



HAL
open science

Caractérisation clinique, biomécanique et retentissement sur la qualité de vie des composantes neuromusculaires altérant la motricité faciale dans la parésie faciale périphérique chronique

Marjolaine Baude

► To cite this version:

Marjolaine Baude. Caractérisation clinique, biomécanique et retentissement sur la qualité de vie des composantes neuromusculaires altérant la motricité faciale dans la parésie faciale périphérique chronique. Sciences agricoles. Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne - Paris 12, 2024. Français. ⟨NNT : 2024PA120043⟩. ⟨tel-05536722⟩

HAL Id: tel-05536722

<https://theses.hal.science/tel-05536722v1>

Submitted on 4 Mar 2026

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.



HAL Authorization

THÈSE DE SCIENCES

Présentée à L'UNIVERSITE PARIS-EST CRETEIL VAL DE MARNE

En vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Spécialité : *Pathologie et Recherche Clinique*

**Caractérisation clinique, biomécanique et retentissement sur la
qualité de vie des composantes neuromusculaires altérant la
motricité faciale dans la parésie faciale périphérique chronique**

Par

Marjolaine BAUDE

Thèse dirigée par

Le Professeur Jean-Michel GRACIES et le Professeur Etienne AUDUREAU

Soutenue publiquement le 19 décembre 2024

Devant le Jury composé de :

M. Jean-Paul MENINGAUD

Professeur, Université Paris-Est-Créteil, Hôpital Universitaire Henri Mondor, Assistance Publique-Hôpitaux de Paris, Créteil

Président du Jury, Examineur

M. Bernard DEVAUCHELLE

Professeur Emérite, Université d'Amiens, Centre Hospitalier Universitaire d'Amiens

Rapporteur

M. Raphael GROSS

Professeur, Université de Nantes, Centre Hospitalier Universitaire de Nantes

Rapporteur

Mme Stéphanie DAKPE

Professeur, Université d'Amiens, Centre Hospitalier Universitaire d'Amiens

Examineur

Mme Manuella FOURNIER-MEHOUAS

Professeur, Université de Nice, Centre Hospitalier Universitaire de Nice

Examineur

M. Laurent TATU

Professeur, Université de Besançon, Centre Hospitalier Universitaire de Besançon

Examineur

Hôpitaux Universitaires Henri Mondor, AP-HP, UPEC, Créteil
Laboratoire Bioingénierie, Tissus et Neuroplasticité (BIOTN), UPEC, Créteil

Remerciements

Mes remerciements s'adressent un premier lieu à l'ensemble des membres du jury de cette thèse qui ont accepté d'évaluer ce travail et de m'accompagner durant l'épreuve de soutenance.

Je remercie ensuite mes directeurs de thèse, le Pr Jean-Michel GRACIES et le Pr Etienne AUDUREAU, de m'avoir à la fois soutenue et aidée depuis trois ans.

Je remercie l'ensemble de mes patients qui sont une source d'inspiration au quotidien. Je remercie également les patients qui ont répondu présent pour l'étude VISAGE et qui ont permis et permettent encore sa réalisation.

Je remercie tout particulièrement mes deux binômes dans VISAGE : Marina, pour ton travail, ton aide et ton soutien sans faille ; ainsi que Caroline, pour ta clairvoyance et ton accompagnement depuis bientôt dix ans.

Je remercie mon binôme médical depuis plus de dix ans, Mireille : pour ton soutien inconditionnel, ta compréhension, ta clairvoyance, et pour les bons moments passés ensemble.

Enfin et surtout, je remercie mes proches, et plus particulièrement ceux d'entre eux qui se reconnaîtront et dont la patience, la compréhension, et le soutien ont rendu ce travail possible.

A mes parents et à ma belle-famille, pour leur aide et leur confiance. A Olivier, à André et à Dominique, avec qui j'aurais voulu partager cette parenthèse importante.

A Louis et à Jules, mes rayons de soleil.

Enfin et surtout, à Pierre-André, pour ton soutien, ta patience, ta bienveillance et ta force au quotidien.

