339 | 2,7 | 97% | 46% | 28% | 98% | 55% | 0,68 |
| <i>Cmi1</i> | 274 | 4,5 | 98% | 60% | 32% | 99% | 66% | 0,77 |
| <i>Cmi3</i> | 222 | 5,5 | 92% | 68% | 28% | 99% | 71% | 0,84 |
| <i>Cmi5</i> | 279 | 4,4 | 93% | 58% | 29% | 98% | 64% | 0,76 |
| <i>H3</i> | 325 | 4,5 | 88% | 66% | 36% | 96% | 70% | 0,81 |
| <i>H1</i> | 332 | 4,7 | 92% | 63% | 35% | 97% | 68% | 0,80 |
| <i>H0</i> | 324 | 5,4 | 88% | 68% | 38% | 96% | 72% | 0,82 |
| <i>M0</i> | 329 | 5,9 | 82% | 74% | 41% | 95% | 75% | 0,82 |
| <i>H6</i> | 327 | 3,8 | 95% | 63% | 36% | 98% | 69% | 0,81 |
| <i>H4</i> | 335 | 4,5 | 92% | 64% | 37% | 97% | 69% | 0,79 |
| <i>Dao4</i> | 316 | 2,7 | 100% | 47% | 30% | 100% | 57% | 0,69 |
| <i>BZ9</i> | 311 | 2,1 | 98% | 39% | 26% | 99% | 50% | 0,66 |
| <i>BZ10</i> | 318 | 2,9 | 93% | 50% | 30% | 97% | 58% | 0,69 |
| <i>Z11</i> | 332 | 2,9 | 97% | 47% | 30% | 98% | 57% | 0,68 |
| <i>Pln5</i> | 310 | 2,7 | 91% | 48% | 29% | 96% | 56% | 0,65 |

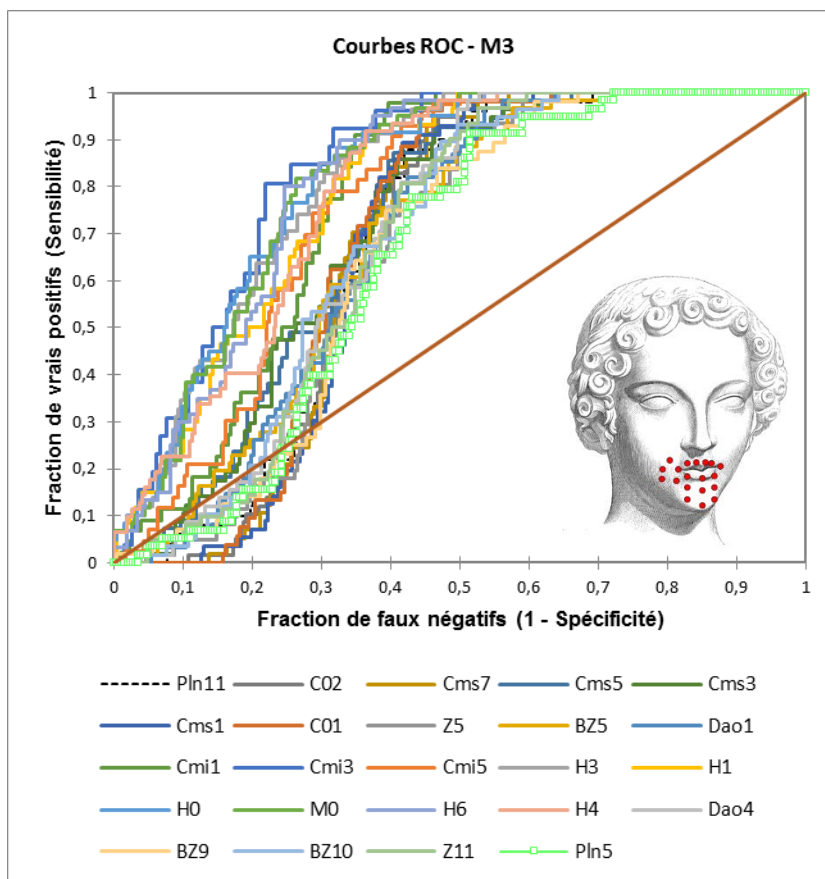


Figure 75 : Courbe ROC pour les marqueurs lors de la réalisation de M3.

3.6.4. Sensibilité et Spécificité des marqueurs pour M4

L'analyse en cluster a identifié une même zone d'action pour les mouvements M3 et M4. Les calculs ont donc été réalisés pour le même groupe de marqueurs. Le Tableau XLIV et la Figure 76 présentent les valeurs seuils.

Tableau XLIV : Valeurs seuils retenues après analyse ROC pour M4.

| Marqueur | Observations | Amplitude seuil (mm) | Sensibilité | Spécificité | VPP | VPN | Exactitude | AUC |
|----------|--------------|----------------------|-------------|-------------|-----|------|------------|------|
| Pln11 | 284 | 3,6 | 90% | 53% | 30% | 96% | 60% | 0,69 |
| C02 | 320 | 3,6 | 98% | 53% | 32% | 99% | 61% | 0,68 |
| Cms7 | 327 | 2,3 | 98% | 50% | 30% | 99% | 59% | 0,68 |
| Cms5 | 315 | 2,2 | 98% | 53% | 30% | 99% | 61% | 0,74 |
| Cms3 | 316 | 3,0 | 95% | 58% | 32% | 98% | 65% | 0,75 |
| Cms1 | 317 | 3,1 | 97% | 53% | 31% | 99% | 61% | 0,69 |
| C01 | 289 | 2,7 | 98% | 51% | 31% | 99% | 60% | 0,69 |
| Z5 | 337 | 2,6 | 97% | 47% | 29% | 98% | 56% | 0,67 |
| BZ5 | 330 | 2,8 | 98% | 49% | 30% | 99% | 58% | 0,72 |
| Dao1 | 339 | 3,9 | 92% | 56% | 32% | 97% | 63% | 0,71 |
| Cmi1 | 274 | 3,2 | 100% | 55% | 29% | 100% | 62% | 0,75 |
| Cmi3 | 222 | 5,6 | 93% | 70% | 33% | 99% | 73% | 0,85 |
| Cmi5 | 279 | 5,1 | 95% | 63% | 32% | 99% | 68% | 0,76 |
| H3 | 325 | 4,1 | 88% | 62% | 34% | 96% | 67% | 0,78 |
| H1 | 332 | 2,5 | 98% | 50% | 29% | 99% | 58% | 0,74 |
| H0 | 324 | 4,0 | 95% | 59% | 33% | 98% | 65% | 0,77 |
| M0 | 329 | 3,8 | 92% | 59% | 33% | 97% | 65% | 0,78 |

| | | | | | | | | |
|------|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|------|
| H6 | 327 | 3,3 | 95% | 56% | 32% | 98% | 63% | 0,77 |
| H4 | 335 | 2,7 | 100% | 51% | 30% | 100% | 59% | 0,73 |
| Dao4 | 316 | 4,1 | 95% | 57% | 33% | 98% | 64% | 0,73 |
| BZ9 | 311 | 2,6 | 100% | 44% | 28% | 100% | 54% | 0,65 |
| BZ10 | 318 | 3,6 | 92% | 56% | 32% | 97% | 62% | 0,72 |
| Z11 | 332 | 3,6 | 92% | 52% | 31% | 97% | 60% | 0,69 |
| Pln5 | 310 | 3,0 | 90% | 51% | 30% | 96% | 58% | 0,66 |

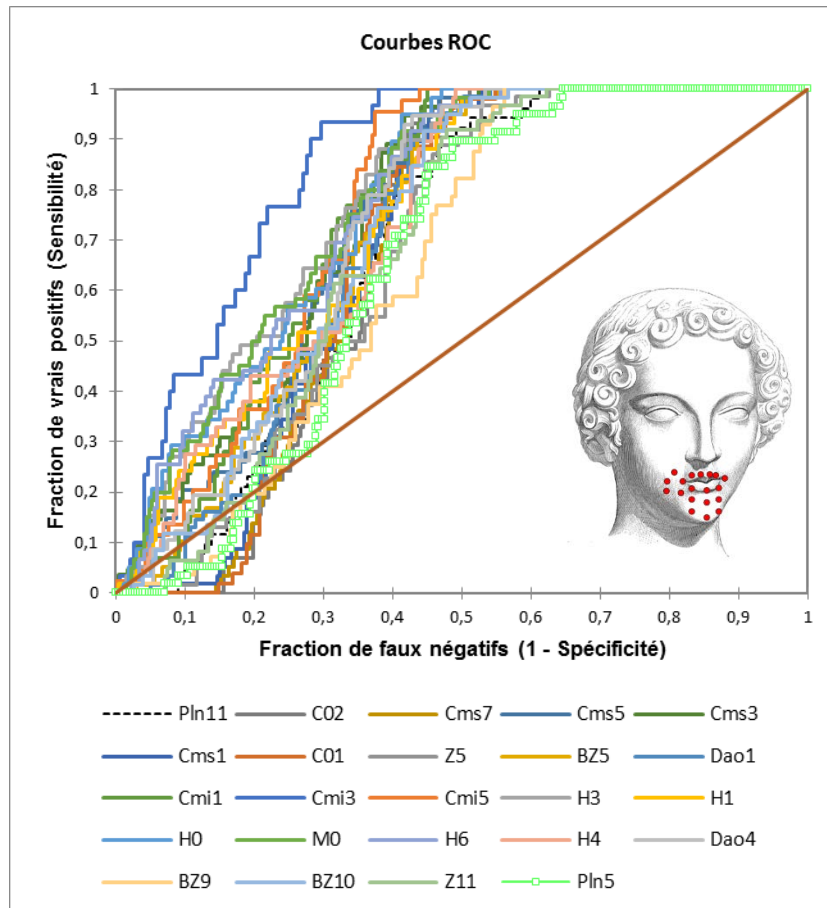


Figure 76 : Courbe ROC pour les marqueurs lors de la réalisation de M4.

3.6.5. Sensibilité et Spécificité des marqueurs pour M3 et M4

Compte tenu de la forte proximité entre les mesures lors des mouvements M3 et M4, nous avons testé la sensibilité et la spécificité des marqueurs pour l'ensemble des mouvements M3 et M4.

Tableau XLV : Valeurs seuils retenues après analyse ROC pour M3 et M4.

| Marqueur | Observations | Amplitude seuil (mm) | Sensibilité | Spécificité | VPP | VPN | Exactitude | AUC |
|----------|--------------|----------------------|-------------|-------------|-----|-----|------------|------|
| Pln11 | 284 | 3,0 | 95% | 60% | 57% | 96% | 73% | 0,73 |
| C02 | 320 | 3,6 | 97% | 67% | 62% | 97% | 78% | 0,73 |
| Cms7 | 327 | 3,4 | 92% | 67% | 61% | 94% | 76% | 0,73 |
| Cms5 | 315 | 2,5 | 94% | 67% | 60% | 96% | 76% | 0,79 |
| Cms3 | 316 | 2,3 | 94% | 67% | 61% | 95% | 77% | 0,80 |
| Cms1 | 317 | 3,1 | 95% | 66% | 61% | 96% | 76% | 0,73 |
| C01 | 289 | 2,7 | 98% | 65% | 62% | 98% | 77% | 0,74 |
| Z5 | 337 | 2,6 | 94% | 58% | 57% | 95% | 72% | 0,71 |

| | | | | | | | | |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| BZ5 | 330 | 3,2 | 92% | 63% | 59% | 93% | 74% | 0,76 |
| Dao1 | 339 | 2,7 | 98% | 59% | 58% | 98% | 73% | 0,75 |
| Cmi1 | 274 | 3,2 | 99% | 67% | 59% | 99% | 77% | 0,82 |
| Cmi3 | 222 | 5,5 | 93% | 80% | 60% | 97% | 83% | 0,90 |
| Cmi5 | 279 | 3,9 | 95% | 70% | 59% | 97% | 78% | 0,82 |
| H3 | 325 | 4,0 | 90% | 76% | 68% | 93% | 81% | 0,88 |
| H1 | 332 | 2,4 | 99% | 64% | 60% | 99% | 76% | 0,84 |
| H0 | 324 | 4,0 | 93% | 73% | 67% | 95% | 81% | 0,88 |
| M0 | 329 | 3,8 | 93% | 74% | 67% | 95% | 81% | 0,88 |
| H6 | 327 | 3,3 | 97% | 71% | 66% | 97% | 80% | 0,87 |
| H4 | 335 | 2,7 | 99% | 65% | 61% | 99% | 77% | 0,83 |
| Dao4 | 316 | 3,2 | 97% | 64% | 60% | 97% | 76% | 0,77 |
| BZ9 | 311 | 2,6 | 96% | 54% | 54% | 96% | 69% | 0,70 |
| BZ10 | 318 | 2,9 | 94% | 64% | 60% | 95% | 75% | 0,76 |
| Z11 | 332 | 3,6 | 91% | 64% | 60% | 92% | 74% | 0,74 |
| Pln5 | 310 | 2,7 | 91% | 60% | 57% | 91% | 71% | 0,70 |

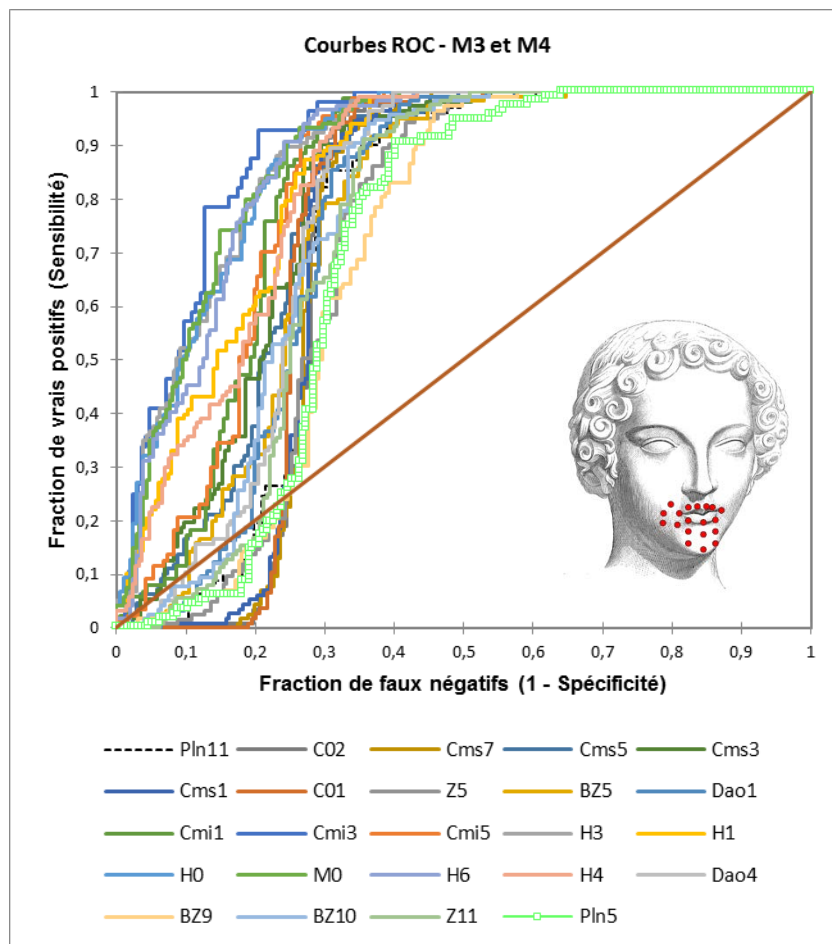


Figure 77 : Courbe ROC pour les marqueurs lors de la réalisation de M3 et M4.

3.6.6. Sensibilité et Spécificité des marqueurs pour M5

L'analyse en cluster a identifié deux zones d'action potentielles pour le mouvement M5. Les calculs ont donc été réalisés pour les marqueurs de ces deux clusters. Les tableaux Tableau XLVI XLVI et XLVII ainsi que la figure 78 présentent les valeurs seuils obtenues.

Tableau XLVI : Valeurs seuils retenues après analyse ROC pour M5 (marqueurs du cluster 4).

| Variable | Observations | Amplitude seuil (mm) | Sensibilité | Spécificité | VPP | VPN | Exactitude | AUC |
|----------|--------------|----------------------|-------------|-------------|-----|------|------------|------|
| Pln11 | 284 | 6,3 | 94% | 84% | 55% | 99% | 86% | 0,94 |
| C02 | 320 | 9,4 | 96% | 84% | 55% | 99% | 86% | 0,96 |
| Cms7 | 327 | 8,8 | 96% | 87% | 62% | 99% | 89% | 0,98 |
| Cms5 | 315 | 5,4 | 96% | 73% | 43% | 99% | 77% | 0,89 |
| Cms3 | 316 | 5,1 | 98% | 73% | 42% | 99% | 77% | 0,88 |
| Cms1 | 317 | 8,7 | 93% | 87% | 60% | 98% | 88% | 0,96 |
| C01 | 289 | 9,7 | 91% | 91% | 67% | 98% | 91% | 0,97 |
| Z5 | 337 | 6,8 | 89% | 87% | 58% | 98% | 87% | 0,94 |
| BZ5 | 330 | 5,8 | 79% | 79% | 43% | 95% | 79% | 0,86 |
| Dao1 | 339 | 5,6 | 95% | 71% | 41% | 99% | 75% | 0,91 |
| Cmi1 | 274 | 3,7 | 98% | 60% | 35% | 99% | 67% | 0,85 |
| Cmi3 | 222 | 2,8 | 100% | 62% | 38% | 100% | 69% | 0,77 |
| Cmi5 | 279 | 6,2 | 92% | 70% | 39% | 98% | 74% | 0,86 |
| H3 | 325 | 1,7 | 100% | 43% | 27% | 100% | 53% | 0,69 |
| H1 | 332 | 2,9 | 98% | 53% | 32% | 99% | 61% | 0,76 |
| H0 | 324 | 2,7 | 100% | 49% | 29% | 100% | 58% | 0,71 |
| M0 | 329 | 2,5 | 97% | 48% | 29% | 98% | 57% | 0,68 |
| H6 | 327 | 2,1 | 98% | 47% | 28% | 99% | 56% | 0,69 |
| H4 | 335 | 3,2 | 98% | 52% | 31% | 99% | 60% | 0,79 |
| Dao4 | 316 | 5,7 | 93% | 72% | 41% | 98% | 75% | 0,89 |
| BZ9 | 311 | 6,1 | 87% | 84% | 54% | 97% | 85% | 0,90 |
| BZ10 | 318 | 4,4 | 96% | 64% | 36% | 99% | 69% | 0,88 |
| Z11 | 332 | 7,6 | 83% | 88% | 57% | 96% | 87% | 0,92 |
| Pln5 | 310 | 6,3 | 90% | 85% | 53% | 98% | 86% | 0,93 |

Tableau XLVII : Valeurs seuils retenues après analyse ROC pour M5 (marqueurs du cluster 3).

| Variable | Observations | Amplitude seuil (mm) | Sensibilité | Spécificité | VPP | VPN | Exactitude | AUC |
|----------|--------------|----------------------|-------------|-------------|-----|-----|------------|------|
| Pln10 | 308 | 4,6 | 88% | 86% | 55% | 97% | 86% | 0,90 |
| R5 | 338 | 4,6 | 97% | 84% | 56% | 99% | 86% | 0,95 |
| Z4 | 323 | 6,0 | 93% | 87% | 59% | 98% | 88% | 0,95 |
| Z3 | 320 | 5,0 | 96% | 84% | 57% | 99% | 86% | 0,93 |
| BZ2 | 337 | 3,8 | 90% | 78% | 46% | 97% | 80% | 0,87 |
| BZ3 | 337 | 5,8 | 83% | 88% | 60% | 96% | 87% | 0,91 |
| BZ4 | 329 | 4,9 | 93% | 70% | 40% | 98% | 74% | 0,89 |
| Dao2 | 313 | 2,1 | 98% | 45% | 28% | 99% | 54% | 0,74 |
| Dao3 | 281 | 1,9 | 90% | 41% | 24% | 95% | 50% | 0,64 |
| B6 | 309 | 3,3 | 89% | 57% | 31% | 96% | 62% | 0,77 |
| B5 | 318 | 2,6 | 95% | 45% | 27% | 98% | 54% | 0,75 |
| B4 | 331 | 3,8 | 77% | 65% | 32% | 93% | 67% | 0,77 |
| B3 | 334 | 3,3 | 86% | 71% | 38% | 96% | 74% | 0,80 |
| Dao5 | 312 | 2,5 | 98% | 50% | 29% | 99% | 58% | 0,77 |
| Dao6 | 276 | 2,3 | 92% | 49% | 28% | 97% | 57% | 0,68 |
| B12 | 316 | 2,6 | 95% | 51% | 29% | 98% | 59% | 0,77 |
| B11 | 321 | 4,2 | 79% | 71% | 37% | 94% | 73% | 0,81 |
| B10 | 302 | 4,2 | 80% | 73% | 39% | 94% | 74% | 0,80 |
| B9 | 303 | 3,6 | 78% | 70% | 34% | 94% | 72% | 0,80 |

| | | | | | | | | |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|
| BZ7 | 300 | 3,7 | 93% | 76% | 46% | 98% | 79% | 0,90 |
| BZ8 | 324 | 5,5 | 89% | 85% | 55% | 97% | 85% | 0,91 |
| Z10 | 328 | 7,5 | 86% | 94% | 77% | 97% | 93% | 0,95 |
| Z9 | 339 | 5,2 | 98% | 85% | 58% | 100% | 87% | 0,95 |
| R2 | 334 | 5,5 | 91% | 91% | 67% | 98% | 91% | 0,94 |
| Pln3 | 299 | 3,2 | 81% | 81% | 48% | 95% | 81% | 0,86 |
| Pln4 | 321 | 4,3 | 93% | 83% | 53% | 98% | 84% | 0,91 |
| N1 | 258 | 2,6 | 82% | 75% | 41% | 95% | 76% | 0,84 |

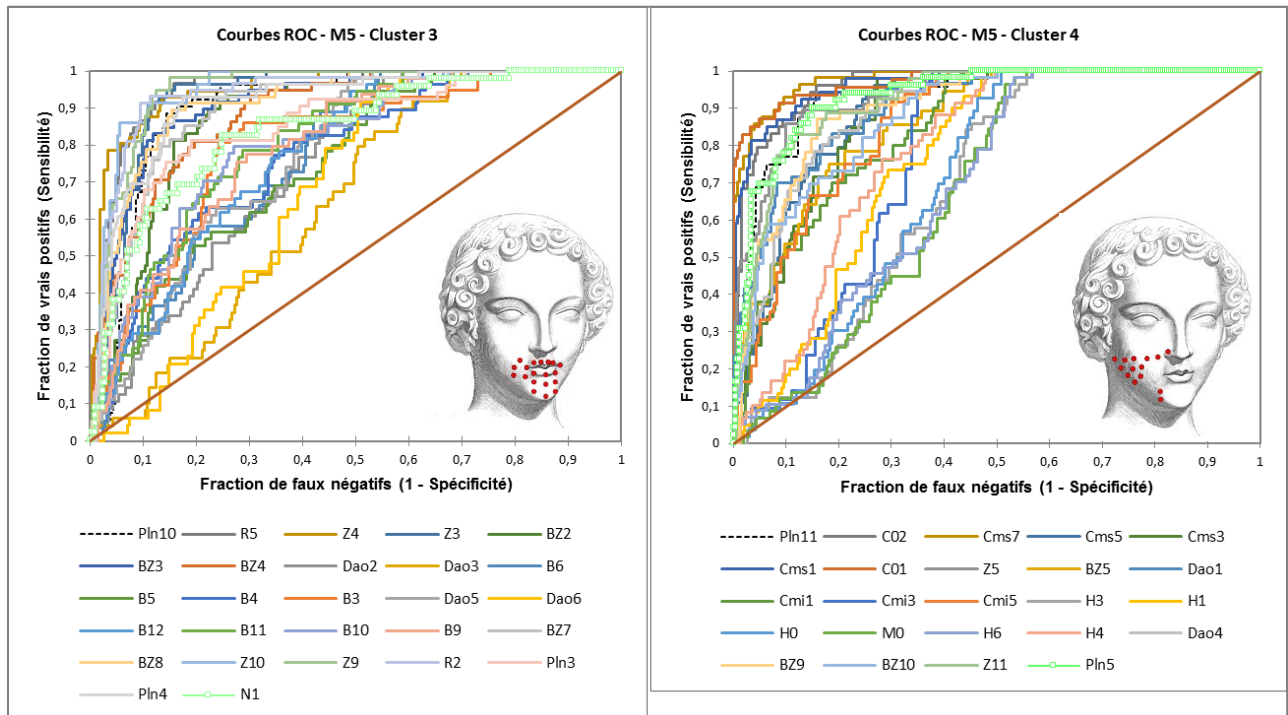


Figure 78 : Courbes ROC pour les marqueurs de deux clusters lors de la réalisation de M4.

Ces calculs nous ont donc permis d'obtenir des valeurs seuils, définies par une sensibilité et une spécificité propre. Ces valeurs seuils représentent l'amplitude à partir de laquelle nous pouvons considérer que le mouvement a été correctement réalisé.

3.7. Analyse spatio-temporelle

Dans le cadre de cette thèse, il n'a pas été possible d'analyser les déplacements au cours du temps sur la population de référence compte tenu des contraintes techniques et temporelles.

Les figures 79 à 83 représentent, pour exemple, les amplitudes de déplacement des cinq mouvements étudiés pour des individus.