Avant-propos

Les travaux de cette thèse ont été menés au sein du Service de Rééducation Neurolocomotrice de l'Hôpital Henri Mondor de Créteil, dirigé par le Pr Jean-Michel GRACIES (PU-PH), ainsi que dans l'Equipe d'Accueil 7377 *Bioingénierie, Tissus et Neuroplasticité* (BIOTN) de l'Université Paris-Est Créteil (UPEC) dirigée par le Pr Mustapha ZIDI (PU). La problématique de la recherche a été élaborée à partir d'observations cliniques chez des patients présentant une lésion du contingent moteur du nerf facial ayant entraîné une parésie voire une paralysie de l'hémiface homolatérale, et se présentant à notre consultation de neurorééducation au stade chronicisé de la pathologie (*i.e.* plus de 12 mois).

Ces observations couplées à l'étude de la littérature ont fait émerger un certain nombre de préoccupations de travail et d'intérêt tels que : la classification nosologique des différentes composantes neuromusculaires de la parésie faciale et leur quantification clinique au repos et en conversation grâce à une nouvelle échelle plus précise que les outils existants (*Echelle de Créteil*), afin de permettre leur caractérisation clinique mais également biomécanique, le développement d'outils d'évaluation des mouvements faciaux, à la fois subjectifs et objectifs, ainsi qu'un protocole d'évaluation qui puisse dans le futur s'intégrer dans le cadre de la pratique courante, et enfin le besoin urgent de proposer des études de haut niveau de preuve pour explorer les effets de programmes de rééducation, quel que soit le stade de la pathologie.

L'obtention du Programme Hospitalier de Recherche Clinique Inter-Régional (PHRC-IR) **VISAGE** divisé en une phase dite *préclinique* sur sujets sains puis une phase *clinique* avec des sujets présentant une parésie faciale chronique, a été le socle de ce travail de thèse. La finalité de ce travail double : enrichir les connaissances dans le domaine, et aussi contribuer à intégrer à part entière l'évaluation et le traitement de la parésie faciale dans le domaine d'activité habituel de la communauté neurorééducative et plus généralement dans la Médecine Physique et de Réadaptation.

Résumé en français

La parésie faciale périphérique (PFP) est une affection fréquente qui se caractérise au stade aigu par une difficulté à mobiliser activement les muscles de l'hémiface atteinte, que ce soit de manière automatique, émotionnelle ou volontaire, se traduisant par l'apparition d'une asymétrie faciale pathologique et une diminution du tonus facial.

La parésie faciale peut récupérer en quelques jours ou semaines, ou se chroniciser, en fonction de plusieurs paramètres, notamment le degré de l'atteinte nerveuse et sa cause. Dans la majorité des cas, ce passage au stade chronique s'accompagne de la survenue associée de trois formes d'hyperactivité musculaire faciale *involontaire*, présentes sur la même hémiface, qui finissent par coexister avec la **parésie** : la **contracture** correspond à une contraction tonique permanente d'un groupe musculaire cervico-facial au repos ; le **spasme**, décelé au repos ou en activité conversationnelle, se présente sous la forme d'une contraction brève (<100 ms) et localisée d'un ou plusieurs muscles cervico-faciaux ; enfin la **syncinésie** se manifeste par la coactivation excessive d'un ou plusieurs muscles cervico-faciaux lors d'une commande initiale destinée à un autre groupe musculaire. Ces trois signes d'hyperactivité musculaire sont peu étudiés dans la littérature, notamment la littérature de rééducation, alors qu'en se surajoutant à la parésie persistante, ils pourraient entraver par eux-mêmes la qualité de vie des patients.

L'objectif de ce travail de thèse a été de revisiter la caractérisation des quatre composantes neuromusculaires de la PFP chronique (*i.e.* > 12 mois) sur les plans clinique et biomécanique, parésie, contractures, spasmes et syncinésies, et d'évaluer leur influence spécifique sur la qualité de vie perçue. Il s'inscrit au sein d'un projet hospitalier de recherche clinique inter-régional appelé VISAGE, qui comporte deux phases successives.

Une première phase, dite **préclinique**, déjà publiée, a permis de mettre au point un protocole d'analyse tridimensionnelle du visage au repos et lors du mouvement volontaire chez le sujet sans lésion du nerf facial. Trois étapes ont été nécessaires : 1) l'élaboration d'un modèle

géométrique d'analyse tridimensionnelle du visage et d'un protocole de pose de marqueurs faciaux, avec mesures de sa fiabilité test-retest ; 2) l'acquisition du déplacement des marqueurs et le traitement des données par un dispositif portable d'enregistrement cinématique appelé *Cara*TM (VICON), constitué d'un casque muni de quatre caméras enregistrant les mouvements du visage et relié à un ordinateur portable hébergeant deux logiciels d'acquisition et de traitement des données, *Caralife*TM et *Carapost*TM ; 3) le développement d'un soft sur Matlab ayant permis d'obtenir une base de données normatives sur 53 sujets non parétiques faciaux, comprenant l'étude des différentiels d'amplitudes entre le repos et la contraction maximale volontaire de 10 muscles faciaux, ainsi que le développement d'indices d'asymétrie spécifiques (indices d'asymétrie et indices de Procruste). Nous avons ainsi pu identifier des seuils de 10% pour l'indice d'asymétrie et de 6 % pour l'indice de Procruste, au-delà desquels les mouvements faciaux doivent être considérés comme pathologiquement asymétriques.

La seconde phase, **clinique**, est un essai contrôlé randomisé en deux groupes parallèles, en cours, comparant les effets cliniques, biomécaniques et sur la qualité de vie de deux programmes de six mois de rééducation faciale (stratégie des Contrats d'Autorééducation Guidée avec travail de renforcement moteur et de précision sur certains muscles faciaux vs rééducation conventionnelle en libéral) chez le sujet présentant une PFP chronique. Le protocole de l'essai thérapeutique a été publié. Une seconde base de données tridimensionnelle a été obtenue au premier jour d'évaluation de 46 participants parétiques faciaux. Nous avons utilisé deux échelles de motricité faciale chez le sujet avec PFP, l'échelle actuelle de référence *Sunnybrook Facial Grading System* et une échelle originale que nous avons nommée *Echelle de Créteil*, qui quantifie de façon séparée les quatre composantes du trouble moteur facial dans la PFP chronique, et au sein de la composante *parésie*, distingue deux quantifications de la parésie, sur commande volontaire et sur commande automatico-émotionnelle. Ces deux échelles ont été corrélées entre elles et avec des paramètres subjectifs cliniques recueillis par

auto-questionnaires explorant en particulier des scores de qualité de vie. Les résultats font l'objet d'un article spécifique en préparation qui sera présenté en soutenance.

Mots-clés : Paralysie faciale périphérique, parésie faciale, spasme facial, contracture faciale, syncinésies faciales, cocontractions faciales, cinématique, asymétrie faciale, motion capture, analyse tridimensionnelle du mouvement, mouvements faciaux, qualité de vie.

Titre et Résumé en anglais

Title: Clinical and biomechanical characterization and impact on perceived quality of life of pathophysiological components of facial motor control impairment in chronic peripheral facial paresis.

Abstract:

Peripheral facial paresis (PFP) is a common disorder characterized in the acute stage by a quantitative reduction in the recruitment of motor units from the skin muscles of the face and neck innervated by the facial nerve. In acute stages, **paresis** (sometimes plegia), is manifested by difficulty in actively mobilizing muscles in the affected hemiface, whether automatically, emotionally, or voluntarily, and by facial tone reduction, resulting in the emergence of marked facial asymmetry.

Facial paresis may recover within days or weeks. It may also become chronic, depending in particular on the degree and cause of the nerve damage. In the majority of cases, the transition to chronic stages is accompanied by the emergence of several forms of facial *involuntary* muscle overactivity, all of which end up co-existing with **paresis** in the same hemiface: ‘**contracture**’ (hemifacial dystonia) is a permanent tonic contraction of cervicofacial muscles at rest; **spasm**, detected at rest or during conversation, is a brief (<100 ms), localized contraction of cervicofacial muscles; finally, **synkinesis** is manifested by the excessive contraction of one or more cervicofacial muscles during voluntary or involuntary command directed to another muscle group. These three types of facial muscle overactivity are poorly individualized in the literature, particularly the PM&R literature, yet they may specifically deteriorate quality of life of patients with facial paresis.

The aim of this thesis was to better characterize and clinically quantify the four neuromuscular components of chronic PFP (*i.e.*, > 12 months) from clinical and biomechanical points of view and as far as their impact on perceived quality of life: paresis, contracture, spasm

and facial synkinesis. It is part of a larger interregional government-funded clinical research project called VISAGE, which comprises two consecutive phases.