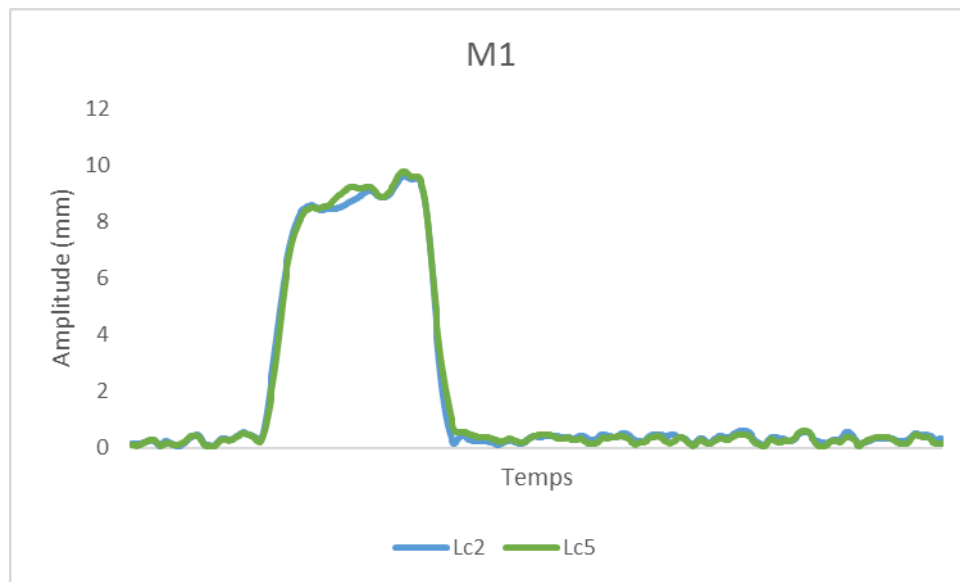


Figure 79 : Fermeture simple des paupières. Exemple du sujet « S01 ».

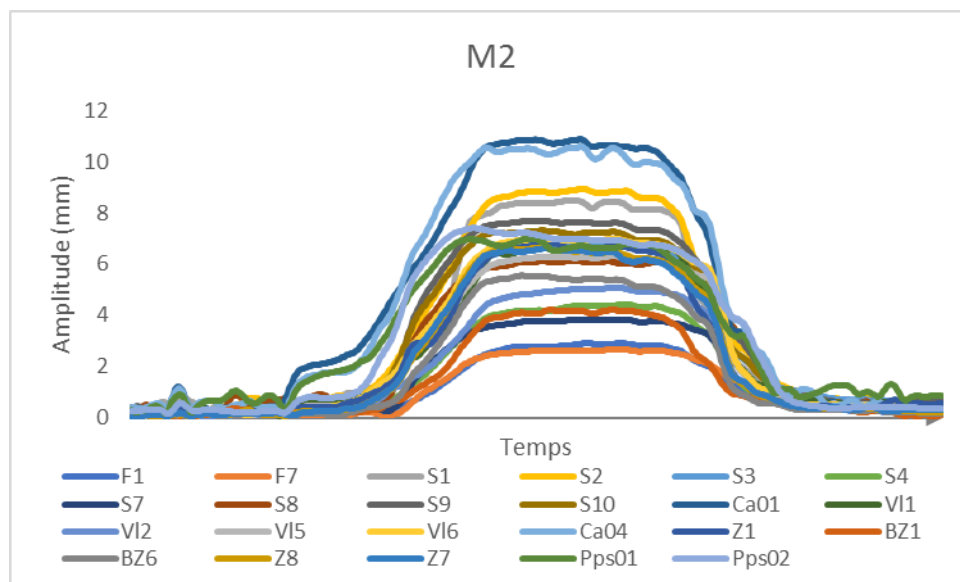


Figure 80 : Fermeture forcée des paupières. Exemple du sujet « S10 ».

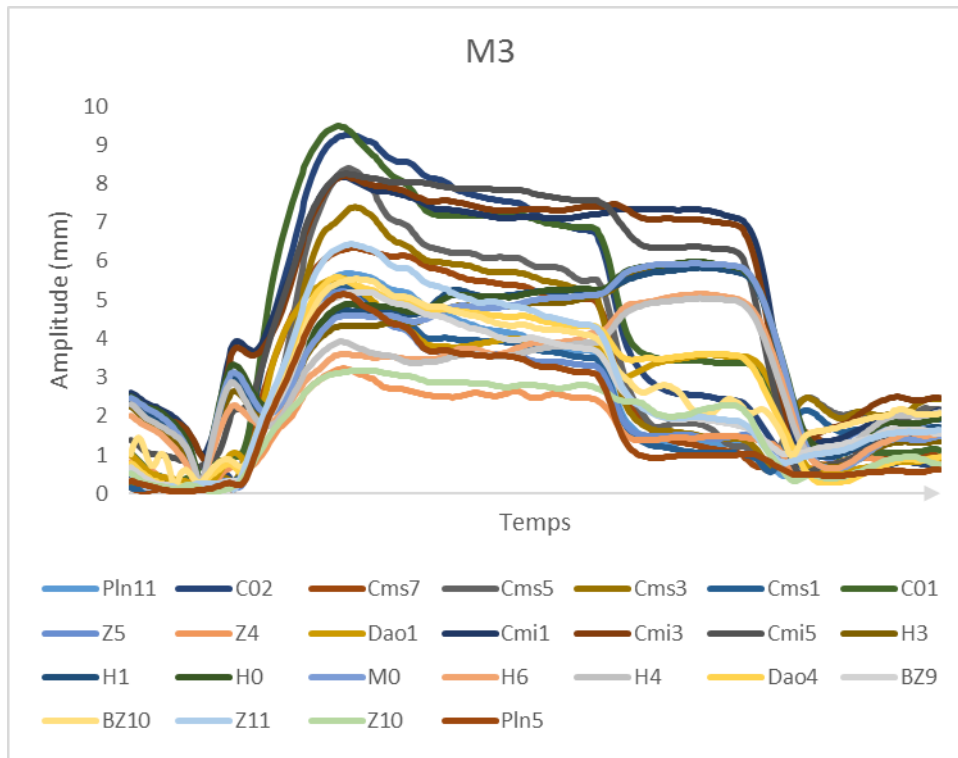


Figure 81 : Protrusion labiale sur le son « O ». Exemple du sujet « S01 ».

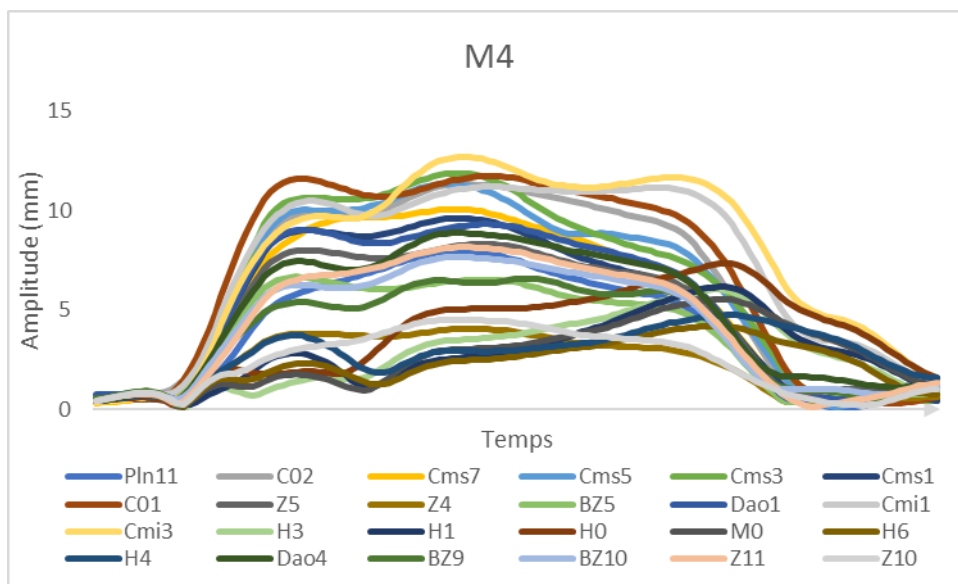


Figure 82 : Protrusion labiale sur le son « pou ». Exemple du sujet « S02é ».

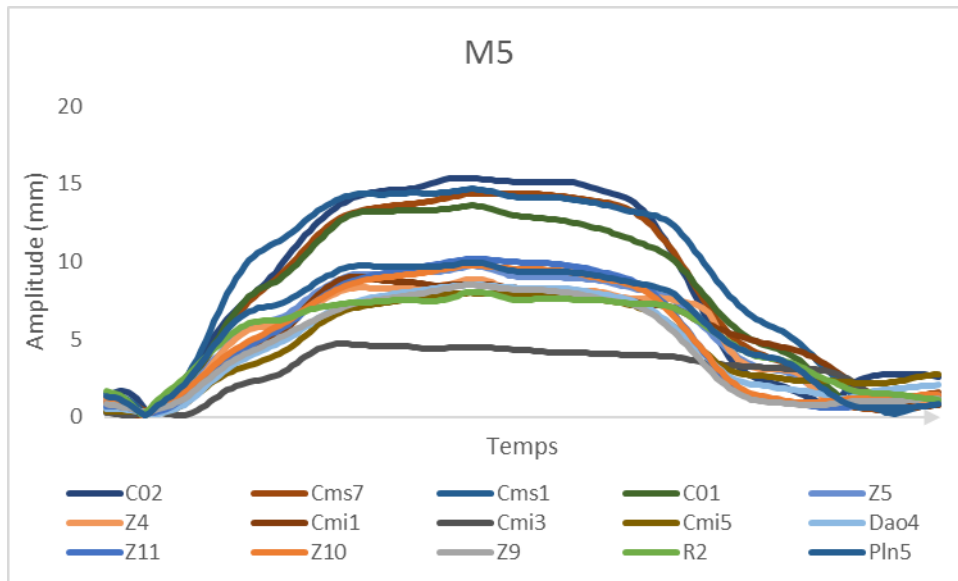


Figure 83 : Sourire volontaire découvrant les dents. Exemple du sujet "S07".

Ce type d'analyse permet d'obtenir des données spatio-temporelles quantifiant le mouvement :

- Durée et vitesse du mouvement
- Durée et vitesse de la phase de contraction
- Durée et vitesse de la phase de relâchement

Ces données permettraient, dans un contexte clinique, de détecter les anomalies de mouvement et de contraction musculaire.

CHAPITRE 4 :

DISCUSSION

4. Discussion

Ce chapitre discutera dans un premier temps de la méthode mise en place, des mouvements analysés, puis de la portée diagnostique des résultats. Nous étudierons également les résultats à la lumière de la littérature pour finir sur les limitations et perspectives de cette thèse.

4.1. Analyse de la méthode

4.1.1. Positionnement des marqueurs

Le temps de pose des marqueurs a été considérablement amélioré au cours du protocole. A plus d'une heure lors des premières expériences, celui-ci est finalement passé sous la barre des 30 minutes (Figure 45). Cette évolution est due à plusieurs éléments :

- L'introduction du masque perforé a été réalisé dès la troisième expérimentation. C'est sans nul doute la raison qui a permis de diminuer le temps de pose de plus de 25 minutes. En effet, il n'était plus nécessaire de réaliser des mesures sur la face du sujet pour obtenir un positionnement adéquat des marqueurs.
- Le pré-positionnement des marqueurs sur l'empreinte en plâtre a été mis en place dès la cinquième expérimentation. Cela consistait à transférer le marqueur directement du plâtre au sujet. Cette méthodologie de pose a été introduite suite au constat que certains marqueurs étaient parfois oubliés, et que le recomptage des 105 marqueurs sur le sujet était extrêmement long et fastidieux. Cette mesure a permis de fiabiliser le processus de pose et de gagner un temps substantiel (environ 15minutes).
- Le changement de colle. Les premières colles utilisées (cf. Annexe II) ne donnaient pas entière satisfaction. La colle finalement retenue a simplifié le travail de pose. Nous avons d'ailleurs constaté une diminution du temps de pose parallèlement au changement de colle au cours de la septième expérimentation (gain d'environ 10 minutes).
- Pour finir, il y a probablement eu un « effet apprentissage ». En effet, à mesure des expérimentations, les préposés à la pose des marqueurs gagnaient en expérience et en rapidité.

Au final, la maturation du processus de pose des marqueurs a permis de passer d'un temps de préparation du sujet très long (85 minutes), à un temps plus raisonnable (26 minutes).

4.1.2. Choix du point fixe

Le choix d'un point fixe était indispensable pour la détermination des points mobiles. La situation de l'extrémité céphalique, qui est une structure très mobile était une problématique importante.

Plusieurs hypothèses ont alors été formulées concernant le choix du point fixe :

- **L'utilisation d'une gouttière maxillaire.** Supporté par la dentition, ce dispositif retranscrit avec fidélité mouvements de la tête. Cependant son port est contraignant pour le sujet, et peut gêner certains mouvements labiaux (Figure 84). La précision de la gouttière en tant que point fixe a été estimée à moins de 0,1 mm ($\pm 0,1\text{mm}$) (Tableau XIX). Cette précision est très négligeable comparé aux déplacements des marqueurs.

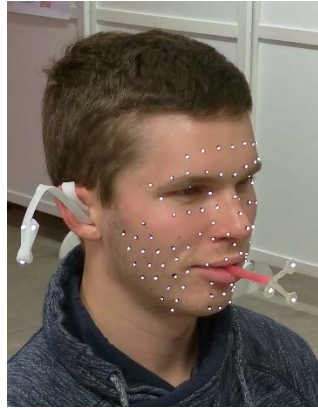


Figure 84 : Gouttière maxillaire et dispositif auriculaire.

- **Le point fixe sur le pavillon de l'oreille.** En appui sur le pavillon de l'oreille et la conque, ce dispositif est moins contraignant pour le sujet et plus simple à fabriquer. Cependant, les mouvements de l'articulation temporo-mandibulaire, peuvent se transmettre au pavillon de l'oreille situé à proximité. Il a d'ailleurs été mesuré de mouvements de plus de 0,7mm lors de la réalisation du protocole. Ce déplacement est loin d'être négligeable par rapport aux mouvement faciaux. Ces résultats nous poussent à considérer que le dispositif sur le pavillon de l'oreille n'est pas pertinent comme point fixe.
- **L'utilisation d'un bandeau péricranien.** Facile d'usage, le bandeau est standard et facile à enfiler. Cependant, nous avons remarqué que celui-ci avait tendance à glisser au cours du temps. Par ailleurs, le positionnement reproductible n'est pas possible. Il a donc été considéré comme non fiable et a été abandonné dès les premières mesures.
- **L'identification de points fixes anatomiques.** L'identification de points fixes anatomiques, qui ne nécessiteraient pas d'appareillage spécifique est l'un des enjeux de ce protocole. Classiquement, il s'agit de repères osseux. Ceux présents sur la tête sont principalement l'occiput et les tempes, mais sont recouverts par les cheveux. Plus près de la face les processus mastoïdes sont facilement identifiables mais leur capture est difficile car ils sont facilement masqués par les oreilles et les cheveux longs. Et enfin sur la face, il y a les processus temporaux, zygomatiques, la glabelle, l'os nasal et le dorsum. Ces zones correspondent aux marqueurs Z6-Z2, Z7-Z1, G0, et D1-D2-D3. Parmi ces marqueurs, le marqueur D2 est celui qui a été le moins mobile durant la réalisation des mouvements avec 0,2mm (Tableau XXXIV). Ce point seul n'est pas suffisant pour déterminer un référentiel fixe, ainsi il faudrait isoler également deux autres marqueurs tels que Pln1 et Pln7 qui ont un déplacement relatif moyen de 0,3mm (Figure 85). Il serait nécessaire de comparer l'amplitude des déplacements avec ce référentiel anatomique fixe et avec la gouttière maxillaire afin d'en évaluer la pertinence.

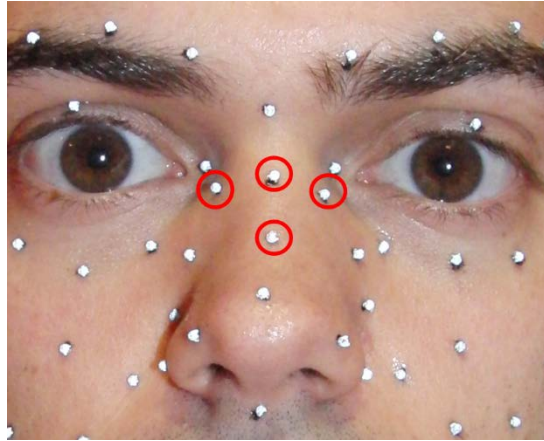


Figure 85 : Les quatre points anatomiques présentant le moins de mobilité.

En conclusion, la mise en place de la gouttière maxillaire s'est avérée être la solution la plus fiable à mettre en place, elle peut cependant être inconfortable pour le sujet. La précision de mesure du protocole d'analyse quantifiée de la mimique est de 0,1mm ($\pm 0,1$).

Les points fixes anatomiques sont une hypothèse prometteuse qu'il faudra explorer. Dans les 411 mouvements enregistrés dans ce protocole, 8,76% des captures n'ont pas pu être traitées à cause d'une défaillance d'un des marqueurs du référentiel maxillaire (Tableau XVII). Le référentiel fixe de référence est donc à identifier comme un point de vulnérabilité du protocole.

4.1.3. Choix des marqueurs

Dans un souci d'exhaustivité, nous avons volontairement placé un grand nombre de marqueur sur la face du sujet. Un premier protocole à 141 marqueurs n'avait pas donné satisfaction, car celui-ci ne répondait pas aux contraintes techniques (Tableau LVII). Le second protocole avec 105 marqueurs a finalement été retenu.

D'un point de vue technique, nous avons remarqué que certains marqueurs sont très fiables (présent dans 99% des captures), alors que d'autres sont peu fiables (présent dans seulement 31% des captures) (Tableau XXI). Ce phénomène peut être expliqué par plusieurs éléments :

- **Labélisation difficile.** Certaines zones de la face présentaient une densité importante de marqueurs. C'était le cas par exemple des marqueurs Ca02-PIn1 et Ca03-PIn7. Leur proximité, et les variations anatomiques des sujets rendaient parfois leur identification difficile. Ainsi leur présence varie entre 79% et 85%.
- **Occlusions de marqueurs.** Lors de certains mouvements, il arrivait que des marqueurs soient masqués. C'est le cas par exemple des marqueurs placés sur les paupières (Lc2-Lc5 et Pps01-Pps02). Chez un grand nombre de sujet, ces marqueurs restaient cachés dans le pli palpébral lors de l'ouverture des paupières. Ils ont donc la plus faible proportion de présence (31% à 38%), sans pour autant entraver l'analyse de la mobilité palpébrale. Ce problème a également été rencontré chez certain sujets au niveau de la lèvre inférieure qui occultait les marqueurs (Cmi1-Cmi3-Cmi5) lors des mouvements 3 et 4 (présence 61% à 78%).
- **Swapping (permutation de marqueurs).** La forte densité de marqueur nous a également confronté au phénomène de « swapping », c'est-à-dire que le logiciel de reconstruction

permutent accidentellement deux marqueurs trop proches l'un de l'autre. La correction de ces erreurs se fait manuellement, est chronophage, et peut conduire à la suppression d'un marqueur pour faciliter la labélisation.

Les difficultés d'identification et de permutation peuvent être résolues facilement en diminuant le nombre des marqueurs. Compte tenu de leur densité importante dans ce protocole, cela semble possible.

Par ailleurs, les marqueurs placés sur la paupière se sont montrés être logiquement les plus pertinents pour l'analyse des mouvements M1 et M2, mais ils sont également les seuls à être présent dans moins de 50 des captures. Cela est moins problématique dans l'analyse de cohorte, mais peut être un problème dans le cas d'analyses individuelles (Tableau XXII). Une solution pourrait être l'usage de marqueurs de plus gros diamètre dans cette zone, évitant alors le phénomène de masquage.

4.1.4. Précision de mesure

L'étude de la variabilité métrologique a permis d'identifier une erreur de mesure technique liée à la précision de l'outil de capture de 0,1mm. Une erreur de mesure expérimentale liée à la reconstruction tridimensionnelle a également été mesurée et a été également évaluée à 0,1 mm ($\pm 0,1$).

Ces deux valeurs peuvent être confondues. Ainsi toutes les valeurs présentées dans les résultats ont été arrondies au dixième de millimètre près. Cette précision de mesure, comparée aux amplitudes de déplacements des mouvements étudiées (plus de 6mm en moyenne) est négligeable.

4.1.5. Reproductibilité de mesure

L'écart-type et le coefficient de variation permettent d'apprécier la dispersion des données. Dans l'idéal, des données peu dispersées nous indiqueraient une forte reproductibilité des mesures.

Les coefficients de variation de chacun des mouvements, en interindividuel, sont élevés. Les coefficients de variation pour les mesures intra-individuelles sont également très élevés pour les captures statiques, ceux-ci sont cependant meilleurs pour les mouvements. Pour expliquer ces résultats, plusieurs points sont à prendre en compte :

- Un grand nombre de valeurs, correspondant notamment aux marqueurs les moins mobiles ont des amplitudes de déplacement très proches de zéro. L'amplitude mesurée est en effet inférieure à la précision de mesure que nous avons déterminée. Dans ces conditions, le coefficient de variation sera mathématiquement très élevé.
- Il existe une variabilité de l'anatomie entre les sujets, les amplitudes de déplacement peuvent logiquement être aussi variables. Il n'est pas surprenant d'obtenir des coefficients de variation élevés pour les mesures interindividuelles.
- Concernant les mesures intra-individuelles, le faible jeu de données disponibles nous permet seulement de définir des tendances. Cependant, la variabilité élevée des données pour les captures statiques est à mettre en relation avec leur amplitude quasi nulle, du même ordre de grandeur de la précision de mesure. Nous pouvons estimer que les déplacements de la face

sur un visage « au repos » sont négligeables pour l'analyse clinique. Les micromouvements enregistrés sont probablement liés soit à des artefacts, soit à l'outil de mesure, soit à un mouvement infime du sujet.

- Les mouvements analysés en intra-individuel sont donnés à titre informatif, car l'effectif étudié est trop restreint pour un traitement statistique. Cependant, la tendance indique une reproductibilité intra-individuelle acceptable. De nouvelles mesures devront corroborer cette hypothèse.

Les mouvements ont été réalisés de manière isolée (réalisé une fois), et répétée (répété trois fois). Les tableaux XXVII à XXIX représentent les corrélations entre ces mouvements. **Nous constatons que la corrélation entre une mesure isolée et une mesure répétée est excellente pour chacun des mouvements.**

La réalisation d'un mouvement isolé par le sujet, ou répété trois fois a mis également en évidence une différence d'amplitude. Ainsi l'amplitude maximale des mouvements répétés est inférieure d'en moyenne 14,7%(±2,8) par rapport à un mouvement réalisé une seule fois (Tableau XXVI).

La bonne corrélation entre les mesures interindividuelles nous indique que même s'il existe une variabilité dans l'amplitude de déplacement, le profil de déplacement, lui, est identique.

Par ailleurs, il a été mis en évidence une forte corrélation entre les deux mouvements de protrusion labiale M3 et M4 (son « o » et son « pou »). Cependant, l'analyse montre une mauvaise concordance des données. La zone d'action de ces deux mouvements est probablement proche, mais dans des amplitudes de déplacements différentes. En effet, la prononciation du son « pou » entraîne une protrusion de la mandibule, qui n'est pas retrouvée pour le son « o ».

Finalement, nous n'avons pas retrouvé de différence significative avec les mesures de durées réalisées par Dakpé et al. [86] pour les cinq mêmes mouvements. Ainsi la durée de réalisation des mouvements semble être homogène d'un sujet à l'autre, indépendamment des moyens de mesure.

En résumé, le protocole de capture des mouvements de la mimique faciale mis en place répond donc aux propriétés suivantes :

- La préparation du sujet est réalisable en moins de 30 minutes.
- Il nécessite la mise en place d'un référentiel « fixe » matérialisé par une gouttière maxillaire.
- Cette gouttière pourrait être remplacée à terme par des points anatomiques localisés sur le dorsum du nez afin d'alléger le protocole.
- Certains marqueurs sont peu fiables, il faudra ainsi déterminer leur pertinence et si nécessaire améliorer leur capture.
- La précision de mesure est de l'ordre de 0,1mm.
- Les mesures interindividuelles et intra-individuelles montrent un profil de déplacement très bien corrélé, avec une cependant une variabilité importante des amplitudes mesurées.

4.2. Analyse des mouvements

4.2.1. Pertinence des mouvements étudiés

4.2.1.1. *Zones non mobilisées*

Le choix des cinq mouvements du protocole devait permettre d'être représentatifs de la fonction motrice de la face. La réalisation du protocole complet a permis d'enregistrer tous les mouvements en une seule mesure. L'analyse de cette capture montre un déplacement significatif pour l'ensemble des marqueurs ($p < 0,002$) de la face.

Cependant, ces marqueurs ne se déplacent pas tous dans la même mesure. Ainsi, les figures 52 et 53 nous permettent d'identifier une zone peu mobilisée par le protocole mis en place.

Celle-ci est caractérisée par les marqueurs (figure 86) :

- D1, D2, D3 : dorsum du nez
- N2-N3 : ailes du nez
- Ca02-Ca03 : canthi internes
- Pln1-Pln7 : processus frontal du maxillaire.

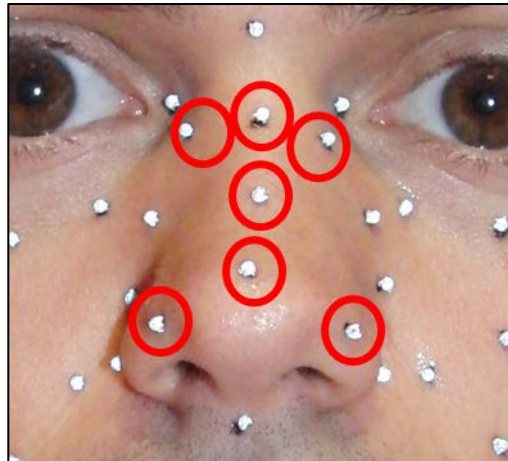


Figure 86 : Marqueurs avec l'amplitude la plus faible durant la réalisation des cinq mouvements.