The first, '**preclinical**' phase, now published, was focused on developing a protocol for three-dimensional analysis of the face at rest and during voluntary movements in 'healthy' subjects. This involved three steps: 1) development of a geometric model for three-dimensional analysis of the face, together with a quantification of its reliability when applying facial markers of interest; 2) acquisition of marker displacement and data processing using a portable motion capture system called *Cara*TM (VICON), consisting of a helmet equipped with four cameras recording the face and connected to a laptop hosting two data acquisition and processing software packages, *Caralife*TM and *Carapost*TM; 3) the writing of a Matlab software package to obtain a normative database from 53 participants, including the study of amplitude differentials between rest and maximum contractions, as well as the use of asymmetry and procrustean indices at rest and during 10 bilateral facial movements of maximum amplitude. This allowed the identification of common thresholds of 10% for the asymmetry index and of 6 % for the Procruste index, beyond which facial motions would be considered abnormally asymmetric.

The second, **clinical phase** of VISAGE, is an ongoing randomized controlled parallel-group trial, comparing the clinical, biomechanical and quality-of-life effects of two six-month facial rehabilitation programs (Guided Self-rehabilitation Contract strategy using strength and accuracy training on key facial muscles vs. conventional community-based rehabilitation) in participants with chronic PFP. The clinical trial protocol has been published. A second tridimensional database was generated from the Day 1 visit of the first 46 facial paretic subjects. We used two clinical scales, the current gold standard *Sunnybrook Facial Grading System* and an original scale created in the department, named the *Creteil Scale*, which distinguishes the quantification of the four major components of facial motor control impairment in chronic PFP and, as for paresis, separately quantifies paresis upon voluntary command and upon

automatic/emotional command. Correlation was explored between these two scales and with self-questionnaires rating in particular scores of self-perceived quality of life. The findings constitute an original article in preparation which will be presented and discussed during the thesis defense.

Keywords: Peripheral facial paralysis, facial paresis, facial spasm, facial dystonia, facial synkinesis, facial cocontraction, kinematics, facial asymmetry, motion capture, tridimensional analysis, facial movements, quality of life.

Résumé vulgarisé pour le grand public en français

La parésie faciale périphérique (PFP) est une affection fréquente liée à une lésion du nerf facial, caractérisée par une difficulté à mobiliser les muscles d'une moitié du visage, de manière automatique, émotionnelle ou volontaire (**parésie**). Quand la récupération n'est pas totale, la persistance au stade chronique s'accompagne alors souvent de l'apparition d'une ou plusieurs formes distinctes d'hyperactivité musculaire faciale, involontaires et présentes sur la même hémiface : **contractures, spasmes et syncinésies**. En se surajoutant à la parésie persistante, elles altèrent encore davantage la qualité de vie des patients.

L'objectif de ce travail de thèse a été d'évaluer une nouvelle échelle clinique quantifiant séparément ces phénomènes et d'approfondir la caractérisation clinique et biomécanique, et le retentissement sur la qualité de vie perçue, des **quatre composantes neuromusculaires** de la PFP chronique (*i.e.* > 12 mois). Il s'inscrit dans le cadre d'un projet hospitalier de recherche clinique inter-régional de plus grande ampleur appelé VISAGE.

Résumé vulgarisé pour le grand public en anglais

Peripheral facial paresis (PFP) is a common condition caused by damage to the facial nerve. It is characterized by difficulty in mobilizing the muscles of the affected hemiface, automatically, emotionally or voluntarily (**paresis**). Recovery may be complete, but the condition may occasionally persist in a chronic stage, often accompanied by the emergence of one or more forms of involuntary muscle overactivity in the same hemiface, **contracture, spasms and synkinesis**. When superimposed on persistent paresis, they further impair quality of life.

The objective of this thesis was to evaluate a new clinical scale that separately quantifies these phenomena and to clinically and biomechanically characterize the **four neuromuscular components** of chronic PFP (*i.e.*, > 12 months) with in particular their impact on scores of self-

perceived quality of life. It is part of a larger inter-regional government-funded clinical research project called VISAGE.

Table des matières

Introduction générale.....	15
CHAPITRE I : Introduction	17
A. Nomenclature anatomique.....	17
B. Anatomie structurelle et fonctionnelle de la face et du cou	17
1. Préambule	17
2. Anatomie structurelle de la face et du cou	21
3. Principales fonctions de la face et du cou.....	47
C. Neuroanatomie et neurophysiologie des circuits neurologiques de la commande des muscles peauciers	49
1. Neuroanatomie du nerf facial et des muscles peauciers	49
2. Voies afférentes sensibles cervico-faciales	79
3. Voies motrices descendantes	94
D. Physiopathologie de la parésie faciale périphérique	102
1. Préambule : définition, épidémiologie, temporalité	102
2. Etiologies et évolution	103
3. Composantes motrices de la Parésie Faciale Périphérique.....	104
4. Quantification de la parésie faciale périphérique	113
CHAPITRE II : Présentation de l'étude VISAGE et délimitation du travail de thèse .	126
A. Introduction	126
B. Objectifs	128
C. Méthodes	129
1. Design de l'étude	129
2. Conception de la recherche et interventions.....	130
3. Procédures de la phase clinique de VISAGE	139
4. Populations et critères de sélection.....	140
5. Visites d'évaluation et de rééducation (J1, J90, J180) de la phase clinique.....	142
6. Critères d'évaluation de la phase clinique	144
7. Gestion des données	148
8. Contrôle des données.....	148
9. Avis éthique et enregistrement de l'essai	149
10. Nombre de sujets nécessaires.....	149
11. Description des méthodes statistiques	150
D. Discussion	152

E.	Délimitation du travail de thèse	154
CHAPITRE III : Base de données normatives tridimensionnelles faciales via un système de casque portatif chez le sujet sans lésion du nerf facial..... 156		
A.	Introduction	156
B.	Méthodes	162
1.	Protocole expérimental	162
2.	Logiciels Cara™ de VICON	166
3.	Traitement des données	166
C.	Résultats	170
1.	Précision du positionnement des marqueurs	170
2.	Amplitude de mouvement des marqueurs	170
3.	Indices d'asymétrie.....	178
D.	Discussion	181
1.	Analyse de l'amplitude de mouvement	181
2.	Analyse de la symétrie.....	182
3.	Protocole d'évaluation.....	184
E.	Limites et forces de l'étude	187
1.	Tolérance du protocole et faisabilité	187
2.	Limites	188
3.	Perspectives	188
F.	Conclusions	189
CHAPITRE IV : Corrélations entre l'Echelle de Créteil, le SFGS et des échelles de qualité de vie chez le patient parétique facial au stade chronique 190		
A.	Introduction	190
B.	Méthodes	192
1.	Conception de l'étude	192
2.	Critères de sélection.....	193
3.	Critères de jugement.....	193
4.	Avis éthique et accord de participation	195
5.	Analyses statistiques.....	196
6.	Nombre de sujets nécessaires	197
C.	Résultats	197
1.	Caractéristiques des participants	197
2.	Autoquestionnaires et SFGS.....	198
3.	Données de l'Echelle de Créteil	199
4.	Corrélations entre échelles cliniques et auto-questionnaires.....	200

D. Discussion	210
E. Conclusion.....	218
CHAPITRE V : Conclusions et perspectives	220
A. Conclusions	220
B. Perspectives	222
a. Etude VISAGE	222
b. Etude FACETOX	224
BIBLIOGRAPHIE	226
BIBLIOGRAPHIE PERSONNELLE	245
LISTE DES FIGURES.....	249
LISTE DES TABLEAUX	251
PUBLICATIONS LIEES A LA THESE.....	252
Guihard <i>et al.</i>, Biomed Research International, 2022.....	252
Baude <i>et al.</i>, BMC Neurology, 2023	264
Baude <i>et al.</i>, <i>in preparation</i>	278
POSTER POUR LES JOURNEES DE L'ED SVS 2023	311