L'amplitude de déplacement maximale de ces marqueurs est comprise entre 1,3 et 2,6mm.

L'une des hypothèses expliquant la faible amplitude de ces marqueurs est tout d'abord la faible sollicitation de cette zone par les mouvements demandés. En effet, il n'a pas été demandé de réaliser des mouvements de froncement du nez, ou des narines.

Cependant, la fermeture forcée des paupières induit une contraction du muscle pyramidal du nez, dont la terminaison est proche de D1. L'amplitude de déplacement de D1 est cependant très faible (1,4mm) comparée à la moyenne des amplitudes maximales (7,2mm).

4.2.1.2. *Concordance clinique des déplacements observés*

L'analyse des différents mouvements a permis de délimiter géographiquement une zone d'action pour chacun d'entre eux. Ces zones sont visibles sur les figures 56 à 64.

Ainsi, nous avons pu comparer les déplacements observés avec les descriptions anatomiques de la littérature (Tableau XLVIII) [2,3,36,90].

Tableau XLVIII : Correspondance entre les observations expérimentales et les descriptions anatomiques.

| Mouvement | Principaux marqueurs activés | Muscles contractés | Muscles étirés |
|--|--|--|-----------------------------------|
| <i>Fermeture simple des paupières (M1)</i> | Lignes des cils (Lc2, Lc5) | Muscle orbiculaire des paupières (portion palpébrale) | |
| <i>Fermeture forcée des paupières (M2)</i> | Sourcils (S1...) | Muscle corrugateur du sourcil | |
| | Sillon palpébral (Pps01...) Lignes des cils (Lc2, Lc5) Valée des larmes (V11...) | Muscle orbiculaire des paupières (portions palpébrale, orbitaire supérieure et inférieure) | |
| | | Muscle procerus | |
| | Zone zygomatique : (Z1, Z2...), releveur (R2, R5) | Muscle zygomatique et élévateur de l'angle de la bouche | |
| <i>Protrusion labiale (M3 et M4)</i> | Lèvre supérieure (Cms...) Lèvre inférieure (Cmi...) | Orbiculaire de la bouche | |
| | Menton (M0, H1...) | Mentonnier | |
| | Lèvre inférieure (Cmi...) | Abaisseur de la lèvre inférieure | |
| | Angle de la bouche (Dao...) | | Abaisseur de l'angle de la bouche |
| | Commissures (C01...) Jugal sup. (Z5...) | | Zygomatiques |
| | Jugal moyen. (BZ5...) Jugal inf. (B6...) | | Risorius Buccinateur |
| | M4+ : Paralatéronasal bas et releveur (Pln5, R2...) | | Releveur de la lèvre sup. |
| <i>Sourire découvrant les dents (M5)</i> | Vallée des larmes (V11...) | Orbiculaire de la paupière | |
| | Ailes du nez (N2...) | Releveur de l'aile du nez | |
| | Releveur (R2...) | Releveur de la lèvre sup. | |
| | Jugal sup. (Z1...) Jugal moyen (BZ...) | Grand zygomatique | |
| | Commissure (C01...) | Élévateur de l'angle de la bouche | |
| | Lèvres (Cms, Cmi...) | | Orbiculaire des lèvres |
| | Menton (H1...) | Mentonnier | |
| | Lèvre inf. (Cmi...) | | Abaisseur de la lèvre inférieure |

Les déplacements de marqueurs sont donc concordants avec les éléments issus de la littérature. Cela confirme la pertinence des mesures de cette méthode d'analyse quantifiée des mouvements de la mimique. Le protocole de capture des mouvements de la mimique permet donc de mesurer à la fois des contractions musculaires, mais aussi des étirements des tissus peauciers.

4.2.2. Symétrie – asymétrie des mouvements

Sur les 111 marqueurs utilisés dans ce protocole, 96 étaient placés de manière symétrique, soit 48 paires. Nous avons procédé à deux types de mesure : l'une globale comparant l'ensemble des marqueurs d'une hémiface à l'autre, et l'autre analytique comparant l'amplitude de déplacement de chaque paire de marqueurs.

En ce qui concerne l'analyse globale, nous avons retrouvé uniquement une différence significative de 0,1 mm entre les mouvements M3 et M4 pour les amplitudes de déplacement moyennes.

Cette différence est égale à la précision de mesure que nous avons précédemment décrite. Elle peut donc être considérée comme négligeable.

Les tableaux XXXII et XXXIII nous ont décrit les asymétries de marqueurs lors des différents mouvements. Nous avons pu constater que pour un certain nombre de marqueurs, l'asymétrie présente une amplitude identique à notre précision de mesure, celle-ci est donc négligeable. Les autres marqueurs présentent par ailleurs une amplitude de déplacement très faible pour les mouvements concernés. L'asymétrie mesurée est donc probablement liée à des artefacts lors de la capture ou de la labélisation.

Les asymétries de marqueurs sont donc de faible amplitude et nous paraissent négligeable. Les cinq mouvements étudiés ont donc été réalisés de manière symétrique par les sujets. Ce constat nous nous permettra de quantifier une asymétrie pathologique lors d'une mise en œuvre sur des patients.

La capacité à mesurer cette symétrie est d'un haut intérêt clinique lorsque l'on évalue une paralysie faciale [91]. Le protocole mis en place est donc capable de mesurer une asymétrie de manière globale, ou analytique. Il est également envisageable de décrire cette asymétrie dans une sphère régionale ou fonctionnelle.

4.2.3. Caractérisation des mouvements étudiés

L'analyse en composante principale permet de décrire simultanément un nombre important de variables quantitatives. Cette méthode va aboutir à une représentation graphique des variables en fonction de facteurs permettant d'étudier et visualiser les corrélations entre les variables.

Les facteurs sont des variables virtuelles permettant une interprétation la plus fidèle possible de la réalité, dans notre cas sous forme d'un graphique en deux dimensions. Les deux dimensions choisies ont été F1 et F2, en effet, que ce soit pour les amplitudes moyennes, au 75^{ème} percentile ou maximales, plus de 85% des points sont correctement restitués sur ces deux axes (Tableau XXXVII à Tableau XXXIX).

4.2.3.1. Variables « mouvement »

La projection des « mouvements » sur les axes (Figure 65) nous indique que le facteur F2 est corrélé positivement avec les cinq mouvements du protocole. Les mouvements M1 et M2 sont en revanche corrélés négativement avec F1, alors que M3, M4 et M5 sont corrélés positivement avec cet axe.

On constate donc que l'axe F1 oppose (corrélation positive) les mouvements de la partie inférieure de la face (M3, M4 et M5), et (corrélation négative) les mouvements de la partie supérieure de la face (M1 et M2).

L'axe F2 semble corrélé quant à lui à l'amplitude du mouvement. Cette interprétation est précisée par l'analyse des graphiques relatifs aux marqueurs (Figures 66 à 68).

Par ailleurs, nous constatons une très forte corrélation entre le mouvement M3 (son « O ») et M4 (son « pou »). Cette corrélation est logique puisqu'il s'agit de deux mouvements de protrusion labiale.

4.2.3.2. *Projection des marqueurs*

La projection des marqueurs sur les axes F1 et F2 nous confirme ces hypothèses :

- L'axe F2 est lié à la mobilité du marqueur. La corrélation à F2 est positive pour les marqueurs qui présentent une amplitude de déplacement élevée (par exemple : marqueurs paupières Lc2-Lc5). La corrélation à F2 est négative pour les marqueurs qui présentent une faible mobilité (par exemple référentiel fixe Ma1, Ma2, Ma3).
- L'axe F1 est lié à la zone topographique de la face concernée par le mouvement. Les marqueurs de la zone orbitaire, du front et du nez sont corrélés négativement avec l'axe F1. Les marqueurs des joues, de la bouche et du menton sont corrélés positivement avec l'axe F1.

4.2.3.3. *Partitionnement des données*

L'analyse en cluster nous a permis de préciser cette analyse. Cinq groupes de marqueurs ont été identifiés :

- **Des marqueurs avec une amplitude de déplacement nulle ou très faible.** Ils correspondent aux points fixes : gouttière maxillaire, et oreille ; à la zone nasale et zone paralatéro-nasale ; et à l'angle de la mandibule. Ces marqueurs ne sont corrélés à aucun des cinq mouvements du protocole.
- **Des marqueurs avec une grande amplitude et localisés à la partie supérieure de la face.** Il s'agit des deux marqueurs Lc2 et Lc5 localisés sur la ligne des cils. Ces deux marqueurs sont corrélés au mouvement de fermeture simple des paupières (M1).
- **Des marqueurs avec une amplitude modérée et localisés à la partie supérieure de la face.** Il s'agit des marqueurs de la zone orbitaire : sourcils, plis palpébraux, canthi externes, et os zygomatique. Ces marqueurs sont corrélés au mouvement de fermeture forcée des paupières (M2).
- **Des marqueurs avec une amplitude modérée et localisés à la partie inférieure de la face.** Ils correspondent à la zone péribuccale et au menton (commissures, lèvres et menton). Ces marqueurs sont corrélés avec les mouvements de protrusion labiale et de sourire (M3, M4 et M5).
- **Des marqueurs avec une amplitude plus faible et localisés à la partie inférieure de la face.** Ils correspondent à la zone jugale. Ces marqueurs sont également corrélés avec les mouvements de protrusion labiale et de sourire (M3, M4 et M5).

En conclusion, l'analyse multivariée ainsi que le partitionnement des données nous a permis de :

- Définir des classes de marqueurs dont les propriétés sont connues (amplitude, localisation, et distance des marqueurs entre eux).
- Établir des groupes de marqueurs caractéristiques des mouvements.
- Définir une cartographie des déplacements des différentes structures de la face.

L'analyse des mouvements du protocole nous a permis :

- *De déterminer des zones très peu mobiles potentiellement assimilables à des point fixes.*
- *De considérer les mouvements des deux hémifaces comme symétriques.*
- *De caractériser les marqueurs : amplitude, zone d'action, mouvements considérés.*
- *De caractériser les mouvements par un groupe de marqueur et une zone anatomique.*

Dans un contexte clinique, ces éléments peuvent donc quantifier les éléments suivant :

- *Identifier précisément des zones hypo-mobiles.*
- *Quantifier la paralysie ou la parésie d'une hémiface.*
- *De réaliser une étude analytique des mobilités faciales.*
- *De réaliser une étude fonctionnelle des mobilités faciales.*
- *L'analyse des paramètres spatio-temporels pourrait compléter ces données par le suivi de la chronométrie, de la phase de contraction et de relâchement musculaire.*

4.3. Données à visées diagnostiques

Les calculs de sensibilité et de spécificité nous ont permis d'identifier des marqueurs emblématiques de chacun des mouvements. Le choix de ces marqueurs s'est basé sur l'aire sous la courbe (AUC), les rapports de vraisemblance (LR) et les valeurs prédictives. Les marqueurs emblématiques d'un mouvement sont alors définis par une amplitude maximale seuil, à partir de laquelle le mouvement sera détecté.

4.3.1. M1 : fermeture simple des paupières

Seuls deux marqueurs sont représentatifs du mouvement M1 : Lc2 et Lc5 (Tableau XLIX). Ces marqueurs sont symétriques et localisés sur la ligne des cils.

Avec un AUC de 0,8, ces marqueurs peuvent être considérés comme bien discriminants. La valeur prédictive négative est excellente (97%), ce qui signifie qu'on peut déterminer avec confiance l'absence de mouvement des paupières. En revanche, le rapport de vraisemblance positif, tout comme la valeur prédictive positive sont peu élevés. Cela signifie que ces marqueurs sont peu discriminants et que le nombre de faux positifs est élevé.

Cela peut s'expliquer facilement par le fait que les sujets réalisent des clignements reflexes qu'il est difficile de contrôler ou d'empêcher. Ainsi, des fermetures simples des paupières ont pu être enregistrées lors de la réalisation des autres mouvements.

Tableau XLIX : Marqueurs caractérisant le mouvement M1.

| Mouvement M1 | Amplitude max. seuil | Sensibilité | Spécificité | VPP | VPN | Exactitude | RL+ | RL- |
|-------------------------|---------------------------------|--------------------|--------------------|------------|------------|-------------------|------------|------------|
| <i>Lc2 (droite)</i> | 9,5mm | 86% | 77% | 41% | 97% | 79% | 3,758 | 0,185 |
| <i>Lc5 (gauche)</i> | 9,5mm | 86% | 77% | 41% | 97% | 79% | 2,913 | 0,071 |

4.3.2. M2 : fermeture forcée des paupières

Plusieurs marqueurs présentent une exactitude et une AUC excellente pour le mouvement M2. Il s'agit de couples de marqueurs que l'on peut retrouver de manière bilatérale. Le tableau L présente les cinq paires de marqueurs les plus emblématiques de ce mouvement. Les autres marqueurs sont sensibles mais peu spécifiques.

Tableau L : Marqueurs caractérisant le mouvement M2.

| Mouvement M2 | Amplitude max. seuil | Sensibilité | Spécificité | VPP | VPN | Exactitude | RL+ | RL- |
|-----------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------|------------|------------|-------------------|------------|------------|
| <i>S1 (droite)</i> | 3,6mm | 98% | 93% | 76% | 100% | 94% | 13,97 | 0,02 |
| <i>S10 (gauche)</i> | 4,8mm | 95% | 98% | 90% | 99% | 97% | 40,93 | 0,05 |
| <i>Ca01 (droite)</i> | 5,6mm | 96% | 93% | 73% | 99% | 93% | 13,11 | 0,04 |
| <i>Ca04 (gauche)</i> | 5,0mm | 100% | 93% | 77% | 100% | 95% | 15,06 | 0,00 |
| <i>Pps01 (droite)</i> | 5,4mm | 94% | 91% | 62% | 99% | 92% | 10,64 | 0,07 |
| <i>Pps02 (gauche)</i> | 6,7mm | 95% | 96% | 78% | 99% | 96% | 23,50 | 0,06 |
| <i>S2 (droite)</i> | 3,8mm | 98% | 94% | 76% | 100% | 95% | 15,77 | 0,02 |
| <i>S9 (gauche)</i> | 2,9mm | 100% | 92% | 73% | 100% | 93% | 12,14 | 0,00 |
| <i>S3 (droite)</i> | 3,5mm | 98% | 92% | 72% | 100% | 93% | 12,35 | 0,02 |
| <i>S8 (gauche)</i> | 3,2mm | 100% | 92% | 74% | 100% | 94% | 12,91 | 0,00 |

4.3.3. M3 et M4 : protrusion labiale

Les mouvements M3 et M4 présentent une mauvaise spécificité et une mauvaise valeur prédictive positive. Par ailleurs, aucun des marqueurs ne présente pour ces mouvements de rapport de vraisemblance supérieur à 10. Cela signifie que bien que sensibles au mouvement, les marqueurs sélectionnés sont peu discriminant et ont un faible apport diagnostique. Cette faible spécificité peut être liée à la proximité des mouvements M3 et M4. En effet, nous avons pu mesurer une forte corrélation entre ces mouvements, qui agissent sur la même zone anatomique. Afin d'évaluer si ces mouvements peuvent être confondus, nous avons réalisé un groupe unique rassemblant les mouvements M3 et M4. L'analyse ROC a mis en évidence cinq marqueurs présentant une AUC supérieure à 0,87. Cependant, le nombre de faux positifs n'est pas négligeable pour ces mouvements (Tableau LI), le rapport de vraisemblance est inférieur à 10, ce qui signifie que l'apport diagnostique de ces marqueurs est faible.

Les mouvements de protrusion labiale sont donc plus difficilement discriminables.

Tableau LI : Marqueurs caractérisant les mouvements M3 et M4.

| Mouvements M3-M4 | Amplitude max. seuil | Sensibilité | Spécificité | VPP | VPN | Exactitude | RL+ | RL- |
|-------------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------|------------|------------|-------------------|------------|------------|
| <i>Cmi3 (med)</i> | 5,5mm | 93% | 80% | 60% | 97% | 83% | 4,53 | 0,09 |
| <i>H0 (med)</i> | 4,0mm | 93% | 73% | 67% | 95% | 81% | 3,49 | 0,09 |
| <i>M0 (med)</i> | 3,8mm | 93% | 74% | 67% | 95% | 81% | 3,55 | 0,09 |
| <i>H3 (droite)</i> | 4,0mm | 90% | 76% | 68% | 93% | 81% | 3,73 | 0,14 |
| <i>H6 (gauche)</i> | 3,3mm | 97% | 71% | 66% | 97% | 80% | 3,35 | 0,05 |

4.3.4. M5 : sourire volontaire découvrant les dents

Le mouvement M5 a une zone d'action localisée à la fois sur les lèvres et les joues. Les marqueurs des clusters identifiés sur ces deux zones ont donc été sélectionnés pour la réalisation de ces tests (Tableau LII).

Tableau LII : Marqueurs caractérisant le mouvement M5.

| Mouvement M5 | Amplitude max. seuil | Sensibilité | Spécificité | VPP | VPN | Exactitude | RL+ | RL- |
|---------------|----------------------|-------------|-------------|-----|-----|------------|-------|------|
| C01 (droite) | 9,7mm | 91% | 91% | 67% | 98% | 91% | 10,54 | 0,09 |
| C02 (gauche) | 9,4mm | 96% | 84% | 55% | 99% | 86% | 6,10 | 0,04 |
| Cms1 (droite) | 8,7mm | 93% | 87% | 60% | 98% | 88% | 7,16 | 0,08 |
| Cms7 (gauche) | 8,8mm | 96% | 87% | 62% | 99% | 89% | 7,66 | 0,04 |
| Z4 (droite) | 6,0mm | 93% | 87% | 59% | 98% | 88% | 6,89 | 0,08 |
| Z10 (gauche) | 7,5mm | 86% | 94% | 77% | 97% | 93% | 15,53 | 0,15 |

Trois couples de marqueurs se démarquent. Il s'agit des commissures labiales (C01-C02), de la lèvre supérieure (Cms1-Cms7), et des joues (Z4-Z10). Néanmoins, les résultats ne sont pas symétriques pour les commissures et les joues, où d'un côté c'est le marqueur de l'hémiface droite qui présente un haut niveau de vraisemblance, et de l'autre c'est la joue gauche qui présente un haut niveau de vraisemblance. Cette asymétrie n'est pas expliquée par des mesures de symétries précédemment réalisées. La lèvre supérieure présente quant à elle un résultat cohérent pour les deux marqueurs, mais avec un niveau de vraisemblance considéré comme mineur.

En conclusion, nous avons pu réaliser une étude de la validité diagnostique de chacun des marqueurs pour la réalisation de notre protocole (Figure 87). La totalité des marqueurs retenus ont une bonne valeur prédictive négative, cela veut dire que l'on peut mesurer l'absence de mouvement avec confiance. En revanche, nous retrouvons deux types de marqueurs : très spécifiques et peu spécifiques d'un mouvement.

Des marqueurs sont capables d'identifier un mouvement (qualitatif) et de le quantifier :

- *La fermeture forcée des paupières (M2) est un mouvement pour lequel nous avons pu définir des marqueurs caractéristiques très fiables et avec un haut niveau de sensibilité et de spécificité. Cela signifie que nous sommes capables, à partir de l'amplitude maximum de déplacement d'un de ces marqueurs de déterminer si le mouvement M2 a été correctement réalisé.*
- *Le sourire volontaire découvrant les dents est un mouvement pour lequel nous avons également des marqueurs caractéristiques fiables. Cependant, les mesures ne sont pas homogènes entre l'hémiface gauche et droite.*

Des marqueurs permettent de quantifier un mouvement connu :

- *La fermeture simple des paupières (M1) est assimilable au clignement réflexe. L'analyse de ce mouvement est donc peu spécifique, car non contrôlé. Cependant les deux marqueurs des paupières présentent une excellente sensibilité au mouvement.*
- *Les mouvements de protrusion labiale (M3 et M4) sont peu spécifiques du mouvement. En revanche, des marqueurs ont pu être identifiés et permettent de déterminer si l'amplitude de déplacement est normale pour un mouvement connu.*

Pour finir, en fonction des besoins cliniques, la méthode ROC permet de moduler (dans le mesure du possible) le niveau de sensibilité ou de spécificité du marqueur en changeant l'amplitude seuil.

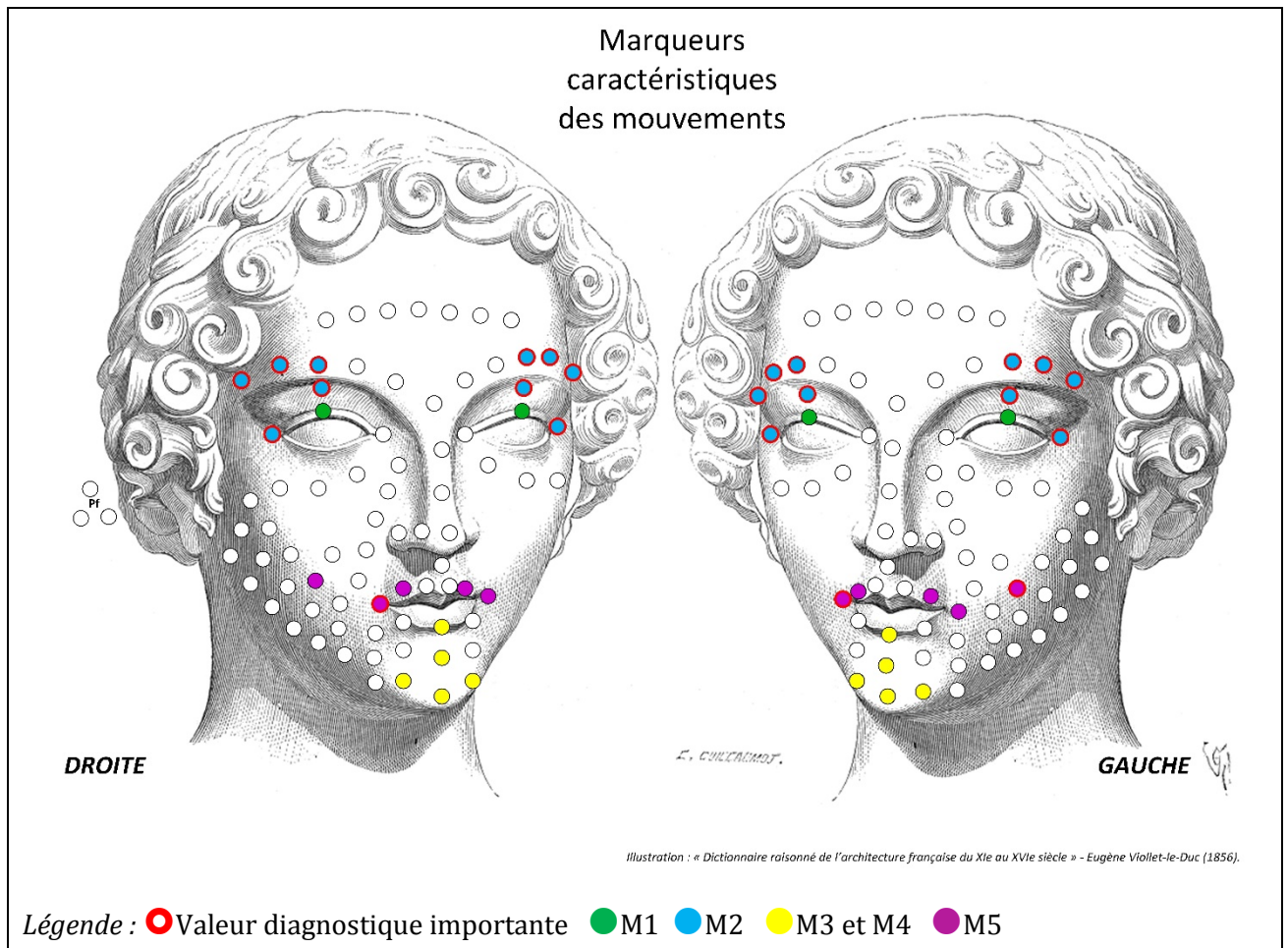


Figure 87 : Marqueurs emblématiques des cinq mouvements étudiés.

4.4. Résultats à la lumière de la littérature

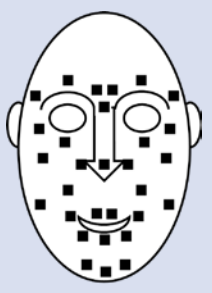
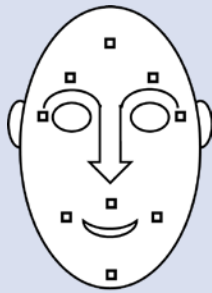
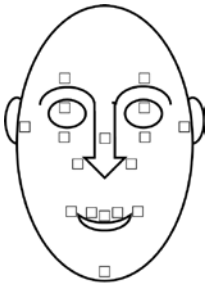
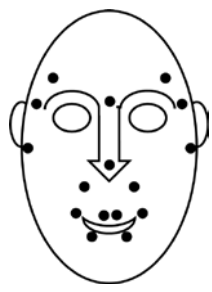
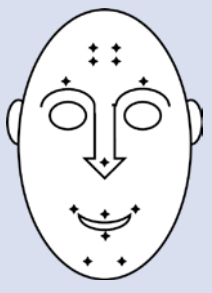
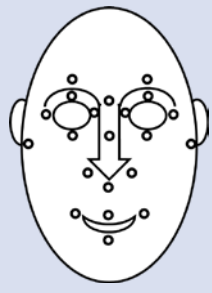
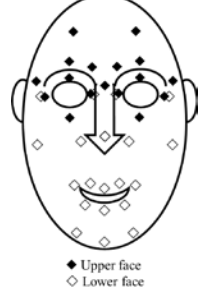
4.4.1. Performances techniques

Depuis plusieurs années, l'analyse quantifiée de la mimique a fait l'objets de quelques travaux de recherche. Le tableau LIII détaille les études qui ont étudié la mobilité de la face avec une technologie analogue à nos travaux.