Introduction générale

La parésie faciale périphérique est le trouble moteur le plus fréquent après une lésion du contingent moteur du nerf facial, par exemple une atteinte virale. La **parésie** hémifaciale peut être définie par une diminution quantitative du recrutement des unités motrices des muscles peauciers cervico-faciaux pouvant se manifester au repos (*tonus* facial diminué) ou pendant une conversation sous la forme d'une insuffisance d'activation musculaire automatique/émotionnelle, ainsi que lors d'une commande motrice délibérée volontaire. En fonction de la cause et du degré d'atteinte nerveuse, la récupération des patients peut être incomplète et un passage au stade chronique peut survenir à partir de 12 mois après la lésion. Celui-ci sera caractérisé par l'émergence de trois composantes d'hyperactivité neuromusculaire qui se surajouteront à la parésie hémifaciale. Ces trois autres altérations du contrôle musculaire facial, impliquant toutes une forme d'hyperactivité *involontaire* des muscles faciaux du côté affecté, apparaissent plusieurs semaines ou mois après la lésion et peuvent être détectées au repos, durant une commande automatique/émotionnelle (conversation) ou pendant une commande volontaire. La **contracture hémifaciale** est une contraction tonique permanente d'un ou de plusieurs muscles faciaux. La **syncinésie hémifaciale** est une cocontraction excessive d'un ou plusieurs muscles faciaux, lors d'une commande émotionnelle ou volontaire destinée à un autre groupe musculaire facial. Il s'agit d'une forme particulièrement gênante d'hyperactivité pour laquelle un lien élevé avec la qualité de vie liée à la PFP a été suggéré. Enfin, le **spasme hémifacial** est une contraction brève et localisée d'un ou de plusieurs muscles faciaux, détecté au repos ou pendant une conversation. Les échelles cliniques d'évaluation de la motricité faciale actuellement disponibles ne permettent pas de quantifier séparément ces quatre composantes. Nous proposons dans ce travail une nouvelle échelle clinique de quantification des quatre composantes neuromusculaires de la parésie faciale périphérique

appelée *Echelle de Créteil*, ainsi qu'un dispositif d'analyse tridimensionnel du visage via un casque portatif.

Ce rapport se décline en cinq chapitres. Le **chapitre I** constitue une revue de l'anatomie structurale et fonctionnelle de la face, de la neuroanatomie et de la neurophysiologie des circuits neurologiques de la commande des muscles peauciers ainsi que des principales caractéristiques cliniques et outils de quantification cliniques de la parésie faciale périphérique. Le **chapitre II** présente l'étude VISAGE (protocole déjà publié) dans laquelle s'inscrit ce travail de thèse et qui est constituée d'une phase « préclinique » chez le sujet sans lésion du nerf facial et d'une seconde phase clinique réalisée auprès de sujets présentant une parésie faciale périphérique unilatérale au stade chronique. Le **chapitre III** (article déjà publié) porte sur la quantification biomécanique du visage au repos et lors du mouvement volontaire à travers le développement d'indices spécifiques d'asymétrie et l'obtention d'une base de données normatives tridimensionnelles faciales chez le sujet sans lésion du nerf facial. Le **chapitre IV** (article en préparation) explore la validité de l'*Echelle de Créteil* qui a pour objectif de distinguer les quantifications des quatre composantes neuromusculaires de la parésie faciale périphérique au stade chronique, en étudiant ses corrélations avec l'échelle de cotation motrice faciale de référence appelée le *Sunnybrook Facial Grading System* mais également avec des questionnaires étudiant la qualité de vie générale et spécifique de la parésie faciale périphérique, les niveaux d'anxiété et de dépression ainsi que l'auto appréciation esthétique du visage. Enfin, le **chapitre V** propose des conclusions générales et des perspectives de ces travaux, notamment dans le domaine de la prise en charge clinique au long cours de la parésie faciale périphérique.

CHAPITRE I : Introduction

A. Nomenclature anatomique

La terminologie anatomique est une base fondamentale pour une bonne communication entre cliniciens et scientifiques fundamentalistes. Si l'anatomie devait être une science exacte, l'uniformisation de sa terminologie a par contre, depuis ses débuts, été sujette à controverses. Par convention, on peut faire remonter son histoire moderne à 1895, avec une première tentative de normalisation réalisée par des anatomistes allemands qui donne lieu aux *Nomina Anatomica* de Bâle. Dans les premières décennies, ces normalisations seront révisées sept fois entre 1960 et 1989, dont les *Nomina Anatomica* de Paris publiées en 1955, contenant 5640 termes. La dernière révision, appelée *Terminologia Anatomica*, est publiée en 1998 grâce au travail du Comité Fédératif de la Terminologie Anatomique, groupe de travail de la Fédération Internationale des Associations d'Anatomistes (Federative Committee on Anatomical Terminology, 1998). Rééditée sans modification en 2011, il s'agit de la dernière terminologie en date, plus communément appelée « nouvelle nomenclature ».

La *Terminologia Anatomica* (TA) est officiellement rédigée en latin, et accompagnée d'une version en anglais à titre indicatif. Elle est constituée de seize chapitres, et formée de 7444 objets anatomiques dont 206 classés à deux endroits différents (Baud *et al.*, 2005). Disponible sur internet, une version française traduite par Pierre Bourjat a été publiée en 2007 (Dauber, 2007). Pour faciliter la compréhension et la diffusion de cette thèse, les termes anatomiques utilisés dans ce manuscrit utilisent la nouvelle nomenclature en français et en latin de la *Terminologia Anatomica* (TA).

B. Anatomie structurelle et fonctionnelle de la face et du cou

1. Préambule

a. Définitions

En anatomie, la **Tête** correspond à la région allant du vertex (v) au plan tangent horizontal à la pointe du menton (gnathion ou gn). Chez l'homme, elle est séparée du reste du corps par un étranglement appelé le cou. **Face** provient du bas latin *facia* signifiant « portrait ». Elle est la zone superficielle de la partie antérieure de la tête de l'être humain, appelée aussi **Figure**. Elle s'étend de la limite capillaire (trichion ou tr) au gnathion. L'emplacement du trichion (racine des cheveux) varie beaucoup d'une personne à l'autre. D'un point de vue étymologique, le terme **Visage** est formé à partir de l'ancien français *vis*, qui vient de *visus*, se traduisant par « action de voir », dont seule la locution *vis-à-vis* porte encore le souvenir. Le visage correspond à la surface située entre la glabelle (g) (éminence osseuse entre les deux arcades sourcilières) et le gnathion et ne comprend pas l'étage supérieur de la face.

b. Anatomie de surface de la face et du cou

La face se structure autour de zones osseuses abritant plusieurs organes des sens ; elle comprend notamment la peau, le menton, la bouche, les lèvres, le philtrum, les dents, le nez, les joues, les yeux, les sourcils, le front, les cheveux et les oreilles. Elle se divise en hauteur en trois sections appelées **étages** : supérieur, moyen et inférieur (Figure 1).

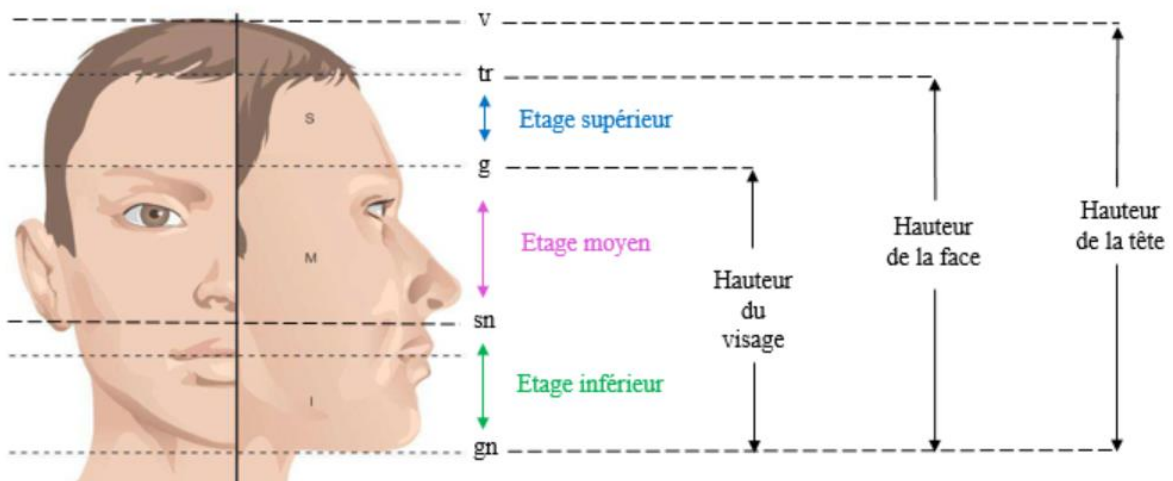


Figure 1. Les trois étages de la face : supérieur, moyen, inférieur.