Tableau LIII : Caractéristiques techniques des principales études étudiant la mobilité faciale par motion capture.

| <i>Auteurs</i> | <i>Année</i> | <i>Propriété techniques</i> | <i>Point fixe de référence</i> | <i>Type de données analysées</i> |
|--------------------------|--------------|--|--|--|
| Sarhan et al. | 2017 | Vicon™ system 100Hz Précision : 0,1mm | Dentition maxillaire | Amplitudes de déplacement (mm) Durées (sec.) |
| Frey et al. | 1994 | Vicon™ system 60Hz Précision : <1mm | Pointe du nez | % du déplacement maximal |
| Trotman et al. | 1998 | Motion Analysis™ 60fps Précision : 0,53mm | Dentition maxillaire | Déplacements (mm). |
| Green and Wilson | 2006 | Vicon™ system 60Hz Précision : n.c. | Front | Déplacements (mm). |
| Hontanilla et al. | 2007 | Facial CLIMA 50Hz Précision : 0,13mm | Position de repos | Déplacements (mm) Angles Aires (mm ²) Vitesses (mm/s) |
| Sforza et al. | 2012 | SMAT System 120Hz Précision : 0,121 mm | Tragus et la pointe du nez pour la partie supérieure de la face. Glabelle et un point fronto-temporal pour la partie inférieure de la face. | Déplacements (mm); Index comparant les deux hémifaces. |
| Jorge et al. | 2012 | Vicon™ system 100Hz Précision : 0,19mm | Position de repos | Déplacements (mm). |
| Feng et al. | 2014 | Evision CCD 1360 100fps Précision : 0,19mm | Casque | Déplacements (mm) Angles Aires (mm ²) Vitesses (mm/s) |

Tableau LIV : Taille, nombre et position des marqueurs de différents auteurs.

| <i>Auteurs</i> | <i>Taille</i> | <i>Nombre</i> | <i>Position</i> | <i>Auteurs</i> | <i>Taille</i> | <i>Nombre</i> | <i>Position</i> |
|--------------------------|---------------|--|---|----------------------|---------------|---------------|---|
| <i>Trotman et al.</i> | 4mm | 33 |  | <i>Jorge et al.</i> | 4 à 9.5mm | 11 |  |
| <i>Frey et al.</i> | 6mm | 18 |  | <i>Sforza et al.</i> | 2mm | 14 |  |
| <i>Green et al.</i> | 2mm | 15 |  | <i>Feng et al.</i> | 3mm | 21 |  |
| <i>Hontanilla et al.</i> | 2mm | Capture séparée : 17 en haut et 21 en bas. |  | | | | |

Comparativement aux données de la littérature, notre protocole d’analyse des mouvements de la mimique faciale présente donc de bonnes performances techniques. Les études de Sforza [92], Jorge [67] et Feng [68] présentent les spécifications techniques les plus proches.

Par ailleurs, nous remarquons également que le choix du point fixe, est variable selon les auteurs. Dans notre protocole, nous avons fait le choix de fixer des marqueurs à l’aide d’une gouttière maxillaire. Ce choix était contraignant pour le sujet et aussi sur le plan technique mais il nous permettait d’obtenir une référence aussi fiable qu’un repère osseux. Seule Trotman [64,93] a eu recours à la même méthode.

Les autres auteurs ont utilisé des repères anatomiques réputés peu mobiles. Or, nos mesures ont montré que seule une zone située au niveau de l'os nasal présentait un faible déplacement.

Hontanilla [66] et Jorge [67] ont quant à eux utilisé la position de repos comme référence. Ce choix peut-être une source importante d'erreur avec les mouvements de la tête ou du corps.

Par ailleurs, l'ensemble des auteurs ont étudié des déplacements (mm). Certains, ont réalisé des mesures d'aire entre les marqueurs. Cette approche ne nous semble pas pertinente dans le cadre d'une évaluation tridimensionnelle de la mimique.

4.4.2. Choix et densité des marqueurs

En ce qui concerne le choix des marqueurs, le Tableau LIV décrit la taille, le nombre et la position des marqueurs chez les différents auteurs. L'originalité de notre travail est double : nous avons utilisé des marqueurs d'un diamètre de 1,5mm et un nombre total de 111 marqueurs placés sur la face.

L'intérêt des marqueurs de faible diamètre est de ne pas interférer dans le mouvement. L'inconvénient principal est que cela rend sa détection plus difficile par les caméras. Nous avons rencontré d'ailleurs ce problème pour les marqueurs des paupières (cf. supra).

Le grand nombre de marqueur permet l'exhaustivité des mesures, avec une telle quantité de données nous sommes capables de fournir des informations de déplacement d'une haute densité : environ un marqueur tous les 1,5mm. L'inconvénient étant bien-sûr la lourdeur du protocole et le traitement des données qui s'en retrouve rallongé.

4.4.3. Données obtenues à partir de la population de référence

Parmi les auteurs ayant réalisés des études avec une technologie similaire, seul Sforza et al. [94,95] fournissent des données comparables à nos mesures (Tableau LV).

Les données que nous avons en commun avec l'étude Sforza sont :

- Les mouvements de sourire volontaire et de fermeture forcée des paupières.
- 17 marqueurs placés à des endroits similaires.
- La population d'étude est constituée d'hommes et de femmes âgés de 20 à 30ans.

Le Tableau LVI compare les amplitudes de déplacements entre nos deux études. Nous avons pu constater qu'il n'y a pas de différence significative pour les mesures réalisées sur le sourire volontaire. Cela confirme la cohérence de nos résultats.

En revanche, nous avons observé une différence pour le mouvement de fermeture forcée des paupières. Le détail des déplacements montre que Sforza mesure des déplacements beaucoup plus importants au niveau de la bouche. Cette différence peut s'expliquer soit par une consigne différente pour la réalisation du mouvement, soit par une mauvaise fiabilité des points fixes anatomiques. En effet, Sforza a défini un point fixe au niveau des tragus, or nous avons enregistré dans notre protocole un déplacement du pavillon de l'oreille de l'ordre de 0,7mm, ce qui pourrait être une source d'erreur.

Ces résultats nous confirment l'importance de disposer d'un référentiel fixe fiable, sans cela la pertinence des résultats peut être mise en doute. Le choix de la gouttière, plus contraignante, a l'avantage d'être plus fiable que des marqueurs placés sur les tissus mous de la face.

Tableau LV : Mouvements étudiés lors de différents protocoles d'analyse des mouvements de la face.

| Auteurs | Mouvements analysés | Mesures réalisées |
|--------------------------|--|---|
| <i>Trotman et al.</i> | Sourire maximal, protrusion labiale, grimace, gonfler les joues, fermeture et ouverture des yeux | Distance entre deux marqueurs symétriques |
| <i>Frey et al.</i> | Élévation maximale des sourcils, fermeture simple des paupières, remuer le nez, sourire découvrant les dents, abaissement maximal des commissures labiales, protrusion labiale, des mouvements unilatéraux et un sourire lèvres fermées. | Pourcentage de la distance maximale pour chacun des points fixes. |
| <i>Green et al.</i> | Mouvements spontanés chez des nourrissons de 1 à 12 mois. | Distance du référentiel fixe |
| <i>Hontanilla et al.</i> | Sourire, protrusion labiale, fermeture des paupières et élévation du front. | Pas de mesure de référence, le patient est son propre témoin |
| <i>Jorge et al.</i> | Sourire, élévation du front, fermeture des paupières, froncement des sourcils. | Déplacement relatif dans un seul axe (Z). |
| <i>Sforza et al.</i> | Sourire maximal, sourire spontané, mouvements de surprise avec la bouche ouverte et fermée, fermeture maximale des paupières. | Déplacement maximal, mobilité totale et asymétrie (%) |
| <i>Feng et al.</i> | Élévation maximale des sourcils, fermeture simple des paupières, fermeture forcée des paupières, froncement des sourcils, sourire découvrant les dents, protrusion labiale. | Étude préliminaire : mesures uniquement statiques. |

Tableau LVI : comparaison des amplitudes de déplacement pour les marqueurs communs entre les protocoles de Sforza et al. et notre travail de recherche.

| Marqueurs | | Sourire volontaire (mm) | | | Fermeture maximale des paupières (mm) | | |
|----------------------|----------------------|--------------------------------|----------------------|--------------------------------|--|----------------------|--------------------------------|
| <i>Sforza et al.</i> | <i>Sarhan et al.</i> | <i>Sforza et al.</i> | <i>Sarhan et al.</i> | p-value (Wilcoxon signed rank) | <i>Sforza et al.</i> | <i>Sarhan et al.</i> | p-value (Wilcoxon signed rank) |
| Tr | F4 | 1,7 | 0,3 | p = 0,286 | 3,0 | 3,1 | p = 0,011 |
| N | G0 | 1,9 | 0,3 | | 4,4 | 3,0 | |
| Sci (x2) | S4 / S7 | 1,9/1,9 | 0,6/0,6 | | 7,1/7,5 | 6,6/6,8 | |
| Ex (x2) | Ca01/Ca04 | 2,3/2,4 | 2,9/2,7 | | 8,5/8,8 | 9,4/9,9 | |
| Or (x2) | VI2/VI5 | 3,0/2,9 | 5,3/5,3 | | 8,7/9,3 | 6,1/6,5 | |
| Ac (x2) | Pln4/Pln10 | 3,8/4,4 | 6,0/5,8 | | 4,5/4,9 | 2,6/2,5 | |
| Prn | D3 | 2,6 | 1,0 | | 2,3 | 0,7 | |
| Ch (x2) | C01/C02 | 11,5/11,8 | 14,0/13,6 | | 3,6/3,9 | 0,9/0,2 | |
| Li (x2) | Cmi1/Cmi5 | 7,6/7,1 | 8,5/8,5 | | 2,7/2,9 | 0,5/0,6 | |
| Sl | Cmi3 | 4,0 | 6,8 | | 2,2 | 0,7 | |
| Pg | M0 | 4,0 | 5,4 | | 2,4 | 1,0 | |

Concernant les mesures de reproductibilité, Trotman [96] décrit dans ses mesures des écart-types très importants ($CV > 2$). Les raisons invoquées sont les variations anatomiques interindividuelles (largeur et forme du visage, sexe, et âge). Cependant, Trotman et Feng [68] aboutissent au même constat que nous : malgré la variabilité des amplitudes, le modèle de déplacement reste identique.

Green et al [65] ont obtenu des coefficients de variation compris entre 1,6 et 2,5, ce qui est très élevé. Sforza [94] a quant à elle considéré que l'écart type moyen était infra-millimétrique (ce qui est également le cas de nos mesures), et donc négligeable pour la mesure.

L'ensemble des auteurs ont donc constaté une variabilité importante des mesures d'amplitudes. Cependant, celle-ci est à mettre en rapport avec les très faibles amplitudes de déplacement de certains marqueurs. Ainsi, même élevés, les écart-types sont généralement infra-millimétriques. Comparés aux amplitudes seuils calculées dans les mesures de sensibilité et de spécificité, qui sont de l'ordre du centimètre, la variation est alors faible.

4.4.4. Cahier des charges de l'analyse quantifiée de la mimique

Dans une revue de littérature [97], Dulguerov et al. ont défini neufs critères que devraient satisfaire la méthode idéale d'analyse quantifiée des mouvements de la face :

- 1) *Ne pas entraver les mouvements de la face et donc ne pas toucher la face durant la réalisation du mouvement.*

Ce protocole de mesure répond bien à cette exigence. Le sujet est libre de réaliser ses mouvements, et la petitesse des marqueurs les rend imperceptibles.

- 2) *Être reproductible pour un individu donné, que ce soit chez le sujet sain ou pathologique.*

Nos données ne portent pas sur les sujets pathologiques. En ce qui concerne les sujets sains, nous avons pu observer des coefficients de variation importants. Cependant, ceux-ci sont à mettre en rapport avec la grande précision de mesure. De plus, les mesures de sensibilité et de spécificité nous ont fourni des valeurs seuil permettant de détecter le mouvement. Ces valeurs sont bien supérieures aux écarts-types mesurés. Par ailleurs, nous avons démontré une très forte corrélation entre nos mesures successives, ce qui indique un profil de déplacement reproductible.

- 3) *Fournir des données synchronisées entre les côtés droit et gauche de la face pour la comparaison.*

Le champ de capture nous a permis de couvrir l'intégralité de la face. La capture en 3D permet de suivre les déplacements de la face de chaque côté de façon synchrone.

- 4) *Fournir des mesures sans toucher la face.*

Les mesures de motion capture sont réalisées à l'aide d'un rayonnement infrarouge. Il n'y a donc aucun contact avec la face lors de la prise de mesure.

- 5) *Fournir des mesures absolues (millimètres), pas seulement des pourcentages.*

L'analyse quantifiée des mouvements de la mimique nous a fourni des données quantitatives, sous forme de déplacements relatifs au dixième de millimètre près.

- 6) *Permettre une mesure ne requérant pas une intervention de l'observateur, évitant les erreurs de manipulation et les biais.*

La mesure est réalisée informatiquement, après la capture du mouvement. À titre expérimental, un certain nombre de manipulations informatiques (labélisation, calculs...) ont été réalisées. Cette

intervention manuelle peut être une source d'erreur. Cependant, il est possible, dans un protocole consolidé, d'automatiser la plupart des tâches aboutissant à des mesures directement exploitables par le clinicien.

7) *Être rapide.*

La préparation du sujet prenait une vingtaine de minutes, le temps de capture dépend du nombre de mouvements demandés. Nous pouvons ainsi considérer qu'il faudrait entre 45 minutes à une heure pour réaliser cet examen sur un patient. À titre de comparaison, un IRM prend 15 à 45 minutes selon la zone étudiée, un EMG de 30 minutes à 1 heure selon le nombre de muscles étudiés.

8) *Être bien toléré par les patients.*

Une fois posés sur la face, les marqueurs sont imperceptibles par le sujet. Les éléments les plus gênants pour les patients sont la confection du masque et le port de la gouttière. Dans de prochain développement, il est tout à fait envisageable de se passer de ces deux éléments :

- Par l'impression 3D du masque. Cela permettra d'éviter les étapes de moulage et de fabrication.
- Par la substitution de la gouttière par des repères anatomiques.
- Par l'évolution vers une technologie sans marqueurs.

9) *Pouvoir être archivé pour des comparaisons ultérieures, des évaluations par d'autres examinateurs ou lors d'études futures.*

Comme toute mesure numérique, toutes les données relatives à l'examen sont enregistrées et exportables dans des formats libres (fichiers texte « .csv »).

En conclusion, à la lumière de la littérature, nous pouvons constater que le protocole mis en place dans cette thèse est original de par la performance technique et la quantité d'informations obtenues.

Quelques auteurs se sont intéressés à l'analyse tridimensionnelle de la mimique. Nous pouvons constater de similarités dans les mouvements étudiés mais les modalités de capture et de mesure sont différentes et rendent ces études peu comparables.

Les points d'importance assurant la comparabilité des données sont :

- ***Le choix des points fixes de référence, qui doivent être immobiles au risque de fausser les résultats.***
- ***Le choix des mouvements demandés, qui doivent être facilement compréhensibles et reproductibles pour un sujet.***

En ce qui concerne nos travaux, le cahier des charges d'un outil d'évaluation de la mimique faciale, transférable à la clinique, semble être satisfaisant.

4.5. Limitations et perspectives

4.5.1. Résultats et apport de notre travail

Au terme de ce travail, nous avons développé et mis en œuvre un protocole d'analyse quantifiée de la mimique faciale. Ce protocole a été évalué en termes de faisabilité et de fiabilité.

Nous avons également analysé des mouvements faciaux, évalué leur reproductibilité, défini des modèles de déplacement et identifié des sets de marqueurs caractéristiques d'un mouvement, d'une zone topographique ou d'une amplitude de déplacement.

Enfin, il a été possible d'identifier de manière inédite des marqueurs emblématiques d'un mouvement, en définissant une amplitude seuil, une sensibilité et une spécificité.

4.5.2. Limites

Cette étude a été réalisée sur une population âgée de 20 à 30 ans. En effet, le vieillissement cutané entraîne une modification de la trophicité et de la forme de la face ; inégal selon les sujets [83,98]. Étant admis que les sujets de moins de 30 ans sont peu touchés par ce vieillissement, il était logique que celle-ci soit retenue comme population de référence. La problématique de la comparabilité de ces mesures avec des sujets plus âgés se pose. Il sera donc nécessaire de poursuivre les mesures sur d'autres tranches d'âge. De la même manière, il serait tout aussi pertinent d'explorer les mouvements de sujets plus jeunes, à différents stades de leur croissance.

Les mesures de reproductibilité ont montré une certaine variabilité des mesures. Cette variabilité est à relativiser compte tenu de l'ordre de leur ordre de grandeur (infra-millimétrique), et la variation interindividuelle qui est logique. Néanmoins, nous ne disposons pas dans cette étude de suffisamment de mesures successives sur un même sujet permettant de calculer une variation intra-individuelle fiable. Il sera donc nécessaire de procéder à ces mesures afin de confirmer la fiabilité d'une mesure de suivi longitudinale.

L'analyse que nous avons réalisée a été basée sur des mesures d'amplitudes moyennes ou maximales. Ces mesures ont l'avantage de fournir des indicateurs quantitatifs rapidement interprétables par tous. Ainsi, il est donc possible de mesurer une absence ou diminution de mobilité, la présence de mouvements anormaux, ou d'une asymétrie. Cependant, ces données d'amplitude nous privent de l'analyse spatio-temporelle du mouvement facial. Cette analyse nous permettrait de définir des normes concernant l'aspect de la contraction (temps et vitesse de contraction, de relaxation...). Les données spatio-temporelles nous permettraient donc d'analyser la qualité du mouvement facial. À cette fin, nous disposons déjà des données, il s'agirait de réaliser les calculs nécessaires à l'établissements de courbes moyennes.

4.5.3. Perspectives

La finalité de l'Analyse Quantifiée des Mouvements de la Face (AQMF) est naturellement sa mise en œuvre au service des patients et des soignants. Nos résultats nous permettent de confirmer le potentiel clinique de cette technique.

Ainsi, dans la continuité de ces travaux, nous souhaitons amener cette technologie au sein de l'environnement clinique et permettre le développement d'une plateforme de haute technologie d'analyse faciale. Ces projets pourront notamment se concrétiser dans le service de chirurgie

maxillo-faciale du CHU d'Amiens et au sein de la « Fédération Hospitalière Universitaire (FHU) SURFACE ».

Parmi les perspectives d'application cliniques nous pourrions évoquer :

- **Des applications de diagnostic.** L'AQMF permettrait d'objectiver les diagnostics de paralysie faciale, de localiser précisément un déficit et de détecter des mouvements anormaux ou spasmes (syncinésies).
- **Des applications de suivi.** L'AQMF permettrait, dans un contexte clinique de quantifier la récupération motrice et d'évaluer des séquelles pour optimiser la prise en charge du patient. Elle permettrait également d'apprécier les résultats d'un traitement esthétique.
- **Des applications de traitement.** L'AQMF permettrait de développer des outils rééducatifs (biofeedback, serious game...). Elle permettrait également de cibler la prise en charge thérapeutique : choix des sites d'injection de toxine botulinique, aide au choix d'une chirurgie palliative ou de réhabilitation.
- **Des applications de recherche.** L'AQMF permettrait, dans un contexte de pratique basée sur les preuves (*Evidence Based Practice*), d'évaluer les traitements et de faire progresser la prise en charge des patients. Elle permettrait également de suivre les innovations thérapeutiques (allotransplantation faciale), et de valider des traitements rééducatifs pour lesquels le niveau de preuve est aujourd'hui insuffisant [99,100]. L'AQMF permettrait de faire progresser la recherche en biomécanique des tissus, pour étudier notamment le comportement des tissus mous de la face, leur vieillissement et de créer des modèles biomécaniques de la face.

Conclusion

Dans ce travail, nous avons établi qu'il existait de nombreuses méthodes d'analyse clinique des mouvements de la face. Parmi ces méthodes, peu permettent de réaliser des mesures quantitatives, fiables et reproductibles.

Il existe diverses méthodes d'analyse quantifiée du mouvement, mais aucune ne s'est jusqu'alors imposée comme outil clinique d'analyse de la mimique. La pertinence de la motion capture comme un outil de diagnostic et de suivi des affections motrices de la face a été évaluée.

Dans ce but, un protocole de capture des mouvements de la face a été mis au point. Il définit l'emplacement de marqueurs sur la face, permet leur fixation et leur placement reproductible, définit les mouvements étudiés, et décrit les méthodes de traitements des données obtenues.

L'exploitation des données a permis de quantifier un mouvement par des déplacements relatifs de marqueurs, en millimètres. Nous avons défini des normes de déplacement pour une population de référence (20 à 30 ans), avec pour chacun des mouvements, des zones mobiles et non mobiles. Nous avons également identifié les marqueurs emblématiques de chacun des mouvements étudiés, permettant ainsi d'automatiser leur reconnaissance.

L'analyse des données permet donc de répondre à la problématique. La motion capture est une technique fiable et précise. Dans cette étude, elle permet de quantifier les mouvements de la face à 0,1 mm près. Les mouvements répétés présentent une excellente corrélation entre eux, ils sont donc reproductibles. Par ailleurs, l'analyse d'une grande densité de marqueurs placés sur la face permet d'obtenir des informations à la fois analytiques (zone précise), régionales (hémiface...), et globales (quantité de mouvement totale). Ces résultats présentent un intérêt tout particulier en clinique pour la quantification d'un déficit moteur, d'une hypertonie ou d'une syncinésie.

La preuve est apportée qu'il est possible de quantifier de manière fiable et robuste la mimique par la technologie de motion capture.

Le prochain enjeu, sera de mettre en œuvre ce protocole sur une cohorte de patient, afin de valider l'apport de l'analyse quantifiée des mouvements de la mimique (AQMF) dans le suivi des atteintes de la motricité faciale. Cette étape finale permettra d'achever le transfert de technologie du laboratoire vers la clinique.

Références bibliographiques

- [1] Delaporte F, Fournier E, Devauchelle B, editors. La fabrique du visage. De la physiognomonie antique à la première greffe. Turnhout: Brepols Publishers; 2010. doi:10.1484/M.DDA-EB.5.106697.
- [2] Netter FH. Atlas d'anatomie humaine. Elsevier Masson; 2011.
- [3] Gouriet A, Muscolino JE, Pillu M, Co JS&. Les muscles : actions et palpation. Elsevier Masson; 2013.
- [4] Taillia H, de Greslan T, Renard J-L, Flocard F. Examen neurologique facial à l'usage de l'odontologiste et du chirurgien maxillofacial. EMC - Dentisterie 2004;1:131–46. doi:10.1016/j.emcden.2003.12.004.
- [5] Fang F, Clapham PJ, Chung KC. A Systematic Review of Inter-ethnic Variability in Facial Dimensions. *Plast Reconstr Surg* 2011;127:874–81. doi:10.1097/PRS.0b013e318200afdb.
- [6] Alix T, Carluet L, Bénateau H, Labbé D. Lip kinetic disorders. *Ann Chir Plast Esthet* 2002;47:390–401. doi:10.1016/S0294-1260(02)00149-8.
- [7] Zandian A, Osiro S, Hudson R, Ali IM, Matusz P, Tubbs SR, et al. The neurologist's dilemma: A comprehensive clinical review of Bell's palsy, with emphasis on current management trends. *Med Sci Monit* 2014;20:83–90. doi:10.12659/MSM.889876.
- [8] Tankéré F, Bernat I. Paralyse faciale a frigore : de l'étiologie virale à la réalité diagnostique. *La Revue de Médecine Interne* 2009;30:769–75. doi:10.1016/j.revmed.2008.12.006.
- [9] Gatignol P, Lannadere É. Chapitre 31 - Rééducation des séquelles des paralysies faciales. In: Bessède J-P, editor. *Chirurgie Plastique Réparatrice De la Face et du Cou - Volume 1*, Paris: Elsevier Masson; 2011, p. 353–63. doi:10.1016/B978-2-294-71189-3.00031-8.
- [10] Pons Y, Ukkola-Pons E, Ballivet de Régloix S, Champagne C, Raynal M, Lepage P, et al. La paralysie faciale périphérique. *Journal Français d'Ophtalmologie* 2013;36:548–53. doi:10.1016/j.jfo.2013.02.001.
- [11] Salort-Campana E, Nguyen K, Lévy N, Pouget J, Attarian S. Diagnostic clinique et moléculaire de la myopathie facioscapulo-humérale de type 1 (FSHD1) en 2012. *Revue Neurologique* 2013;169:573–82. doi:10.1016/j.neurol.2013.07.001.
- [12] Attwood T. *Le syndrome d'Asperger et l'autisme de haut niveau*. Dunod; 2003.
- [13] Ekman P, Friesen WV. Measuring facial movement. *J Nonverbal Behav* 1976;1:56–75. doi:10.1007/BF01115465.
- [14] Ekman P, Friesen WV. *Facial Action Coding System*. Consulting Psychologists Press. 1978.
- [15] Visage Technologies AB. MPEG-4 Face and Body Animation (MPEG-4 FBA) An overview n.d.
- [16] Lavagetto F, Pockaj R. The facial animation engine: toward a high-level interface for the design of MPEG-4 compliant animated faces. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* 1999;9:277–89. doi:10.1109/76.752095.
- [17] Izard CE. *The Maximally Discriminative Facial Movement Coding System* 1995.
- [18] Izard CE, Dougherty LM, Hembree EA. *A System for Identifying Affect Expressions (Affex)* 1980.
- [19] House JW. Facial nerve grading systems. *The Laryngoscope* 1983;93:1056–69. doi:10.1288/00005537-198308000-00016.
- [20] Botman JW, Jongkees LB. The result of intratemporal treatment of facial palsy. *Pract Otorhinolaryngol (Basel)* 1955;17:80–100.
- [21] Peitersen E. The natural history of Bell's palsy. *Am J Otol* 1982;4:107–11.
- [22] May M, Blumenthal F, Taylor FH. Bell's palsy: surgery based upon prognostic indicators and results. *Laryngoscope* 1981;91:2092–103.

- [23] Lazarini P, Mitre E, Takatu E, Tidei R. Graphic-visual adaptation of House–Brackmann facial nerve grading for peripheral facial palsy. *Clinical Otolaryngology* 2006;31:192–7. doi:10.1111/j.1749-4486.2006.01197.x.
- [24] Adour KK, Swanson PJ. Facial paralysis in 403 consecutive patients: emphasis on treatment response in patients with Bell's palsy. *Trans Am Acad Ophthalmol Otolaryngol* 1971;75:1284–301.
- [25] Yanagihara N. Grading of facial palsy. *Facial Nerve Surgery*. Birmingham: Aesculapius; 1977.
- [27] Rickenmann J, Jaquenod C, Cerenko D, Fisch U. Comparative value of facial nerve grading systems. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery* 1997;117:322–5. doi:10.1016/S0194-5998(97)70120-7.
- [5] Ross BG, Fradet G, Nedzelski JM. Development of a sensitive clinical facial grading system. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery* 1996;114:380–6. doi:10.1016/S0194-5998(96)70206-1.
- [28] Coulson S, Croxson G. Assessing physiotherapy rehabilitation outcomes following facial nerve paralysis 1995;2(1):20-4.
- [29] Coulson SE, Croxson GR, Adams RD, O'Dwyer NJ. Reliability of the “Sydney,” “Sunnybrook,” and “House Brackmann” facial grading systems to assess voluntary movement and synkinesis after facial nerve paralysis. *Otolaryngol Head Neck Surg* 2005;132:543–9. doi:10.1016/j.otohns.2005.01.027.
- [30] Fattah AY, Gurusinge ADR, Gavilan J, Hadlock TA, Marcus JR, Marres H, et al. Facial nerve grading instruments: systematic review of the literature and suggestion for uniformity. *Plast Reconstr Surg* 2015;135:569–79. doi:10.1097/PRS.0000000000000905.
- [31] VanSwearingen JM, Brach JS. The Facial Disability Index: Reliability and Validity of a Disability Assessment Instrument for Disorders of the Facial Neuromuscular System. *PHYS THER* 1996;76:1288–98.
- [32] Compston A. Aids to the Investigation of Peripheral Nerve Injuries. Medical Research Council: Nerve Injuries Research Committee. His Majesty's Stationery Office: 1942; pp. 48 (iii) and 74 figures and 7 diagrams; with Aids to the Examination of the Peripheral Nervous System. By Michael O'Brien for the Guarantors of Brain. Saunders Elsevier: 2010; pp. [8] 64 and 94 Figures. *Brain* 2010;133:2838–44. doi:10.1093/brain/awq270.
- [33] Aitkens S, Lord J, Bernauer E, Fowler WM, Lieberman JS, Berck P. Relationship of manual muscle testing to objective strength measurements. *Muscle Nerve* 1989;12:173–7. doi:10.1002/mus.880120302.
- [34] Personius KE, Pandya S, King WM, Tawil R, McDermott MP. Facioscapulohumeral Dystrophy Natural History Study: Standardization of Testing Procedures and Reliability of Measurements. *PHYS THER* 1994;74:253–63.
- [35] Hogrel JY, Ollivier G, Desnuelle C. Testing musculaire manuel et quantifié dans les maladies neuromusculaires. Comment assurer la qualité des mesures de force dans les protocoles cliniques? *Revue Neurologique* 2006;162:427–36. doi:10.1016/S0035-3787(06)75033-0.
- [36] Lacôte M, Chevalier A-M. Évaluation clinique de la fonction musculaire. Maloine; 2008.
- [37] Hislop H, Montgomery J. Le bilan musculaire de Daniels et Worthingham: Techniques de testing manuel. Elsevier Masson; 2011.
- [38] Kendall FP, Provance PG. *Muscles, Testing and Function: With Posture and Pain*. Lippincott Williams & Wilkins; 1993.
- [39] Freyss G, Haguët JF, Danon J, Burgeat-Menguy. [Attempted evaluation of esthetic damage in facial paralysis by clinical examination and testing]. *Ann Otolaryngol Chir Cervicofac* 1971;88:654–62.
- [40] MBLF Adultes n.d. <http://adeprio.com/eurl/produit/mblf-adultes/> (accessed March 1, 2017).

- [41] Stennert E, Limberg CH, Frentrup KP. [An index for paresis and defective healing--an easily applied method for objectively determining therapeutic results in facial paresis (author's transl)]. *HNO* 1977;25:238–45.
- [42] Burres S, Fisch U. The comparison of facial grading systems. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg* 1986;112:755–8.
- [43] Murty GE, Diver JP, Kelly PJ, O'Donoghue GM, Bradley PJ. The Nottingham System: objective assessment of facial nerve function in the clinic. *Otolaryngol Head Neck Surg* 1994;110:156–61.
- [44] Fields MJ, Peckitt NS. Facial nerve function index: A clinical measurement of facial nerve activity in patients with facial nerve palsies. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology* 1990;69:681–2. doi:10.1016/0030-4220(90)90347-U.
- [45] Peckitt NS, Walker RV, Barker GR. The facial nerve function coefficient: Analysis of 100 normal subjects. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery* 1992;50:338–9. doi:10.1016/0278-2391(92)90392-D.
- [46] Gatignol P, Lannadere E, Tankéré F, Lamas G. Intensité d'une paralysie faciale périphérique avec le dynamomètre. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine* 2011;54:e245. doi:10.1016/j.rehab.2011.07.282.
- [47] Frey M, Jenny A, Giovanoli P, Stüssi E. Development of a new documentation system for facial movements as a basis for the international registry for neuromuscular reconstruction in the face. *Plast Reconstr Surg* 1994;93:1334–49.
- [48] Manktelow RT, Zuker RM, Tomat LR. Facial paralysis measurement with a handheld ruler. *Plast Reconstr Surg* 2008;121:435–42. doi:10.1097/01.prs.0000297648.90717.bd.
- [49] Johnson PC, Brown H, Kuzon WM, Balliet R, Garrison JL, Campbell J. Simultaneous quantitation of facial movements: the maximal static response assay of facial nerve function. *Ann Plast Surg* 1994;32:171–9.
- [50] D Wang TVP. [Normal and pathological facial mimicry: objective analysis]. *Schweizerische Medizinische Wochenschrift Supplementum* 2000;116:101S–103S.
- [51] Tomat LR, Manktelow RT. Evaluation of a New Measurement Tool for Facial Paralysis Reconstruction. *Plastic & Reconstructive Surgery* March 2005 2005;115:696–704. doi:10.1097/01.PRS.0000152431.55774.7E.
- [52] Neely JGMD, Cheung JYPD, Wood MMD, Byers JMD, Rogerson AMD. Computerized quantitative dynamic analysis of facial motion in the paralyzed and synkinetic face. *Journal of Otolaryngology* March 1992 1992;13:97–107.
- [53] Wood DA, Hughes GB, Secic M, Good TL. Objective measurement of normal facial movement with video microscaling. *Am J Otol* 1994;15:61–5.
- [57] Isono M, Murata K, Tanaka H, Kawamoto M, Azuma H. An objective evaluation method for facial mimic motion. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery* 1996;114:27–31. doi:10.1016/S0194-5998(96)70279-6.
- [59] Meier-Gallati V, Scriba H, Fisch U. Objective scaling of facial nerve function based on area analysis (OSCAR). *Otolaryngology - Head and Neck Surgery* 1998;118:545–50. doi:10.1016/S0194-5998(98)70216-5.
- [56] Linstrom CJ. Objective facial motion analysis in patients with facial nerve dysfunction. *Laryngoscope* 2002;112:1129–47. doi:10.1097/00005537-200207000-00001.
- [57] Gross MM, Trotman C-A, Moffatt KS. A comparison of three-dimensional and two-dimensional analyses of facial motion. *The Angle Orthodontist* 2009. <http://www.angle.org/doi/abs/10.1043/0003-3219%281996%29066%3C0189%3AACOTDA%3E2.3.CO%3B2> (accessed March 20, 2014).

- [58] Frey M, Giovanoli P, Gerber H, Slameczka M, Stüssi E. Three-dimensional video analysis of facial movements: a new method to assess the quantity and quality of the smile. *Plast Reconstr Surg* 1999;104:2032–9.
- [62] Yuen K, Inokuchi I, Maeta M, Kawakami S-I, Masuda Y. Evaluation of facial palsy by moiré topography index. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery* 1997;117:567–72. doi:10.1016/S0194-5998(97)70032-9.
- [60] Mishima K, Yamada T, Ohura A, Sugahara T. Production of a range image for facial motion analysis: A method for analyzing lip motion. *Computerized Medical Imaging and Graphics* 2006;30:53–9. doi:10.1016/j.compmedimag.2005.11.002.
- [61] Dynamic Surface Motion Capture (4D) n.d. <http://www.3dmd.com/4d/>.
- [62] Popat H, Henley E, Richmond S, Benedikt L, Marshall D, Rosin PL. A comparison of the reproducibility of verbal and nonverbal facial gestures using three-dimensional motion analysis. *Otolaryngology -- Head and Neck Surgery* 2010;142:867–72. doi:10.1016/j.otohns.2010.03.003.
- [63] Dawes KS, Kelly SW. An instrument for the non-invasive assessment of lip function during speech. *Med Eng Phys* 2005;27:523–35. doi:10.1016/j.medengphy.2004.11.007.
- [64] Trotman CA, Faraway JJ, Silvester KT, Greenlee GM, Johnston LE. Sensitivity of a method for the analysis of facial mobility. I. Vector of displacement. *Cleft Palate Craniofac J* 1998;35:132–41. doi:10.1597/1545-1569(1998)035<0132:SOAMFT>2.3.CO;2.
- [65] Green JR, Wilson EM. Spontaneous Facial Motility in Infancy: A 3D Kinematic Analysis. *Dev Psychobiol* 2006;48:16–28. doi:10.1002/dev.20112.
- [66] Hontanilla B, Aubá C. Automatic three-dimensional quantitative analysis for evaluation of facial movement. *Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery* 2008;61:18–30. doi:10.1016/j.bjps.2007.03.037.
- [67] Jarjura Jorge J, Pialarissi PR, Borges GC, Squella SAF, Gouveia M de F de, Jr S, et al. Objective computerized evaluation of normal patterns of facial muscles contraction. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology* 2012;78:41–51. doi:10.1590/S1808-86942012000200008.
- [68] Feng G, Zhao Y, Tian X, Gao Z. A New 3-Dimensional Dynamic Quantitative Analysis System of Facial Motion: An Establishment and Reliability Test. *PLoS ONE* 2014;9:e113115. doi:10.1371/journal.pone.0113115.
- [69] Stricker M, Simon E, Coffinet L, Sellal S, Duroure F. Paralyse faciale. *EMC - Dentisterie* 2004;1:382–416. doi:10.1016/j.emcnden.2004.07.001.
- [70] Hashi S, Toyoda M, Ohya M, Okazaki Y, Yabukami S, Ishiyama K, et al. Magnetic motion capture system using LC resonant magnetic marker composed of Ni–Zn ferrite core. *Journal of Applied Physics* 2006;99:08B312. doi:10.1063/1.2171927.
- [71] Menache A. *Understanding Motion Capture for Computer Animation and Video Games*. Morgan Kaufmann; 2000.
- [72] Thalmann NM, Cazedevais A, Thalmann D. Modelling Facial Communication between an Animator and a Synthetic Actor in Real Time. in Real Time,” in *Modeling in Computer Graphics*, Falcidieno B and Kunii T.L., Eds, Springer; 1993, p. 387–396.
- [73] Fasel B, Luetin J. Automatic facial expression analysis: a survey. *Pattern Recognition* 2003;36:259–75. doi:10.1016/S0031-3203(02)00052-3.
- [74] Popat H, Richmond S, Benedikt L, Marshall D, Rosin PL. Quantitative analysis of facial movement—A review of three-dimensional imaging techniques. *Computerized Medical Imaging and Graphics* 2009;33:377–83. doi:10.1016/j.compmedimag.2009.03.003.
- [75] Chen L, Wei H, Ferryman J. A survey of human motion analysis using depth imagery. *Pattern Recognition Letters* 2013;34:1995–2006. doi:10.1016/j.patrec.2013.02.006.
- [76] Samper S, Favrelière H, Vacher P, Coudert T. 3D measurement and synthesis of facial expressions. *Symposium on 3D Analysis of Human Movement*, 2006.

- [77] Rurainsky J, Eisert P. Mirror-Based Multi-View Analysis of Facial Motions. *IEEE International Conference on Image Processing*, 2007. ICIP 2007, vol. 3, 2007, p. III-73-III-76. doi:10.1109/ICIP.2007.4379249.
- [78] Bradley D, Heidrich W, Popa T, Sheffer A. High Resolution Passive Facial Performance Capture. *ACM SIGGRAPH 2010 Papers*, New York, NY, USA: ACM; 2010, p. 41:1–41:10. doi:10.1145/1833349.1778778.
- [79] Na K, Jung M. Hierarchical Retargetting of Fine Facial Motions. *Computer Graphics Forum* 2004;23:687–695. doi:10.1111/j.1467-8659.2004.00801.x.
- [80] Foix S, Alenya G, Torras C. Lock-in Time-of-Flight (ToF) Cameras: A Survey. *IEEE Sensors Journal* 2011;11:1917–26. doi:10.1109/JSEN.2010.2101060.
- [81] Brunet F. Contributions to Parametric Image Registration and 3D Surface Reconstruction. Université d’Auvergne, 2010.
- [82] Windolf M, Götzen N, Morlock M. Systematic accuracy and precision analysis of video motion capturing systems—exemplified on the Vicon-460 system. *Journal of Biomechanics* 2008;41:2776–80. doi:10.1016/j.jbiomech.2008.06.024.
- [83] Luebberding S, Krueger N, Kerscher M. Quantification of age-related facial wrinkles in men and women using a three-dimensional fringe projection method and validated assessment scales. *Dermatol Surg* 2014;40:22–32. doi:10.1111/dsu.12377.
- [84] Edward L, Dakpe S, Feissel P, Devauchelle B, Marin F. Quantification of facial movements by motion capture. *Comput Methods Biomech Biomed Engin* 2012;15:259–60. doi:10.1080/10255842.2012.713706.
- [85] Notation for the Mixed Model:: SAS/STAT(R) 12.1 User’s Guide n.d. http://support.sas.com/documentation/cdl/en/statug/65328/HTML/default/viewer.htm#statug_mixed_toc.htm (accessed March 4, 2017).
- [86] Dakpé S. Etude biomécanique de la mimique faciale. Université de technologie de Compiègne, 2015.
- [87] Lê S, Josse J, Husson F, others. FactoMineR: An R package for multivariate analysis. *Journal of Statistical Software* 2008;25:1–18.
- [88] Attia J. Moving beyond sensitivity and specificity: using likelihood ratios to help interpret diagnostic tests. NPS MedicineWise n.d. <http://www.nps.org.au/australian-prescriber/articles/moving-beyond-sensitivity-and-specificity-using-likelihood-ratios-to-help-interpret-diagnostic-tests> (accessed March 8, 2017).
- [89] Davidson M. The interpretation of diagnostic test: a primer for physiotherapists. *Aust J Physiother* 2002;48:227–32.
- [90] Fehrenbach MJ, Herring SW. *Illustrated Anatomy of the Head and Neck*. Elsevier Health Sciences; 2015.
- [91] Bashour M. History and Current Concepts in the Analysis of Facial Attractiveness: Plastic and Reconstructive Surgery 2006;118:741–56. doi:10.1097/01.prs.0000233051.61512.65.
- [92] Sforza C, Frigerio A, Mapelli A, Mandelli F, Sidequersky FV, Colombo V, et al. Facial movement before and after masseteric-facial nerves anastomosis: A three-dimensional optoelectronic pilot study. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery* 2012;40:473–9. doi:10.1016/j.jcms.2011.07.004.
- [93] Trotman C-A, Stohler CS, Johnston LE. Measurement of Facial Soft Tissue Mobility in Man. *The Cleft Palate-Craniofacial Journal* 1998;35:16–25. doi:10.1597/1545-1569(1998)035<0016:MOFSTM>2.3.CO;2.
- [94] Sforza C, Galante D, Shirai YF, Ferrario VF. A three-dimensional study of facial mimicry in healthy young adults. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery* 2010;38:409–15. doi:10.1016/j.jcms.2009.10.018.

- [95] Sforza C, Mapelli A, Galante D, Moriconi S, Ibba TM, Ferraro L, et al. The effect of age and sex on facial mimicry: a three-dimensional study in healthy adults. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery* 2010;39:990–9. doi:10.1016/j.ijom.2010.05.011.
- [96] Trotman C-A, Faraway JJ. Sensitivity of a Method for the Analysis of Facial Mobility. II. Interlandmark Separation. *The Cleft Palate-Craniofacial Journal* 1998;35:142–53. doi:10.1597/1545-1569(1998)035<0142:SOAMFT>2.3.CO;2.
- [97] Dulguerov P, Marchal F. Review of objective topographic facial nerve evaluation methods. *The American Journal of Otology* 1999;20:672–8.
- [98] Bartlett SP, Grossman R, Whitaker LA. Age-related changes of the craniofacial skeleton: an anthropometric and histologic analysis. *Plast Reconstr Surg* 1992;90:592–600.
- [99] Baricich A, Cabrio C, Paggio R, Cisari C, Aluffi P. Peripheral Facial Nerve Palsy: How Effective Is Rehabilitation? *Otology & Neurotology* 2012;33:1118–26. doi:10.1097/MAO.0b013e318264270e.
- [100] Teixeira LJ, Valbuza JS, Prado GF. Physical therapy for Bell’s palsy (idiopathic facial paralysis). *Cochrane Database of Systematic Reviews*, John Wiley & Sons, Ltd; 2011. doi:10.1002/14651858.CD006283.pub3.

ANNEXES

Annexes

| | |
|---|------|
| Annexe I: Choix du nombre et de l'emplacement des marqueurs | I |
| Annexe II : Choix de la colle utilisé pour la fixation des marqueurs | III |
| Annexe III : Confection du masque percé. | IV |
| Annexe IV: Conception et évaluation de la gouttière..... | X |
| Annexe V : Conception et évaluation du dispositif auriculaire..... | XI |
| Annexe VI : tableau (tronqué) de données obtenues après post-traitement des données. | XII |
| Annexe VII : Valeurs interindividuelles caractéristiques des 111 marqueurs pour les 5 mouvements et la position statique (n= 28 sujets). | XIII |
| Annexe VIII : Valeurs intra individuelles caractéristiques des 111 marqueurs pour la position statique (4 répétitions sur deux sujets)..... | XIV |
| Annexe IX : Valeurs intra individuelles caractéristiques des 111 marqueurs pour le protocole complet (5 mouvements)..... | XV |
| Annexe X : Classes k-mean de marqueurs pour les amplitudes maximales. | XVI |
| Annexe XI : Données issue de l'étude. | XVII |

Annexe I: Choix du nombre et de l'emplacement des marqueurs

Un premier protocole de pose avec 141 marqueurs a initialement été défini (Figure 88). Les marqueurs étaient placés sur les trajets des muscles peauciers, en tenant compte des éléments anatomiques (orifices, reliefs), et de la physiologie du mouvement facial.

Ce premier protocole ne s'est pas avéré satisfaisant pour les raisons suivantes :

- Temps de pose très important : environ 1 heure ;
- Difficulté à discerner l'emplacement des marqueurs : trop rapprochés ;
- Mauvais rendu : la grande proximité des marqueurs, jusqu'à $\frac{1}{2}$ centimètre, altérait considérablement la qualité de capture (*swapping*, et images instables).
- Post-traitement long et complexe pour des données de qualité médiocre.

Un nouveau protocole de pose, plus simple, a donc été mis au point pour résoudre ces problèmes.

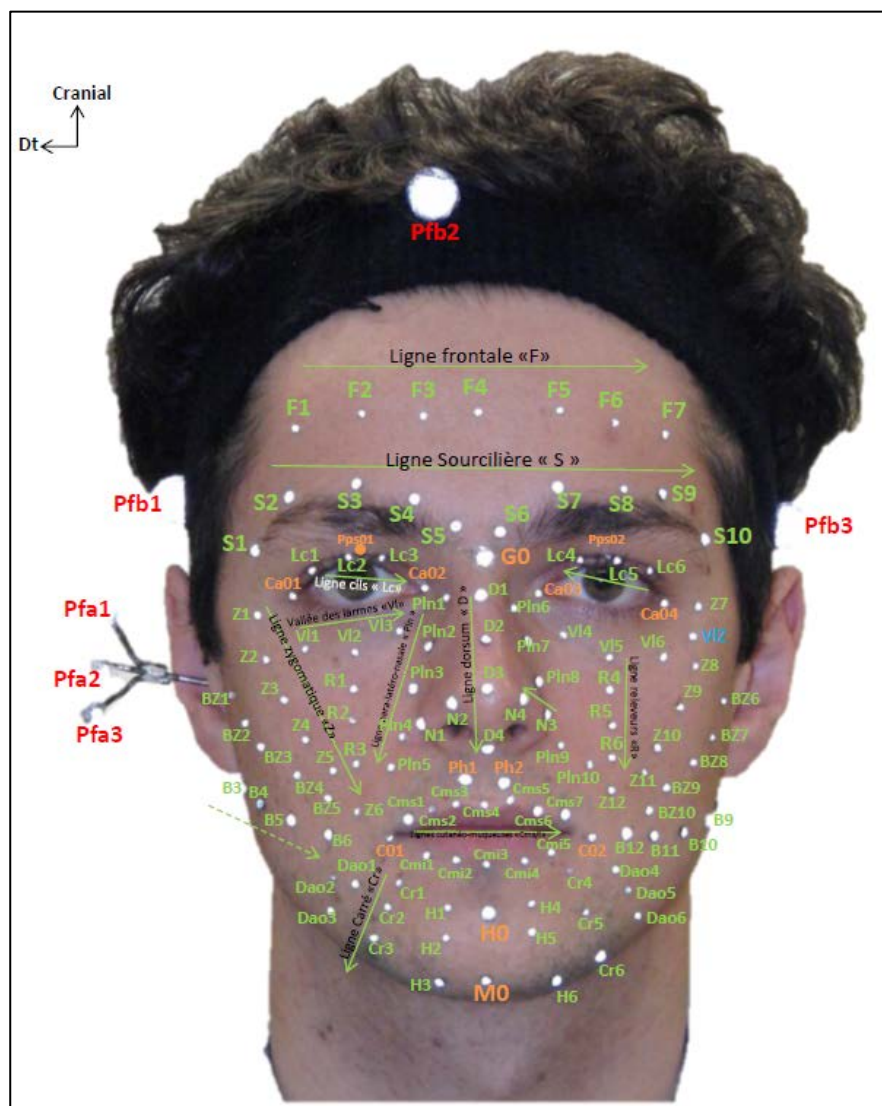


Figure 88: Protocole de pose à 141 marqueurs. On y trouve 4 marqueurs péricrâniens (Pfb), 3 marqueurs auriculaires (Pfa), 3 marqueurs sur la gouttière maxillaire (absents sur la photo), et 131 marqueurs placés sur la face du sujet.

Un nouveau protocole de pose simplifié avec 105 marqueurs a été développé pour améliorer la qualité de capture du mouvement et pour obtenir des données plus fiables.

Celui-ci est une adaptation du premier protocole tenant compte d'un espacement minimal de 1 centimètre entre chaque marqueur (Figure 89).

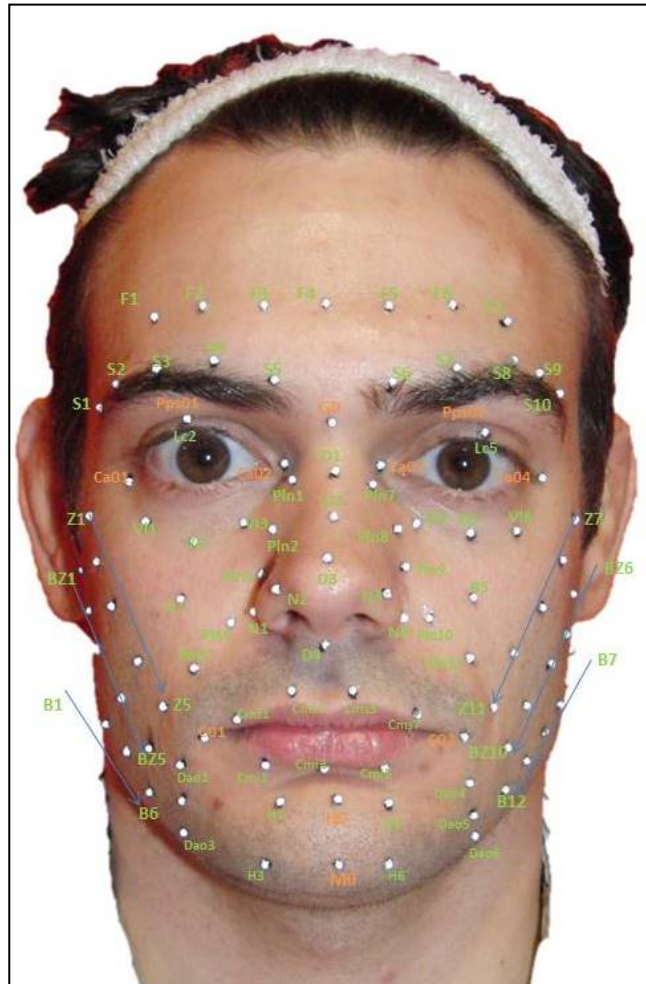


Figure 89: Protocole de pose simplifié à 105 marqueurs.

Le Tableau LVII met en évidence une nette amélioration de la qualité de capture liée au positionnement des marqueurs entre le protocole à 141 marqueurs et celui à 105.

| Nombre de marqueurs | Temps de pose | Identification des marqueurs | Qualité de capture | Temps de labélisation (post-traitement) | Qualité des données obtenues |
|---------------------|---------------|------------------------------|--------------------|---|------------------------------|
| 141 | > 1h | Difficile | mauvaise | >5h | médiocres |
| 105 | 30min | Facile | correcte | 3h | correctes |

Tableau LVII: Comparaison des deux protocoles de pose.

Compte tenu de la meilleure performance du protocole de pose simplifié à 105 marqueurs, c'est celui-ci qui a été retenu.

Annexe II : Choix de la colle utilisé pour la fixation des marqueurs

Les marqueurs réfléchissant de 1,5 millimètre ont l'avantage et l'inconvénient d'avoir une surface de contact très réduite avec la peau. Cela permet de suivre le mouvement des tissus faciaux de manière fidèle, mais ils nécessitent l'emploi d'une colle de forte adhésion sur une surface réduite.

S'agissant d'une application sur des parties superficielles du corps humain, il était indispensable d'utiliser une colle à visée cosmétique. Compte tenu de la proximité immédiate de muqueuses (yeux, bouche, narines), nous avons exclu les colles utilisant des solvants au profit de colles aqueuses.

D'après ce cahier des charges, quatre produits ont été identifiés :

- Colle Satien de la marque SIGVARIS, vendue pour la fixation de bas.
- Colle Duo®, vendue pour la fixation de faux cils.
- Hydro Mastix de la marque Kryolan, vendue pour la fixation de postiches.
- Colle Pros-Aide® II, vendue pour la fixation de prothèses et d'effets spéciaux dans le domaine médical et le cinéma.

Nous avons comparé ces quatre colles afin de déterminer la plus pertinente dans notre utilisation (Tableau LVIII).

| Colle | Forme | Facilité d'application | Adhésion | Nettoyage |
|----------------------|---------|------------------------|----------|------------|
| Hydro Mastix | Pinceau | ++ | - | +++ |
| Pros-Aide® II | Pot | ++ | +++ | +++ |
| Duo® | Tube | +++ | +++ | - (dépôts) |
| SIGVARIS | Roll-on | + | + | + |

Tableau LVIII: Evaluation des différentes colles identifiées.

D'après les résultats obtenus, c'est la colle Pros-Aide® II (Figure 90) qui a été retenue. Elle présente une adhésion rapide et forte à la peau, son nettoyage est facile avec de l'eau.

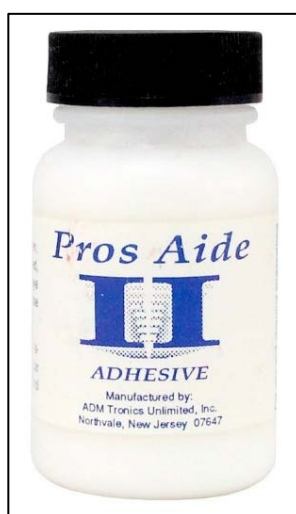


Figure 90: Colle Pros-Aide® II (ADM Tronics Unlimited, Inc. USA)

Annexe III : Confection du masque percé.**1. Moulage et modèle**

Pour confectionner le masque, il faut préalablement réaliser une empreinte du sujet qui servira de moule et de modèle.

La première étape du moulage consiste à appliquer un silicone sur la face du sujet (Figure 91). Nous avons utilisé pour cela le silicone « RTV EC22 thixo body » de la marque Esprit Composite. Adapté à l'utilisation sur le visage, il est pris en 12 minutes. Les finitions sont réalisées à l'aide d'un pistolet à silicone « R&S Turboflex » (rosé foncé sur la figure 91).



Figure 91 : Pose du silicone.

Le silicone est ensuite recouvert de bandes plâtrées afin de conserver la forme originale du silicone qui reste malléable après la dépose. Cette coque en plâtre servira de support rigide lors du collage du moule (Figure 92).



Figure 92 : Plâtrage de l'empreinte en silicone afin de maintenir sa forme.

On procède ensuite au retrait de la coque en plâtre (Figure 93) et du moule en silicone (Figure 94). Cette technique permet d'obtenir des empreintes de haute-fidélité (Figure 95), elle est notamment utilisée dans le domaine médical pour le traitement des brûlés, et dans le cinéma et les effets spéciaux.



Figure 93 : La coque en plâtre permet de conserver la forme du silicone après démoulage.



Figure 94 : Démoulage du silicone.



Figure 95 : Empreinte dans laquelle sera coulé du plâtre pour obtenir un positif de la face du sujet.

L'empreinte en silicone et sa coque en plâtre constituent un moule dans lequel va pouvoir être coulé du plâtre liquide. Nous avons donc obtenu un modèle du sujet (Figure 96) qui a d'abord permis de thermoformer le masque, puis de repérer précisément l'emplacement de chacun des marqueurs.



Figure 96 : Démoulage du modèle du sujet en plâtre.

Le modèle en plâtre est un outil précieux qui permet de réduire le temps de pose des marqueurs sur le sujet, tout en s'assurant d'un placement fiable.

L'emplacement de chacun des marqueurs est ainsi défini à l'avance : reliefs de la face peuvent être repérés avec une plus grande facilité, la symétrie de pose est assurée par l'utilisation d'un compas. De cette manière l'emplacement de chacun des marqueurs est indiqué sur le modèle plâtré (Figure 97).

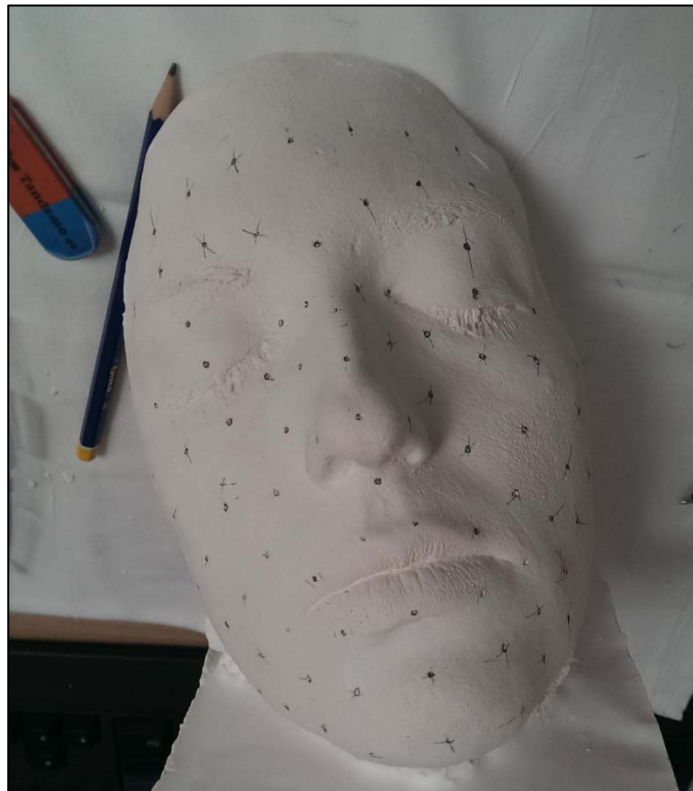


Figure 97 : L'Emplacement des marqueurs est indiqué sur le modèle plâtré.

Compte tenu du nombre important de marqueurs (105), l'une des difficultés lors de la pose sur le sujet est de vérifier si aucun n'a été oublié, et si l'un est manquant de localiser à quel endroit. Afin d'éviter des comptages fastidieux et pas toujours fiables, les marqueurs sont préalablement collés sur le modèle plâtré (Figure 98). Ils sont ensuite transférés directement sur le sujet, au même emplacement. La colle utilisée est la même sur le plâtre et le visage (Pros-Aide® II).

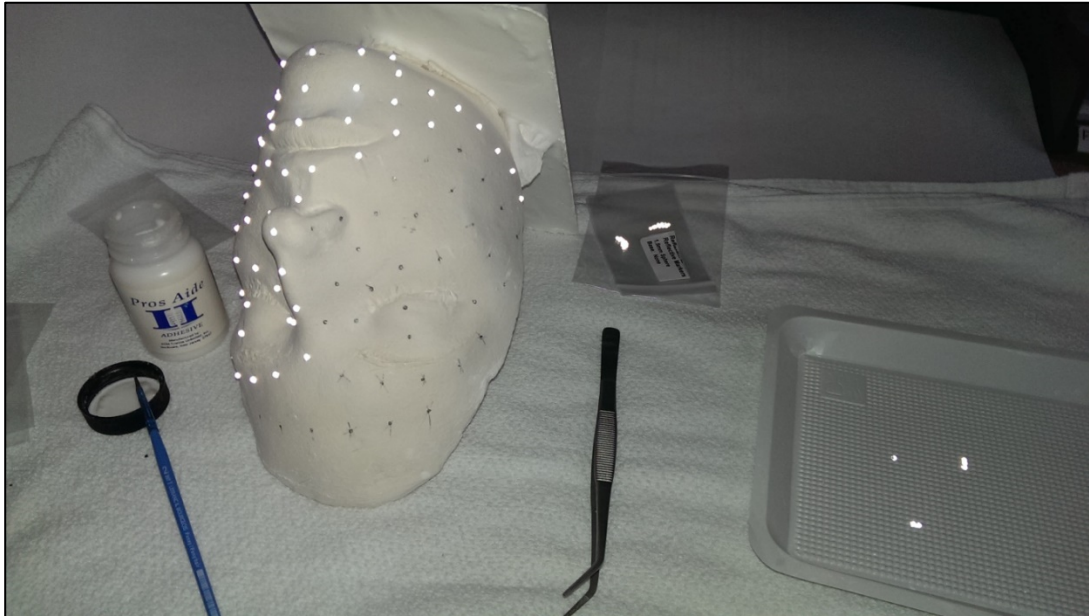


Figure 98: Pose des marqueurs sur le modèle plâtré.

2. Confection du masque

Le masque est thermoformé à l'aide de techniques déjà employées couramment par les orthoprothésistes. Ils ont recours notamment à des masques pour réaliser des compressions des tissus cicatriciels chez les patients brûlés. La technique consiste à thermoformer un plastique haute température (160°C) sur le modèle en plâtre par aspiration (Figure 99).



Figure 99 : Thermoformage du masque à l'aide d'une plaque aspirante.

On obtient ainsi un masque sur mesure, qui sera percé aux emplacements prédéfinis sur le modèle plâtré (Figure 100).



Figure 100 : Report des points sur le masque en vue du perçage.

Annexe IV: Conception et évaluation de la gouttière.

Au fur et à mesure des expérimentations le modèle de gouttière a évolué (Figure 101) pour répondre à différentes problématiques (Tableau LIX) :

- Le modèle 1, en métal dentaire était trop complexe à produire ;
- Le modèle 2, en résine pouvait casser au niveau de la gouttière et de la tige ;
- Le modèle 3, en plaque sandwich thermoformable Durasoft® était plus solide, mais la fragilité de la tige en résine persistait sur le modèle 3. La fabrication était aussi accélérée grâce à la réalisation d'un moule ;
- Finalement le modèle 4 s'est montré la plus robuste et rapide à réaliser. La solidité de la tige a été facilitée par l'inclusion d'un squelette en métal.

Tableau LIX : Évolution du modèle de gouttière.

| Modèle | Temps de fabrication | Robustesse |
|-------------|----------------------|------------|
| Gouttière 1 | 5h | ++++ |
| Gouttière 2 | 3h | + |
| Gouttière 3 | 1h | ++ |
| Gouttière 4 | 1h | +++ |



Figure 101 : Les trois modèles de gouttière par ordre chronologique. Le modèle 4 se différencie du 3 par l'inclusion d'un fil de métal dans la tige.

Annexe V : Conception et évaluation du dispositif auriculaire.

Comme pour la gouttière, le dispositif auriculaire a évolué avec le temps (Figure 102) pour simplifier sa confection et son utilisation (Tableau LX) :

- Modèle 1 : en métal, soudé et modelé à la main ;
- Modèle 2 : en thermoplastic médical Orfit® basse température, moulé sur le sujet ;
- Modèle 3 : en thermoplastic médical Orfit® basse température, réutilisable entre différents sujets.

Tableau LX : Évolution du référentiel auriculaire.

| Référentiel auriculaire | Confection | Utilisation | Robustesse |
|-------------------------|------------|----------------|------------|
| Modèle 1 | 5h | Patient unique | ++++ |
| Modèle 2 | 15min | Patient unique | +++ |
| Modèle 3 | 5min | Tous patients | +++ |

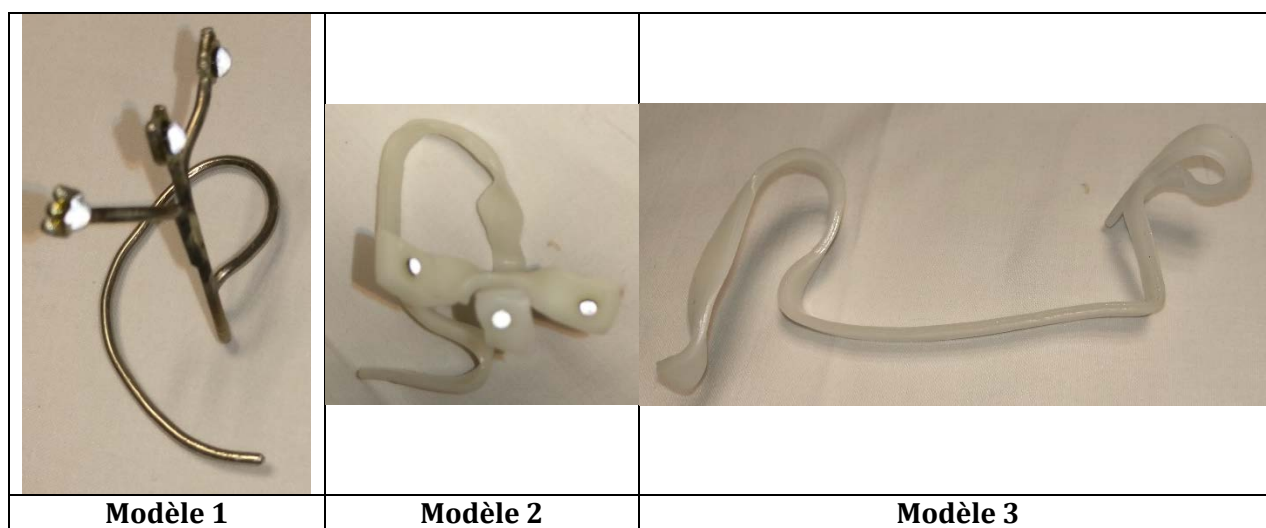


Figure 102 : Les modèles 1 et 2 sont moulés sur le pavillon de l'oreille du sujet alors que le modèle 3 se « clips » sur celui-ci.

Annexe VI : tableau (tronqué) de données obtenues après post-traitement des données.

| FaceMoCap | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------|------|------------|------------|---------|--|------------|------------|------------|---|------------|------------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|
| Déplacements relatifs en mm lors de mouvements, par rapport à une position statique. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Données issues des captures sur sujets sains (2013-2016). | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| n=30 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| François-Régis Sarhan - Novembre 2016 - sarhan.francois-regis@chu-amiens.fr | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Légende : | | | | | | Mouvements : | | | | Localisation des marqueurs : | | | | | | | | | | | |
| NA : donnée manquante Numéro de sujet : s01... Numéro de session : s1, s2, s3... DDN : date de naissance Inclusion : date d'inclusion Moyenne : déplacement relatif moyen par rapport au statique en mm Valeur max/min : déplacement relatif maximal/min par rapport au statique en mm. | | | | | | - complet : succession de M1, M2, M3, M4 et M5. - M1x3 : M1 réalisé trois fois de suite. - statique : pas de mouvement demandé. | | | | - 1/2 face droite : Dt - 1/2 face gauche : G - 1/2 face supérieure : Sup - 1/2 face inférieure : Inf - ligne médiane : Med - points fixes : Pf | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | Nom des marqueurs : en orange. | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | Marqueurs : | | M1 | | M2 | | M3 | | A1 | | A2 | | A3 | | F1 | |
| | | | | | | Localisation : | | Pf | | Pf | | Pf | | Pf | | Pf | | Pf | | Dt | |
| fichier | Sujet | Sexe | DDN | Inclusion | Session | Mouvement | moyenne | moyenne | moyenne | moyenne | moyenne | moyenne | moyenne | moyenne | moyenne | moyenne | moyenne | moyenne | moyenne | moyenne | moyenne |
| s01_s1_1cp_Rm2.txt | s01 | F | 23/11/1983 | 05/02/2014 | s1 | complet | 0,01152527 | 0,01372151 | 0,016828 | 0,75369067 | 0,68686728 | 0,70185119 | 1,77999716 | | | | | | | | |
| s01_s1_1m1_Rm2.txt | s01 | F | 23/11/1983 | | s1 | M1 | 0,01641504 | 0,01376337 | 0,01924854 | 0,40971154 | 0,35349174 | 0,40274251 | 0,42966519 | | | | | | | | |
| s01_s1_1m2_Rm2.txt | s01 | F | 23/11/1983 | | s1 | M2 | 0,00849572 | 0,01475394 | 0,01598988 | 0,46072922 | 0,39225651 | 0,48661409 | 2,45160721 | | | | | | | | |
| s01_s1_1m3_Rm2.txt | s01 | F | 23/11/1983 | | s1 | M3 | 0,01882237 | 0,01389999 | 0,0174013 | 0,56446649 | 0,49186255 | 0,64652638 | 0,43322509 | | | | | | | | |
| s01_s1_1m4_Rm2.txt | s01 | F | 23/11/1983 | | s1 | M4 | 0,01400916 | 0,01988892 | 0,02528387 | 0,94992163 | 0,97900197 | 0,84575188 | 0,5406909 | | | | | | | | |
| s01_s1_1m5_Rm2.txt | s01 | F | 23/11/1983 | | s1 | M5 | 0,00979283 | 0,02226678 | 0,02053345 | 1,56927378 | 1,47613944 | 1,43282479 | 0,30181454 | | | | | | | | |
| s01_s1_3m1_Rm2.txt | s01 | F | 23/11/1983 | | s1 | M1x3 | 0,0106671 | 0,01857292 | 0,01684843 | 0,40852201 | 0,39237459 | 0,44973239 | 0,4422205 | | | | | | | | |
| s01_s1_3m2_Rm2.txt | s01 | F | 23/11/1983 | | s1 | M2x3 | 0,01258811 | 0,0139419 | 0,01429649 | 0,9875937 | 0,69876508 | 0,82645374 | 2,03592482 | | | | | | | | |
| s01_s1_3m3_Rm2.txt | s01 | F | 23/11/1983 | | s1 | M3x3 | 0,01224296 | 0,01284334 | 0,01503676 | 0,37642677 | 0,37241856 | 0,41360152 | 0,34349936 | | | | | | | | |
| s01_s1_3m4_Rm2.txt | s01 | F | 23/11/1983 | | s1 | M4x3 | 0,01480219 | 0,01308161 | 0,01487477 | 0,38819876 | 0,31735613 | 0,35342164 | 0,31866647 | | | | | | | | |
| s01_s1_3m5_Rm2.txt | s01 | F | 23/11/1983 | | s1 | M5x3 | 0,0195449 | 0,01455927 | 0,01617694 | 1,42202332 | 1,27454439 | 1,20019368 | 0,70420238 | | | | | | | | |
| s01_s1_std_Rm2.txt | s01 | F | 23/11/1983 | | s1 | statique | 0,01118809 | 0,01574452 | 0,02064465 | 0,37296979 | 0,36554803 | 0,40001138 | 0,50416429 | | | | | | | | |
| s01_s2_1cp_Rm2.txt | s01 | F | 23/11/1983 | 05/02/2014 | s2 | complet | 0,01045188 | 0,01114439 | 0,01244 | 0,88740218 | 0,81978687 | 0,84068055 | 0,61456926 | | | | | | | | |
| s01_s2_1m1_Rm2.txt | s01 | F | 23/11/1983 | | s2 | M1 | 0,00357 | 0,00627451 | 0,00640177 | 0,16785808 | 0,1566882 | 0,17423456 | 0,24849972 | | | | | | | | |
| s01_s2_1m2_Rm2.txt | s01 | F | 23/11/1983 | | s2 | M2 | 0,00335983 | 0,01089754 | 0,00953632 | 0,38174305 | 0,31278463 | 0,3622104 | 2,99157173 | | | | | | | | |
| s01_s2_1m3_Rm2.txt | s01 | F | 23/11/1983 | | s2 | M3 | 0,0050267 | 0,00584843 | 0,00493199 | 0,22860635 | 0,23108636 | 0,24489834 | 0,25497215 | | | | | | | | |
| s01_s2_1m4_Rm2.txt | s01 | F | 23/11/1983 | | s2 | M4 | 0,00287278 | 0,00670342 | 0,00611608 | 0,25941241 | 0,27544956 | 0,31336358 | 0,26407184 | | | | | | | | |
| s01_s2_1m5_Rm2.txt | s01 | F | 23/11/1983 | | s2 | M5 | 0,00398795 | 0,00456172 | 0,00435137 | 0,20771819 | 0,24761008 | 0,23515915 | 0,19624508 | | | | | | | | |
| s01_s2_3m1_Rm2.txt | s01 | F | 23/11/1983 | | s2 | M1x3 | 0,01505648 | 0,00573269 | 0,01426659 | 0,19239282 | 0,21971731 | 0,21956461 | 0,36466493 | | | | | | | | |
| s01_s2_3m2_Rm2.txt | s01 | F | 23/11/1983 | | s2 | M2x3 | 0,03517174 | 0,01432163 | 0,02889561 | 0,58879351 | 0,52999404 | 0,53648846 | 2,91698954 | | | | | | | | |
| s01_s2_3m3_Rm2.txt | s01 | F | 23/11/1983 | | s2 | M3x3 | 0,00539634 | 0,00706482 | 0,00885998 | 0,58393929 | 0,41008451 | 0,58924671 | 0,68434094 | | | | | | | | |
| s01_s2_3m4_Rm2.txt | s01 | F | 23/11/1983 | | s2 | M4x3 | 0,00524177 | 0,00554753 | 0,00554027 | 0,4735791 | 0,41566821 | 0,530943 | 0,28820988 | | | | | | | | |
| s01_s2_3m5_Rm2.txt | s01 | F | 23/11/1983 | | s2 | M5x3 | 0,00531731 | 0,0057101 | 0,00588546 | 0,92573861 | 1,00554693 | 0,8665703 | 0,4685971 | | | | | | | | |
| s01_s2_std_Rm2.txt | s01 | F | 23/11/1983 | | s2 | statique | 0,00426352 | 0,00591294 | 0,0071688 | 0,22033879 | 0,19211572 | 0,22093819 | | | | | | | | | |
| s02_s1_std_Rm2.txt | s02 | M | 09/07/1985 | 07/05/2014 | s1 | statique | | | | | | | | | | | | | | | 0,00195241 |
| s02_s2_1cp_Rm2.txt | s02 | M | 09/07/1985 | 07/05/2014 | s2 | complet | 0,01036889 | 0,01715891 | 0,01796724 | 1,00981827 | 0,99921201 | 1,00988592 | 0,63314076 | | | | | | | | |
| s02_s2_1m1_Rm2.txt | s02 | M | 09/07/1985 | | s2 | M1 | 0,02881388 | 0,05673782 | 0,036328 | 1,41176728 | 1,4623194 | 1,49523244 | 1,19055343 | | | | | | | | |
| s02_s2_1m2_Rm2.txt | s02 | M | 09/07/1985 | | s2 | M2 | 0,01888019 | 0,02409024 | 0,02564542 | 1,04196163 | 0,87641736 | 0,86158962 | 2,29299251 | | | | | | | | |
| s02_s2_1m3_Rm2.txt | s02 | M | 09/07/1985 | | s2 | M3 | 0,02293329 | 0,05910531 | 0,06991501 | 1,11677521 | 1,11245484 | 1,072741 | 1,35020085 | | | | | | | | |
| s02_s2_1m4_Rm2.txt | s02 | M | 09/07/1985 | | s2 | M4 | 0,03365539 | 0,05939268 | 0,05824421 | 0,77560192 | 0,86026023 | 0,7972116 | 0,70303664 | | | | | | | | |
| s02_s2_1m5_Rm2.txt | s02 | M | 09/07/1985 | | s2 | M5 | 0,04267443 | 0,03325515 | 0,02731291 | 0,7306699 | 0,76188307 | 0,77475236 | 0,6121378 | | | | | | | | |
| s02_s2_3m1_Rm2.txt | s02 | M | 09/07/1985 | | s2 | M1x3 | 0,02931163 | 0,04545888 | 0,03656383 | 0,63025827 | 0,62018052 | 0,84939247 | 0,34663083 | | | | | | | | |
| s02_s2_3m2_Rm2.txt | s02 | M | 09/07/1985 | | s2 | M2x3 | 0,02597678 | 0,05965953 | 0,04788661 | 1,14958731 | 1,02696185 | 0,98709033 | 1,85662065 | | | | | | | | |
| s02_s2_3m3_Rm2.txt | s02 | M | 09/07/1985 | | s2 | M3x3 | 0,03566158 | 0,06896351 | 0,05278099 | 0,70523296 | 0,72607291 | 0,79897364 | 0,75323747 | | | | | | | | |
| s02_s2_3m4_Rm2.txt | s02 | M | 09/07/1985 | | s2 | M4x3 | 0,02713172 | 0,06800111 | 0,07741901 | 1,45896244 | 1,41960219 | 1,45760572 | 1,53379216 | | | | | | | | |
| s02_s2_3m5_Rm2.txt | s02 | M | 09/07/1985 | | s2 | M5x3 | 0,01656612 | 0,03301279 | 0,04301505 | 1,35127384 | 1,34451284 | 1,37572764 | 0,67533999 | | | | | | | | |
| s02_s2_std_Rm2.txt | s02 | M | 09/07/1985 | | s2 | statique | 0,00538941 | 0,01351484 | 0,01176078 | 0,41765779 | 0,43242351 | 0,42800207 | 0,14312709 | | | | | | | | |
| s02_s3_1cp_Rm2.txt | s02 | M | 09/07/1985 | 07/05/2014 | s3 | complet | 0,00598224 | 0,04369346 | 0,04693604 | 1,38644309 | 1,31225885 | 1,40231357 | 1,06774364 | | | | | | | | |
| s02_s3_1m1_Rm2.txt | s02 | M | 09/07/1985 | | s3 | M1 | 0,00122091 | 0,01079951 | 0,01073814 | 0,18204374 | 0,18554914 | 0,19338432 | 0,24389665 | | | | | | | | |
| s02_s3_1m2_Rm2.txt | s02 | M | 09/07/1985 | | s3 | M2 | 0,00532562 | 0,01275921 | 0,0149487 | 1,02577277 | 0,92308196 | 0,9076037 | 3,52302494 | | | | | | | | |
| s02_s3_1m3_Rm2.txt | s02 | M | 09/07/1985 | | s3 | M3 | 0,0050292 | 0,02278323 | 0,02071364 | 0,61729607 | 0,64524533 | 0,70838875 | 0,67988615 | | | | | | | | |
| s02_s3_1m4_Rm2.txt | s02 | M | 09/07/1985 | | s3 | M4 | 0,00575705 | 0,01458015 | 0,01458585 | 0,42159715 | 0,44634931 | 0,47378741 | 0,29993389 | | | | | | | | |
| s02_s3_1m5_Rm2.txt | s02 | M | 09/07/1985 | | s3 | M5 | 0,00232171 | 0,01167077 | 0,01178186 | 0,79380298 | 0,58566331 | 0,36428789 | 0,40097769 | | | | | | | | |
| s02_s3_3m1_Rm2.txt | s02 | M | 09/07/1985 | | s3 | M1x3 | 0,00164817 | 0,0035115 | 0,00328612 | 0,16198575 | 0,15836867 | 0,17321263 | 0,14447856 | | | | | | | | |
| s02_s3_3m2_Rm2.txt | s02 | M | 09/07/1985 | | s3 | M2x3 | 0,00497466 | 0,00717802 | 0,00899963 | 0,54754777 | 0,39796202 | 0,3137675 | 1,73304495 | | | | | | | | |
| s02_s3_3m3_Rm2.txt | s02 | M | 09/07/1985 | | s3 | M3x3 | 0,00264113 | 0,01075541 | 0,01007292 | 0,2684482 | 0,30662241 | 0,42419619 | 0,51362764 | | | | | | | | |
| s02_s3_3m4_Rm2.txt | s02 | M | 09/07/1985 | | s3 | M4x3 | 0,00404986 | 0,00797873 | 0,0082597 | 0,27407971 | 0,30403156 | 0,35886567 | 0,25823886 | | | | | | | | |
| s02_s3_3m5_Rm2.txt | s02 | M | 09/07/1985 | | s3 | M5x3 | 0,00642711 | 0,03371154 | 0,02973912 | 2,16634862 | 1,83173987 | 1,43696519 | 1,07681061 | | | | | | | | |
| s02_s3_std_Rm2.txt | s02 | M | 09/07/1985 | | s3 | statique | 0,00384683 | 0,00875234 | 0,00849686 | 0,20475816 | 0,21110972 | 0,21444575 | 0,23983143 | | | | | | | | |
| s02_s5_std_Rm2.txt | s02 | M | 09/07/1985 | 07/05/2014 | s5 | statique | 0,00578823 | 0,01347015 | 0,01371683 | 0,34573607 | 0,35437854 | 0,3656126 | 0,19711629 | | | | | | | | |

Les données complètes sont disponibles sur le CD-Rom joint.

Annexe VII : Valeurs interindividuelles caractéristiques des 111 marqueurs pour les 5 mouvements et la position statique (n= 28 sujets).

| | M1 | | | M2 | | | M3 | | | M4 | | | M5 | | | Statique (M0) | | |
|--------------|------|----------|-----------|------|----------|-----------|------|----------|-----------|------|----------|-----------|------|----------|-----------|---------------|----------|-----------|
| | Moy. | σ | IC (95%) | Moy. | σ | IC (95%) | Moy. | σ | IC (95%) | Moy. | σ | IC (95%) | Moy. | σ | IC (95%) | Moy. | σ | IC (95%) |
| Ma1 | 0 | 0 | [0,0;0,0] | 0 | 0 | [0,0;0,0] | 0 | 0,1 | [0,0;0,1] | 0 | 0 | [0,0;0,0] | 0 | 0,1 | [0,0;0,0] | 0 | 0 | [0,0;0,0] |
| Ma2 | 0 | 0 | [0,0;0,0] | 0 | 0 | [0,0;0,0] | 0 | 0 | [0,0;0,0] | 0 | 0 | [0,0;0,0] | 0 | 0 | [0,0;0,0] | 0 | 0 | [0,0;0,0] |
| Ma3 | 0 | 0 | [0,0;0,0] | 0 | 0 | [0,0;0,0] | 0 | 0,2 | [0,0;0,1] | 0 | 0 | [0,0;0,0] | 0,1 | 0,1 | [0,0;0,1] | 0 | 0 | [0,0;0,0] |
| A1 | 0,5 | 0,8 | [0,2;0,8] | 0,9 | 0,7 | [0,6;1,1] | 0,6 | 0,4 | [0,5;0,8] | 0,6 | 0,4 | [0,5;0,8] | 1,9 | 1,4 | [1,3;2,4] | 0,3 | 0,3 | [0,2;0,4] |
| A2 | 0,4 | 0,7 | [0,2;0,7] | 0,8 | 0,5 | [0,6;1,0] | 0,7 | 0,5 | [0,5;0,9] | 0,6 | 0,3 | [0,5;0,8] | 1,8 | 1,4 | [1,3;2,4] | 0,3 | 0,3 | [0,2;0,5] |
| A3 | 0,3 | 0,3 | [0,2;0,5] | 0,7 | 0,5 | [0,5;0,9] | 0,6 | 0,4 | [0,5;0,8] | 0,9 | 0,9 | [0,5;1,2] | 1,9 | 1,5 | [1,2;2,5] | 0,3 | 0,3 | [0,2;0,5] |
| F1 | 0,4 | 0,4 | [0,3;0,6] | 2,8 | 1,2 | [2,3;3,3] | 0,4 | 0,3 | [0,3;0,6] | 0,4 | 0,2 | [0,3;0,4] | 0,6 | 0,4 | [0,4;0,8] | 0,2 | 0,2 | [0,2;0,3] |
| F2 | 0,4 | 0,3 | [0,2;0,5] | 2,3 | 1 | [1,9;2,7] | 0,4 | 0,3 | [0,3;0,5] | 0,4 | 0,2 | [0,3;0,4] | 0,6 | 0,5 | [0,4;0,8] | 0,2 | 0,2 | [0,2;0,3] |
| F3 | 0,3 | 0,3 | [0,2;0,4] | 1,9 | 0,9 | [1,5;2,3] | 0,4 | 0,3 | [0,3;0,5] | 0,3 | 0,2 | [0,3;0,4] | 0,5 | 0,4 | [0,3;0,6] | 0,2 | 0,2 | [0,1;0,3] |
| F4 | 0,3 | 0,3 | [0,1;0,4] | 1,6 | 0,9 | [1,3;1,9] | 0,4 | 0,3 | [0,3;0,5] | 0,3 | 0,2 | [0,2;0,4] | 0,4 | 0,3 | [0,3;0,5] | 0,2 | 0,2 | [0,1;0,3] |
| F5 | 0,3 | 0,3 | [0,2;0,4] | 1,8 | 0,9 | [1,4;2,2] | 0,4 | 0,2 | [0,3;0,5] | 0,3 | 0,2 | [0,3;0,4] | 0,4 | 0,3 | [0,3;0,5] | 0,2 | 0,1 | [0,1;0,2] |
| F6 | 0,3 | 0,3 | [0,2;0,4] | 2,2 | 1,1 | [1,8;2,7] | 0,4 | 0,2 | [0,3;0,5] | 0,3 | 0,2 | [0,3;0,4] | 0,5 | 0,3 | [0,3;0,6] | 0,2 | 0,2 | [0,1;0,3] |
| F7 | 0,3 | 0,3 | [0,2;0,5] | 2,7 | 1,4 | [2,2;3,3] | 0,4 | 0,2 | [0,3;0,5] | 0,4 | 0,2 | [0,3;0,4] | 0,6 | 0,4 | [0,4;0,7] | 0,2 | 0,2 | [0,1;0,2] |
| S1 | 0,5 | 0,5 | [0,3;0,6] | 3,8 | 1,7 | [3,1;4,4] | 0,5 | 0,3 | [0,4;0,6] | 0,4 | 0,2 | [0,3;0,5] | 0,9 | 0,6 | [0,7;1,2] | 0,2 | 0,2 | [0,2;0,3] |
| S2 | 0,6 | 0,4 | [0,4;0,7] | 4,3 | 2 | [3,4;5,1] | 0,4 | 0,3 | [0,3;0,5] | 0,4 | 0,2 | [0,3;0,5] | 0,9 | 0,7 | [0,6;1,2] | 0,2 | 0,2 | [0,2;0,3] |
| S3 | 0,5 | 0,4 | [0,4;0,7] | 4,3 | 1,9 | [3,5;5,0] | 0,4 | 0,3 | [0,3;0,5] | 0,4 | 0,2 | [0,3;0,5] | 0,8 | 0,7 | [0,5;1,0] | 0,3 | 0,2 | [0,2;0,3] |
| S4 | 0,5 | 0,5 | [0,3;0,7] | 3,3 | 1,5 | [2,7;3,9] | 0,4 | 0,2 | [0,3;0,5] | 0,3 | 0,2 | [0,2;0,4] | 0,6 | 0,6 | [0,4;0,9] | 0,3 | 0,2 | [0,2;0,4] |
| S5 | 0,3 | 0,3 | [0,2;0,4] | 2,5 | 1,2 | [2,0;2,9] | 0,4 | 0,2 | [0,3;0,4] | 0,3 | 0,2 | [0,3;0,4] | 0,4 | 0,4 | [0,3;0,6] | 0,2 | 0,2 | [0,1;0,3] |
| G0 | 0,4 | 0,6 | [0,1;0,6] | 1,6 | 0,7 | [1,3;1,8] | 0,3 | 0,2 | [0,2;0,4] | 0,3 | 0,1 | [0,2;0,3] | 0,4 | 0,3 | [0,3;0,5] | 0,2 | 0,1 | [0,1;0,2] |
| S6 | 0,3 | 0,2 | [0,2;0,4] | 2,2 | 1 | [1,8;2,6] | 0,3 | 0,2 | [0,2;0,4] | 0,3 | 0,1 | [0,3;0,4] | 0,4 | 0,3 | [0,3;0,5] | 0,2 | 0,1 | [0,1;0,2] |
| S7 | 0,4 | 0,3 | [0,3;0,5] | 3,4 | 1,7 | [2,7;4,0] | 0,4 | 0,2 | [0,3;0,5] | 0,4 | 0,2 | [0,3;0,4] | 0,5 | 0,3 | [0,4;0,7] | 0,2 | 0,2 | [0,1;0,2] |
| S8 | 0,5 | 0,3 | [0,3;0,6] | 4,5 | 2 | [3,7;5,2] | 0,4 | 0,3 | [0,3;0,5] | 0,4 | 0,2 | [0,3;0,5] | 0,7 | 0,4 | [0,5;0,8] | 0,2 | 0,2 | [0,1;0,3] |
| S9 | 0,4 | 0,3 | [0,3;0,6] | 4,2 | 2 | [3,4;5,0] | 0,4 | 0,2 | [0,3;0,5] | 0,4 | 0,2 | [0,3;0,4] | 0,7 | 0,5 | [0,5;0,9] | 0,2 | 0,1 | [0,1;0,2] |
| S10 | 0,4 | 0,3 | [0,3;0,6] | 3,8 | 1,7 | [3,2;4,5] | 0,4 | 0,2 | [0,3;0,5] | 0,4 | 0,2 | [0,3;0,5] | 0,7 | 0,4 | [0,6;0,9] | 0,2 | 0,2 | [0,2;0,3] |
| D1 | 0,2 | 0,2 | [0,1;0,3] | 0,6 | 0,3 | [0,5;0,7] | 0,3 | 0,2 | [0,2;0,3] | 0,3 | 0,1 | [0,3;0,3] | 0,3 | 0,2 | [0,2;0,4] | 0,1 | 0,1 | [0,1;0,2] |
| D2 | 0,2 | 0,2 | [0,1;0,2] | 0,4 | 0,3 | [0,3;0,5] | 0,3 | 0,2 | [0,3;0,4] | 0,4 | 0,1 | [0,4;0,4] | 0,3 | 0,2 | [0,3;0,4] | 0,1 | 0,1 | [0,1;0,2] |
| D3 | 0,2 | 0,2 | [0,1;0,2] | 0,4 | 0,2 | [0,3;0,5] | 0,7 | 0,4 | [0,5;0,8] | 0,8 | 0,3 | [0,7;0,9] | 0,6 | 0,3 | [0,5;0,7] | 0,1 | 0,1 | [0,1;0,2] |
| D4 | 0,2 | 0,2 | [0,1;0,3] | 0,4 | 0,2 | [0,3;0,5] | 0,7 | 0,3 | [0,6;0,9] | 0,8 | 0,2 | [0,7;0,9] | 2 | 0,9 | [1,5;2,4] | 0,2 | 0,1 | [0,1;0,2] |
| Ca01 | 0,7 | 0,4 | [0,5;0,8] | 4,6 | 1,9 | [3,8;5,4] | 0,4 | 0,2 | [0,3;0,5] | 0,4 | 0,2 | [0,3;0,5] | 1,7 | 1 | [1,3;2,1] | 0,3 | 0,2 | [0,2;0,3] |
| V11 | 0,5 | 0,4 | [0,3;0,6] | 3,4 | 1,5 | [2,8;3,9] | 0,5 | 0,2 | [0,4;0,6] | 0,6 | 0,4 | [0,4;0,7] | 3,4 | 1,3 | [2,9;3,9] | 0,2 | 0,1 | [0,1;0,2] |
| V12 | 0,5 | 0,5 | [0,3;0,6] | 2,9 | 1,1 | [2,4;3,3] | 0,5 | 0,2 | [0,4;0,6] | 0,6 | 0,6 | [0,4;0,9] | 3 | 1,2 | [2,5;3,5] | 0,2 | 0,2 | [0,1;0,3] |
| V13 | 0,4 | 0,4 | [0,2;0,6] | 2,2 | 0,9 | [1,8;2,5] | 0,4 | 0,3 | [0,3;0,6] | 0,4 | 0,2 | [0,3;0,5] | 1,5 | 0,7 | [1,3;1,8] | 0,2 | 0,1 | [0,1;0,2] |
| Ca02 | 0,5 | 0,5 | [0,3;0,7] | 1,3 | 0,7 | [1,0;1,6] | 0,4 | 0,2 | [0,3;0,4] | 0,4 | 0,1 | [0,3;0,4] | 0,5 | 0,2 | [0,4;0,6] | 0,3 | 0,5 | [0,1;0,5] |
| Ca03 | 0,4 | 0,3 | [0,3;0,5] | 1 | 0,4 | [0,8;1,2] | 0,4 | 0,2 | [0,3;0,4] | 0,4 | 0,3 | [0,3;0,5] | 0,4 | 0,2 | [0,3;0,5] | 0,2 | 0,1 | [0,1;0,3] |
| V14 | 0,4 | 0,4 | [0,3;0,6] | 2,1 | 0,9 | [1,7;2,5] | 0,4 | 0,2 | [0,3;0,5] | 0,4 | 0,3 | [0,3;0,5] | 1,3 | 0,6 | [1,1;1,6] | 0,2 | 0,2 | [0,1;0,3] |
| V15 | 0,4 | 0,5 | [0,2;0,6] | 3,1 | 1,2 | [2,6;3,6] | 0,5 | 0,2 | [0,4;0,6] | 0,5 | 0,4 | [0,4;0,7] | 3 | 1,1 | [2,5;3,4] | 0,2 | 0,1 | [0,1;0,2] |
| V16 | 0,4 | 0,4 | [0,3;0,6] | 3,4 | 1,4 | [2,9;4,0] | 0,5 | 0,2 | [0,5;0,6] | 0,6 | 0,6 | [0,4;0,8] | 3,4 | 1,1 | [3,0;3,8] | 0,2 | 0,1 | [0,1;0,2] |
| Ca04 | 0,7 | 0,4 | [0,6;0,8] | 4,7 | 2 | [4,0;5,5] | 0,4 | 0,2 | [0,4;0,5] | 0,4 | 0,3 | [0,3;0,5] | 1,6 | 1 | [1,2;2,0] | 0,3 | 0,2 | [0,2;0,3] |
| N3 | 0,3 | 0,4 | [0,2;0,5] | 0,5 | 0,3 | [0,4;0,7] | 0,7 | 0,6 | [0,5;0,9] | 0,8 | 0,3 | [0,7;0,9] | 0,7 | 0,3 | [0,5;0,8] | 0,2 | 0,1 | [0,1;0,2] |
| N4 | 0,2 | 0,1 | [0,2;0,3] | 0,7 | 0,4 | [0,5;0,9] | 0,9 | 0,8 | [0,5;1,3] | 1 | 0,6 | [0,6;1,3] | 2,1 | 0,8 | [1,7;2,4] | 0,2 | 0,2 | [0,1;0,3] |
| Pln7 | 0,3 | 0,3 | [0,2;0,4] | 0,8 | 0,4 | [0,6;1,0] | 0,5 | 0,7 | [0,2;0,8] | 0,4 | 0,4 | [0,2;0,5] | 0,4 | 0,2 | [0,3;0,5] | 0,1 | 0,1 | [0,1;0,2] |
| Pln8 | 0,2 | 0,1 | [0,1;0,2] | 1 | 0,7 | [0,7;1,2] | 0,4 | 0,3 | [0,3;0,5] | 0,5 | 0,4 | [0,3;0,7] | 1,1 | 0,8 | [0,8;1,5] | 0,1 | 0,1 | [0,1;0,2] |
| Pln9 | 0,2 | 0,2 | [0,1;0,3] | 1,3 | 0,6 | [1,0;1,6] | 0,6 | 0,4 | [0,4;0,8] | 0,7 | 0,2 | [0,6;0,7] | 2,4 | 1,2 | [1,8;2,9] | 0,2 | 0,1 | [0,1;0,2] |
| Pln10 | 0,3 | 0,3 | [0,2;0,4] | 1,3 | 0,8 | [1,0;1,6] | 1,2 | 0,9 | [0,9;1,5] | 1,2 | 1,1 | [0,7;1,6] | 3,2 | 1,1 | [2,8;3,6] | 0,2 | 0,1 | [0,1;0,2] |
| Pln11 | 0,3 | 0,3 | [0,1;0,4] | 1 | 0,6 | [0,8;1,3] | 1,9 | 0,8 | [1,5;2,2] | 1,8 | 0,6 | [1,6;2,1] | 4,7 | 1,7 | [4,0;5,4] | 0,2 | 0,2 | [0,1;0,3] |
| R5 | 0,3 | 0,3 | [0,2;0,4] | 2 | 1,1 | [1,6;2,5] | 0,9 | 0,4 | [0,7;1,1] | 0,9 | 0,4 | [0,8;1,1] | 4,3 | 1,5 | [3,7;4,9] | 0,2 | 0,2 | [0,1;0,2] |
| C02 | 0,3 | 0,3 | [0,2;0,4] | 0,7 | 0,5 | [0,5;0,9] | 2,9 | 1,3 | [2,3;3,4] | 3 | 1,1 | [2,5;3,5] | 7,6 | 1,9 | [6,8;8,3] | 0,3 | 0,4 | [0,2;0,5] |
| Cms7 | 0,2 | 0,2 | [0,1;0,3] | 0,6 | 0,6 | [0,4;0,9] | 2,3 | 1,2 | [1,8;2,8] | 2,6 | 1 | [2,2;3,0] | 6,8 | 1,7 | [6,1;7,4] | 0,2 | 0,3 | [0,1;0,4] |
| Cms5 | 0,2 | 0,2 | [0,2;0,3] | 0,5 | 0,4 | [0,3;0,6] | 1,8 | 0,9 | [1,4;2,1] | 2,2 | 0,9 | [1,8;2,6] | 4,4 | 1,3 | [3,8;4,9] | 0,2 | 0,3 | [0,1;0,4] |
| Cms3 | 0,3 | 0,3 | [0,2;0,4] | 0,4 | 0,3 | [0,3;0,6] | 1,9 | 1,1 | [1,4;2,4] | 2,1 | 0,9 | [1,7;2,5] | 4,4 | 1,6 | [3,7;5,1] | 0,2 | 0,3 | [0,1;0,3] |
| Cms1 | 0,3 | 0,3 | [0,2;0,4] | 0,6 | 0,5 | [0,4;0,8] | 2,3 | 1,2 | [1,8;2,8] | 2,4 | 0,9 | [2,0;2,8] | 6,9 | 2,1 | [6,0;7,8] | 0,3 | 0,4 | [0,2;0,5] |
| C01 | 0,3 | 0,3 | [0,2;0,4] | 0,7 | 0,4 | [0,5;0,8] | 2,5 | 0,8 | [2,1;2,8] | 2,7 | 1,3 | [2,1;3,3] | 7,4 | 2,3 | [6,4;8,4] | 0,3 | 0,3 | [0,2;0,4] |
| Z5 | 0,3 | 0,3 | [0,2;0,4] | 1 | 0,6 | [0,8;1,3] | 1,9 | 0,9 | [1,6;2,3] | 2,1 | 0,7 | [1,8;2,3] | 4,6 | 1,5 | [4,0;5,3] | 0,3 | 0,2 | [0,2;0,3] |
| Z4 | 0,3 | 0,3 | [0,2;0,4] | 1,6 | 0,9 | [1,2;2,0] | 1,4 | 0,7 | [1,1;1,7] | 1,5 | 0,6 | [1,3;1,7] | 4,4 | 1,5 | [3,8;5,0] | 0,2 | 0,2 | [0,2;0,3] |
| Z3 | 0,3 | 0,3 | [0,2;0,5] | 2,2 | 1,2 | [1,7;2,7] | 1 | 0,5 | [0,8;1,2] | 0,9 | 0,5 | [0,7;1,1] | 4,1 | 1,5 | [3,5;4,7] | 0,2 | 0,1 | [0,1;0,3] |
| Z2 | 0,4 | 0,4 | [0,3;0,6] | 2,8 | 1,4 | [2,3;3,4] | 0,7 | 0,3 | [0,6;0,8] | 0,6 | 0,3 | [0,5;0,8] | 3,1 | 1,2 | [2,6;3,6] | 0,2 | 0,2 | [0,2;0,3] |
| Z1 | 0,4 | 0,4 | [0,2;0,6] | 2,9 | 1,4 | [2,3;3,5] | 0,5 | 0,2 | [0,4;0,6] | 0,4 | 0,2 | [0,4;0,5] | 2 | 1,1 | [1,6;2,5] | 0,2 | 0,2 | [0,2;0,3] |

Annexe VIII : Valeurs intra individuelles caractéristiques des 111 marqueurs pour la position statique (4 répétitions sur deux sujets).

**Intra individuel statique (n=4 répétitions)
Sujet 2**

| | moy. | σ | | moy. | σ |
|-------|------|----------|-------|------|----------|
| M1 | 0 | 0 | Z1 | 0,1 | 0,1 |
| M2 | 0 | 0 | BZ1 | 0,2 | 0,1 |
| M3 | 0 | 0 | BZ2 | 0,1 | 0,1 |
| A1 | 0,3 | 0,1 | BZ3 | 0,2 | 0 |
| A2 | 0,3 | 0,1 | BZ4 | 0,1 | 0 |
| A3 | 0,3 | 0,1 | BZ5 | 0,1 | 0 |
| F1 | 0,1 | 0,1 | Dao1 | 0,1 | 0 |
| F2 | 0,1 | 0,1 | Dao2 | 0,1 | 0 |
| F3 | 0,1 | 0,1 | Dao3 | 0,1 | 0 |
| F4 | 0,1 | 0,1 | B6 | 0,1 | 0,1 |
| F5 | 0,1 | 0,1 | B5 | 0,1 | 0,1 |
| F6 | 0,1 | 0,1 | B4 | 0,2 | 0,1 |
| F7 | 0,1 | 0,1 | B3 | 0,3 | 0,1 |
| S1 | 0,1 | 0,1 | B2 | 0,2 | 0,1 |
| S2 | 0,1 | 0,1 | B1 | 0,2 | 0 |
| S3 | 0,1 | 0,1 | Cmi1 | 0,2 | 0,1 |
| S4 | 0,1 | 0,1 | Cmi3 | 0,1 | 0,1 |
| S5 | 0,1 | 0,1 | Cmi5 | 0,2 | 0,1 |
| G0 | 0,1 | 0 | H3 | 0,2 | 0,1 |
| S6 | 0,1 | 0,1 | H1 | 0,2 | 0,1 |
| S7 | 0,1 | 0,1 | H0 | 0,2 | 0,1 |
| S8 | 0,1 | 0,1 | M0 | 0,1 | 0,1 |
| S9 | 0,1 | 0,1 | H6 | 0,1 | 0,1 |
| S10 | 0,1 | 0,1 | H4 | 0,1 | 0,1 |
| D1 | 0,1 | 0,1 | Dao4 | 0,1 | 0 |
| D2 | 0,1 | 0 | Dao5 | 0,2 | 0,1 |
| D3 | 0,1 | 0 | Dao6 | 0,1 | 0,1 |
| D4 | 0,1 | 0 | B12 | 0,2 | 0,1 |
| Ca01 | 0,2 | 0,1 | B11 | 0,1 | 0 |
| VI1 | 0,1 | 0,1 | B10 | 0,1 | 0,1 |
| VI2 | 0,1 | 0,1 | B9 | 0,1 | 0,1 |
| VI3 | 0,2 | 0,1 | B8 | 0,1 | 0,1 |
| Ca02 | 0,1 | 0,1 | B7 | 0,2 | 0,1 |
| Ca03 | 0,1 | 0 | BZ6 | 0,1 | 0,1 |
| VI4 | 0,1 | 0,1 | BZ7 | 0,2 | 0,1 |
| VI5 | 0,1 | 0,1 | BZ8 | 0,1 | 0,1 |
| VI6 | 0,2 | 0,1 | BZ9 | 0,1 | 0,1 |
| Ca04 | 0,2 | 0,1 | BZ10 | 0,1 | 0 |
| N3 | 0,2 | 0,1 | Z11 | 0,1 | 0,1 |
| N4 | 0,1 | 0 | Z10 | 0,1 | 0,1 |
| Pln7 | 0,2 | 0,1 | Z9 | 0,1 | 0,1 |
| Pln8 | 0,1 | 0,1 | Z8 | 0,2 | 0,1 |
| Pln9 | 0,1 | 0 | Z7 | 0,2 | 0,2 |
| Pln10 | 0,2 | 0,1 | R2 | 0,1 | 0 |
| Pln11 | 0,1 | 0 | Pln1 | 0,2 | 0,1 |
| R5 | 0,1 | 0 | Pln2 | 0,1 | 0 |
| C02 | 0,1 | 0 | Pln3 | 0,1 | 0 |
| Cms7 | 0,1 | 0,1 | Pln4 | 0,1 | 0 |
| Cms5 | 0,1 | 0 | Pln5 | 0,1 | 0 |
| Cms3 | 0,1 | 0 | N1 | 0,1 | 0 |
| Cms1 | 0,1 | 0,1 | N2 | 0,1 | 0 |
| C01 | 0,1 | 0 | Pps01 | 0,2 | 0,1 |
| Z5 | 0,1 | 0 | Lc2 | 0,3 | 0 |
| Z4 | 0,1 | 0 | Pps02 | 0,2 | 0,1 |
| Z3 | 0,1 | 0 | Lc5 | 0,3 | 0,1 |
| Z2 | 0,1 | 0 | | | |

**Intra individuel statique (n=4 répétitions)
Sujet 5**

| | moy. | σ | | moy. | σ |
|-------|------|----------|-------|------|----------|
| M1 | 0,0 | 0,0 | Z1 | 0,4 | 0,3 |
| M2 | 0,0 | 0,0 | BZ1 | 0,3 | 0,3 |
| M3 | 0,0 | 0,0 | BZ2 | 0,3 | 0,2 |
| A1 | 0,4 | 0,4 | BZ3 | 0,5 | 0,3 |
| A2 | 0,3 | 0,3 | BZ4 | 0,4 | 0,2 |
| A3 | 0,4 | 0,4 | BZ5 | 0,3 | 0,2 |
| F1 | 0,3 | 0,2 | Dao1 | 0,2 | 0,2 |
| F2 | 0,2 | 0,2 | Dao2 | 0,3 | 0,2 |
| F3 | 0,2 | 0,2 | Dao3 | 0,4 | 0,4 |
| F4 | 0,2 | 0,2 | B6 | 0,4 | 0,3 |
| F5 | 0,2 | 0,2 | B5 | 0,3 | 0,3 |
| F6 | 0,2 | 0,2 | B4 | 0,3 | 0,3 |
| F7 | 0,2 | 0,2 | B3 | 0,6 | 0,5 |
| S1 | 0,3 | 0,3 | B2 | 0,3 | 0,3 |
| S2 | 0,3 | 0,2 | B1 | 0,2 | 0,0 |
| S3 | 0,3 | 0,2 | Cmi1 | 0,2 | 0,1 |
| S4 | 0,2 | 0,2 | Cmi3 | 0,3 | 0,1 |
| S5 | 0,2 | 0,2 | Cmi5 | 0,2 | 0,1 |
| G0 | 0,2 | 0,2 | H3 | 0,3 | 0,1 |
| S6 | 0,1 | 0,0 | H1 | 0,3 | 0,1 |
| S7 | 0,3 | 0,2 | H0 | 0,3 | 0,2 |
| S8 | 0,2 | 0,1 | M0 | 0,3 | 0,2 |
| S9 | 0,3 | 0,2 | H6 | 0,3 | 0,2 |
| S10 | 0,2 | 0,2 | H4 | 0,2 | 0,2 |
| D1 | 0,2 | 0,1 | Dao4 | 0,2 | 0,2 |
| D2 | 0,1 | 0,1 | Dao5 | 0,3 | 0,2 |
| D3 | 0,1 | 0,1 | Dao6 | 0,3 | 0,2 |
| D4 | 0,1 | 0,0 | B12 | 0,3 | 0,2 |
| Ca01 | 0,3 | 0,3 | B11 | 0,3 | 0,2 |
| VI1 | 0,3 | 0,2 | B10 | 0,3 | 0,3 |
| VI2 | 0,3 | 0,2 | B9 | 0,3 | 0,3 |
| VI3 | 0,3 | 0,2 | B8 | 0,3 | 0,3 |
| Ca02 | 0,3 | 0,2 | B7 | 0,5 | 0,5 |
| Ca03 | 0,2 | 0,2 | BZ6 | 0,3 | 0,3 |
| VI4 | 0,2 | 0,2 | BZ7 | 0,3 | 0,2 |
| VI5 | 0,2 | 0,2 | BZ8 | 0,2 | 0,1 |
| VI6 | 0,3 | 0,2 | BZ9 | 0,3 | 0,3 |
| Ca04 | 0,4 | 0,2 | BZ10 | 0,2 | 0,2 |
| N3 | 0,2 | 0,1 | Z11 | 0,3 | 0,2 |
| N4 | 0,2 | 0,1 | Z10 | 0,2 | 0,2 |
| Pln7 | 0,2 | 0,1 | Z9 | 0,2 | 0,2 |
| Pln8 | 0,2 | 0,2 | Z8 | 0,2 | 0,2 |
| Pln9 | 0,2 | 0,1 | Z7 | 0,3 | 0,2 |
| Pln10 | 0,2 | 0,2 | R2 | 0,2 | 0,2 |
| Pln11 | 0,2 | 0,2 | Pln1 | 0,4 | 0,5 |
| R5 | 0,2 | 0,2 | Pln2 | 0,2 | 0,2 |
| C02 | 0,2 | 0,2 | Pln3 | 0,2 | 0,2 |
| Cms7 | 0,2 | 0,2 | Pln4 | 0,3 | 0,2 |
| Cms5 | 0,2 | 0,2 | Pln5 | 0,3 | 0,2 |
| Cms3 | 0,2 | 0,1 | N1 | 0,2 | 0,1 |
| Cms1 | 0,2 | 0,2 | N2 | 0,2 | 0,2 |
| C01 | 0,2 | 0,2 | Pps01 | 0,3 | 0,2 |
| Z5 | 0,2 | 0,2 | Lc2 | 0,3 | 0,2 |
| Z4 | 0,3 | 0,3 | Pps02 | 0,3 | 0,2 |
| Z3 | 0,3 | 0,2 | Lc5 | 0,3 | 0,2 |
| Z2 | 0,3 | 0,3 | | | |

Annexe IX : Valeurs intra individuelles caractéristiques des 111 marqueurs pour le protocole complet (5 mouvements). 2 répétitions sur trois sujets).

*Intra individuel complet (n=2 répétitions)
Sujet 1*

| | moy. | σ | | moy. | σ |
|-------|------|----------|-------|------|----------|
| M1 | 0,0 | 0,0 | Z1 | 0,9 | 0,3 |
| M2 | 0,0 | 0,0 | BZ1 | 0,7 | na |
| M3 | 0,0 | 0,0 | BZ2 | 1,2 | 0,3 |
| A1 | 0,8 | 0,1 | BZ3 | 1,7 | 0,3 |
| A2 | 0,8 | 0,1 | BZ4 | 2,1 | 0,2 |
| A3 | 0,8 | 0,1 | BZ5 | 2,2 | 0,0 |
| F1 | 1,2 | 0,8 | Dao1 | 2,6 | 0,4 |
| F2 | 1,2 | 0,8 | Dao2 | 2,2 | 0,3 |
| F3 | 0,9 | 0,7 | Dao3 | 2,3 | 0,5 |
| F4 | 0,5 | 0,2 | B6 | 1,8 | 0,2 |
| F5 | 0,5 | 0,1 | B5 | 1,7 | 0,0 |
| F6 | 0,7 | 0,3 | B4 | 2,0 | 0,0 |
| F7 | 1,0 | 0,4 | B3 | 1,6 | 0,1 |
| S1 | 0,9 | 0,0 | B2 | 1,3 | 0,5 |
| S2 | 1,4 | 0,7 | B1 | 1,9 | 1,0 |
| S3 | 1,6 | 1,1 | Cmi1 | 2,8 | 0,4 |
| S4 | 1,1 | 0,9 | Cmi3 | 2,9 | 0,6 |
| S5 | 0,8 | 0,5 | Cmi5 | 3,3 | 0,3 |
| G0 | 0,4 | 0,2 | H3 | 2,3 | 0,1 |
| S6 | 0,5 | 0,1 | H1 | 2,4 | 0,2 |
| S7 | 0,8 | 0,2 | H0 | 2,7 | 0,0 |
| S8 | 1,2 | 0,2 | M0 | 2,4 | 0,1 |
| S9 | 1,1 | 0,3 | H6 | 2,4 | 0,0 |
| S10 | 1,0 | 0,0 | H4 | 2,9 | 0,2 |
| D1 | 0,3 | 0,1 | Dao4 | 2,8 | 0,4 |
| D2 | 0,3 | 0,1 | Dao5 | 2,0 | 0,1 |
| D3 | 0,6 | 0,1 | Dao6 | 2,0 | 0,2 |
| D4 | 0,9 | 0,3 | B12 | 1,7 | na |
| Ca01 | 1,1 | 0,4 | B11 | 1,6 | 0,2 |
| V11 | 1,3 | 0,3 | B10 | 1,7 | 0,2 |
| V12 | 0,9 | 0,1 | B9 | 1,9 | 0,2 |
| V13 | 0,5 | 0,1 | B8 | 1,4 | 0,1 |
| Ca02 | 0,5 | 0,0 | B7 | 1,2 | 0,0 |
| Ca03 | 0,6 | 0,4 | BZ6 | 1,2 | 0,1 |
| V14 | 0,6 | 0,1 | BZ7 | 1,5 | 0,3 |
| V15 | 1,1 | 0,2 | BZ8 | 2,1 | 0,3 |
| V16 | 1,4 | 0,3 | BZ9 | 2,2 | 0,3 |
| Ca04 | 1,2 | 0,6 | BZ10 | 2,4 | 0,2 |
| N3 | 0,4 | 0,0 | Z11 | 2,5 | 0,3 |
| N4 | 0,5 | na | Z10 | 2,0 | 0,6 |
| Pln7 | 0,4 | 0,0 | Z9 | 1,9 | 0,5 |
| Pln8 | 0,6 | 0,2 | Z8 | 1,4 | 0,3 |
| Pln9 | 0,9 | na | Z7 | 1,1 | 0,3 |
| Pln10 | 1,9 | na | R2 | 1,0 | 0,1 |
| Pln11 | 2,1 | na | Pln1 | 0,3 | na |
| R5 | 1,1 | 0,3 | Pln2 | 0,4 | 0,1 |
| C02 | 3,5 | 0,5 | Pln3 | 0,7 | 0,0 |
| Cms7 | 2,7 | 0,6 | Pln4 | 1,3 | 0,0 |
| Cms5 | 2,1 | 0,4 | Pln5 | 1,7 | 0,4 |
| Cms3 | 2,1 | 0,2 | N1 | 0,6 | 0,1 |
| Cms1 | 2,4 | 0,2 | N2 | 0,4 | na |
| C01 | 3,5 | 0,2 | Pps01 | na | na |
| Z5 | 2,0 | 0,3 | Lc2 | na | na |
| Z4 | 1,9 | 0,5 | Pps02 | na | na |
| Z3 | 1,6 | 0,5 | Lc5 | 1,2 | na |
| Z2 | 1,2 | 0,4 | | | |

*Intra individuel complet (n=2 répétitions)
Sujet 2*

| | moy. | σ | | moy. | σ |
|-------|------|----------|-------|------|----------|
| M1 | 0,0 | 0,0 | Z1 | 1,1 | na |
| M2 | 0,0 | 0,0 | BZ1 | 1,5 | 0,4 |
| M3 | 0,0 | 0,0 | BZ2 | 1,5 | 0,3 |
| A1 | 1,2 | 0,3 | BZ3 | 1,6 | 0,3 |
| A2 | 1,2 | 0,2 | BZ4 | 1,9 | 0,2 |
| A3 | 1,2 | 0,3 | BZ5 | 1,7 | 0,3 |
| F1 | 0,9 | 0,3 | Dao1 | 2,1 | 0,6 |
| F2 | 0,8 | 0,3 | Dao2 | 1,5 | 0,3 |
| F3 | 0,8 | 0,3 | Dao3 | 1,2 | 0,1 |
| F4 | 0,8 | 0,3 | B6 | 1,5 | 0,3 |
| F5 | 0,8 | 0,3 | B5 | 1,5 | 0,0 |
| F6 | 0,8 | 0,3 | B4 | 1,4 | 0,1 |
| F7 | 0,9 | 0,3 | B3 | 1,2 | 0,1 |
| S1 | 1,0 | na | B2 | 1,7 | 1,1 |
| S2 | 1,0 | 0,4 | B1 | na | na |
| S3 | 1,0 | 0,3 | Cmi1 | 2,3 | na |
| S4 | 0,9 | 0,2 | Cmi3 | 1,7 | 0,2 |
| S5 | 0,9 | 0,2 | Cmi5 | 1,8 | na |
| G0 | 0,5 | 0,2 | H3 | 1,2 | 0,2 |
| S6 | 0,8 | 0,2 | H1 | 1,4 | 0,0 |
| S7 | 1,0 | 0,2 | H0 | 1,3 | 0,2 |
| S8 | 1,0 | 0,3 | M0 | 1,3 | 0,3 |
| S9 | 1,0 | 0,3 | H6 | 1,4 | 0,1 |
| S10 | 0,6 | na | H4 | 1,8 | 0,1 |
| D1 | 0,4 | 0,1 | Dao4 | 2,7 | 0,6 |
| D2 | 0,4 | 0,1 | Dao5 | 1,9 | 0,2 |
| D3 | 0,5 | 0,0 | Dao6 | 1,6 | 0,1 |
| D4 | 0,7 | na | B12 | 1,8 | 0,0 |
| Ca01 | 1,2 | 0,1 | B11 | 1,7 | 0,1 |
| V11 | 1,5 | na | B10 | 1,5 | 0,2 |
| V12 | 1,7 | 0,1 | B9 | 1,4 | 0,3 |
| V13 | 1,2 | 0,2 | B8 | 1,3 | 0,4 |
| Ca02 | 0,7 | 0,1 | B7 | 1,2 | 0,1 |
| Ca03 | 0,6 | 0,1 | BZ6 | 1,3 | 0,3 |
| V14 | 1,2 | 0,1 | BZ7 | 1,7 | 0,4 |
| V15 | 1,9 | 0,0 | BZ8 | 2,1 | 0,0 |
| V16 | 1,9 | 0,1 | BZ9 | 2,2 | 0,0 |
| Ca04 | 1,2 | 0,2 | BZ10 | 2,3 | 0,3 |
| N3 | 0,6 | 0,1 | Z11 | 2,6 | 0,5 |
| N4 | 1,1 | 0,2 | Z10 | 2,4 | 0,4 |
| Pln7 | 0,5 | 0,1 | Z9 | 2,6 | 0,0 |
| Pln8 | 0,5 | 0,2 | Z8 | 1,8 | 0,2 |
| Pln9 | 0,8 | na | Z7 | 1,3 | 0,2 |
| Pln10 | 2,0 | na | R2 | 1,7 | 0,4 |
| Pln11 | 2,3 | 0,3 | Pln1 | 0,5 | 0,2 |
| R5 | 2,0 | 0,3 | Pln2 | 0,6 | 0,2 |
| C02 | 3,5 | 1,1 | Pln3 | 0,9 | na |
| Cms7 | 3,3 | na | Pln4 | 1,8 | na |
| Cms5 | 2,0 | 0,7 | Pln5 | 1,7 | 0,5 |
| Cms3 | 1,7 | 0,3 | N1 | 0,9 | 0,0 |
| Cms1 | 2,1 | na | N2 | 0,5 | 0,2 |
| C01 | 2,8 | 0,5 | Pps01 | na | na |
| Z5 | 1,9 | 0,5 | Lc2 | na | na |
| Z4 | 1,9 | 0,5 | Pps02 | na | na |
| Z3 | 1,8 | 0,3 | Lc5 | na | na |
| Z2 | 1,3 | 0,1 | | | |

*Intra individuel complet (n=2 répétitions)
Sujet 5*

| | moy. | σ | | moy. | σ |
|-------|------|----------|-------|------|----------|
| M1 | 0,0 | 0,0 | Z1 | 1,1 | 0,2 |
| M2 | 0,0 | 0,0 | BZ1 | 0,9 | 0,2 |
| M3 | 0,0 | 0,0 | BZ2 | 1,1 | 0,0 |
| A1 | 1,0 | 0,6 | BZ3 | 1,4 | 0,1 |
| A2 | 1,0 | 0,7 | BZ4 | 1,6 | 0,2 |
| A3 | 0,9 | 0,6 | BZ5 | 1,9 | 0,2 |
| F1 | 1,9 | 1,1 | Dao1 | 2,2 | 0,2 |
| F2 | 1,6 | 0,8 | Dao2 | 1,6 | na |
| F3 | 1,0 | 0,2 | Dao3 | 1,3 | 0,1 |
| F4 | 0,8 | 0,1 | B6 | 1,5 | 0,2 |
| F5 | 0,8 | 0,0 | B5 | 1,3 | 0,2 |
| F6 | 1,1 | 0,2 | B4 | 1,1 | 0,2 |
| F7 | 1,2 | 0,3 | B3 | 1,3 | 0,4 |
| S1 | 1,7 | 0,7 | B2 | 0,9 | 0,0 |
| S2 | 2,3 | 1,4 | B1 | 0,9 | 0,1 |
| S3 | 2,7 | 1,9 | Cmi1 | 2,9 | 0,1 |
| S4 | 2,2 | 1,5 | Cmi3 | 3,7 | na |
| S5 | 1,3 | 0,7 | Cmi5 | 3,3 | 0,3 |
| G0 | 0,8 | 0,2 | H3 | 2,3 | 0,0 |
| S6 | 0,9 | 0,1 | H1 | 2,1 | 0,1 |
| S7 | 1,3 | 0,6 | H0 | 2,2 | 0,1 |
| S8 | 1,9 | 0,9 | M0 | 2,3 | 0,0 |
| S9 | 1,8 | 0,8 | H6 | 2,2 | 0,0 |
| S10 | 1,2 | 0,3 | H4 | 2,4 | 0,0 |
| D1 | 0,4 | 0,2 | Dao4 | 2,3 | 0,1 |
| D2 | 0,4 | 0,1 | Dao5 | 1,7 | na |
| D3 | 0,6 | 0,1 | Dao6 | 1,4 | na |
| D4 | 1,0 | 0,2 | B12 | 1,5 | 0,1 |
| Ca01 | 1,1 | 0,1 | B11 | 1,4 | 0,1 |
| V11 | 1,4 | 0,0 | B10 | 1,2 | 0,1 |
| V12 | 1,4 | 0,1 | B9 | 1,1 | na |
| V13 | 0,9 | 0,0 | B8 | 0,9 | 0,1 |
| Ca02 | 0,5 | ##### | B7 | na | na |
| Ca03 | 0,9 | 0,8 | BZ6 | 0,8 | 0,1 |
| V14 | 1,3 | 0,1 | BZ7 | 1,1 | 0,1 |
| V15 | 1,7 | 0,2 | BZ8 | 1,5 | 0,1 |
| V16 | 1,4 | 0,1 | BZ9 | 1,7 | 0,1 |
| Ca04 | 1,0 | ##### | BZ10 | 2,0 | na |
| N3 | 0,6 | 0,1 | Z11 | 2,1 | 0,2 |
| N4 | 1,0 | 0,0 | Z10 | 2,0 | 0,1 |
| Pln7 | 0,4 | 0,1 | Z9 | 1,7 | 0,2 |
| Pln8 | 0,4 | 0,0 | Z8 | 1,3 | 0,0 |
| Pln9 | 0,9 | na | Z7 | 1,0 | 0,0 |
| Pln10 | 1,5 | 0,0 | R2 | 1,6 | 0,0 |
| Pln11 | 1,8 | 0,0 | Pln1 | 0,7 | na |
| R5 | 1,9 | 0,2 | Pln2 | 0,4 | 0,1 |
| C02 | 3,3 | 0,2 | Pln3 | 0,9 | 0,1 |
| Cms7 | 3,2 | 0,1 | Pln4 | 1,5 | 0,2 |
| Cms5 | 2,4 | 0,0 | Pln5 | 1,7 | na |
| Cms3 | 2,2 | 0,1 | N1 | 1,0 | na |
| Cms1 | 2,5 | 0,1 | N2 | 0,6 | 0,0 |
| C01 | 3,1 | 0,1 | Pps01 | 1,8 | na |
| Z5 | 2,0 | 0,2 | Lc2 | na | na |
| Z4 | 1,8 | 0,0 | Pps02 | 1,5 | na |
| Z3 | 1,6 | 0,0 | Lc5 | na | na |
| Z2 | 1,2 | 0,1 | | | |

Annexe X : Classes k-mean de marqueurs pour les amplitudes maximales.

| Classe | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|
| <i>Marqueurs</i> | 33 | 25 | 27 | 24 | 2 |
| <i>Variance intra-classe</i> | 4,736 | 7,555 | 6,788 | 9,478 | 2,116 |
| <i>Distance minimale au barycentre</i> | 0,575 | 0,887 | 0,981 | 0,569 | 1,029 |
| <i>Distance moyenne au barycentre</i> | 2,047 | 2,622 | 2,391 | 2,672 | 1,029 |
| <i>Distance maximale au barycentre</i> | 2,934 | 3,590 | 4,247 | 5,839 | 1,029 |
| | Ma1 | F1 | Pln10 | Pln11 | Lc2 |
| | Ma2 | F7 | R5 | C02 | Lc5 |
| | Ma3 | S1 | Z4 | Cms7 | |
| | A1 | S2 | Z3 | Cms5 | |
| | A2 | S3 | BZ2 | Cms3 | |
| | A3 | S4 | BZ3 | Cms1 | |
| | F2 | S7 | BZ4 | C01 | |
| | F3 | S8 | Dao2 | Z5 | |
| | F4 | S9 | Dao3 | BZ5 | |
| | F5 | S10 | B6 | Dao1 | |
| | F6 | Ca01 | B5 | Cmi1 | |
| | S5 | Vl1 | B4 | Cmi3 | |
| | G0 | Vl2 | B3 | Cmi5 | |
| | S6 | Vl3 | Dao5 | H3 | |
| | D1 | Vl5 | Dao6 | H1 | |
| | D2 | Vl6 | B12 | H0 | |
| | D3 | Ca04 | B11 | M0 | |
| | D4 | Z2 | B10 | H6 | |
| | Ca02 | Z1 | B9 | H4 | |
| | Ca03 | BZ1 | BZ7 | Dao4 | |
| | Vl4 | BZ6 | BZ8 | BZ9 | |
| | N3 | Z8 | Z10 | BZ10 | |
| | N4 | Z7 | Z9 | Z11 | |
| | Pln7 | Pps01 | R2 | Pln5 | |
| | Pln8 | Pps02 | Pln3 | | |
| | Pln9 | | Pln4 | | |
| | B2 | | N1 | | |
| | B1 | | | | |
| | B8 | | | | |
| | B7 | | | | |
| | Pln1 | | | | |
| | Pln2 | | | | |
| | N2 | | | | |

Annexe XI : Données issue de l'étude.

Les tableaux complets des données issues de l'étude sont disponibles sur le CD-Rom ci-joint.