V, vertex ; tr, trichion ; g, glabelle ; sn, point sous-nasal ; gn, gnathion. (Modifié à partir de *Collège de Chirurgie maxillo-faciale et stomatologie, les référentiels des Collèges 5^{ème} édition*)

L'**étage supérieur** correspond à l'étage cérébral en regard des lobes frontaux. Le front occupe la majeure partie de cet étage qui s'étend en largeur jusqu'à la zone des tempes recouverte de cheveux. Il est délimité en hauteur par le repère céphalométrique supérieur, le trichion (tr) et par le repère inférieur, la glabelle (g). Si la tête est considérée sans l'étage cérébral, on parle de « visage » et non de « face ».

L'**étage moyen** ou étage respiratoire correspond à la portion intermédiaire de la face ou à la portion supérieure du visage. Comprise entre les sourcils et la base du nez, cette section comprend les yeux, le nez, les pommettes et une partie des joues. En largeur, il s'étend jusqu'à l'insertion de l'oreille dans la tête, en incluant les oreilles. Il s'étend en hauteur, entre sa limite supérieure, la glabelle, et sa limite inférieure, le point sous-nasal (sn).

L'**étage inférieur** ou étage oral constitue la section inférieure de la face, donc toute la partie située en dessous de la base du nez. Il comprend la bouche, le menton, une partie des joues et suit sur tout son pourtour le rebord de la mandibule en surface. Il s'étend, en hauteur, entre sa limite supérieure céphalométrique, le point sous-nasal, et sa limite inférieure, le gnathion (gn).

Crâne et face sont **intimement liés** : la base du crâne est posée sur le pivot vertébral au niveau du foramen magnum ; la face est déjetée en avant, suspendue sous l'étage antérieur de cette base ; la mandibule, seul os mobile crâniofacial, est suspendue sous l'os temporal, pivotant autour de ses deux condyles. L'ensemble crâne-face est ainsi en équilibre pour répondre aux contraintes de la pesanteur et des forces masticatrices.

La face et le cou sont constitués de **nombreux reliefs anatomiques** qui permettent d'identifier les individus et de les comparer entre eux, malgré une importante variabilité interindividuelle (Figure 2) :

- **Reliefs osseux** : bosses frontales, dépressions frontales, arcades sourcilières, glabelle, cadres orbitaires (bords supra- et infra-orbitaires, incisures supraorbitaires), nasion, arcades

- zygomatiques, ptériorion (partie antérieure de la fosse temporale), cadre mandibulaire (branche montante, angle, branche horizontale, processus coronoïde), clavicule ;
- **Reliefs cartilagineux** : orifices narinaux, ailes du nez, sillon naso-labial, philtrum, tubercule de la lèvre supérieure, protubérance mentonnière, commissure des lèvres, hélix, tragus, anthélix, antitragus, lobule de l'auricule, cartilage thyroïde ;
 - **Reliefs glandulaires** : relief parotidien, relief sous-mandibulaire ;
 - **Reliefs cutané-graisseux** : fosse temporale, boule de Bichat, houppe du menton, incisure jugulaire ;
 - **Reliefs vasculo-nerveux** : veine jugulaire externe, plexus brachial ;
 - **Phanères** : cils, sourcils mais également lisière du cuir chevelu délimitant l'implantation capillaire et réalisant une délimitation (« *contouring* ») de la face ;
 - **Reliefs musculaires** : rides frontales, rides glabellaires, rides périorbitaires, rides du canal lacrymal, rides péri-nasales, rides nasogéniennes, rides labiales, rides d'amertume, sillon labio-mental, rides du menton, fosse temporale, relief massétéral, chefs du muscle sterno-cléido-mastoïdien, des muscles scalènes ou du muscle trapèze supérieur. Les « plis de fonction musculaire » communément utilisés en anatomie pour décrire les reliefs cutanés induits par les contractions musculaires indépendamment du vieillissement seront dans ce manuscrit appelé rides.

La visualisation et/ou la palpation de ces différents reliefs anatomiques varie entre les individus et selon plusieurs facteurs tels que le sexe, l'origine ethnique, la masse corporelle (indice de masse corporelle), les habitudes (consommation alimentaire, statut tabagique, ensoleillement) mais également la période de la vie d'un même individu avec comme effets du vieillissement : hyperactivation des muscles faciaux avec l'âge, ptose grasseuse, diminution du taux d'acide hyaluronique, d'élastine et de la densité de la matrice extra-cellulaire.

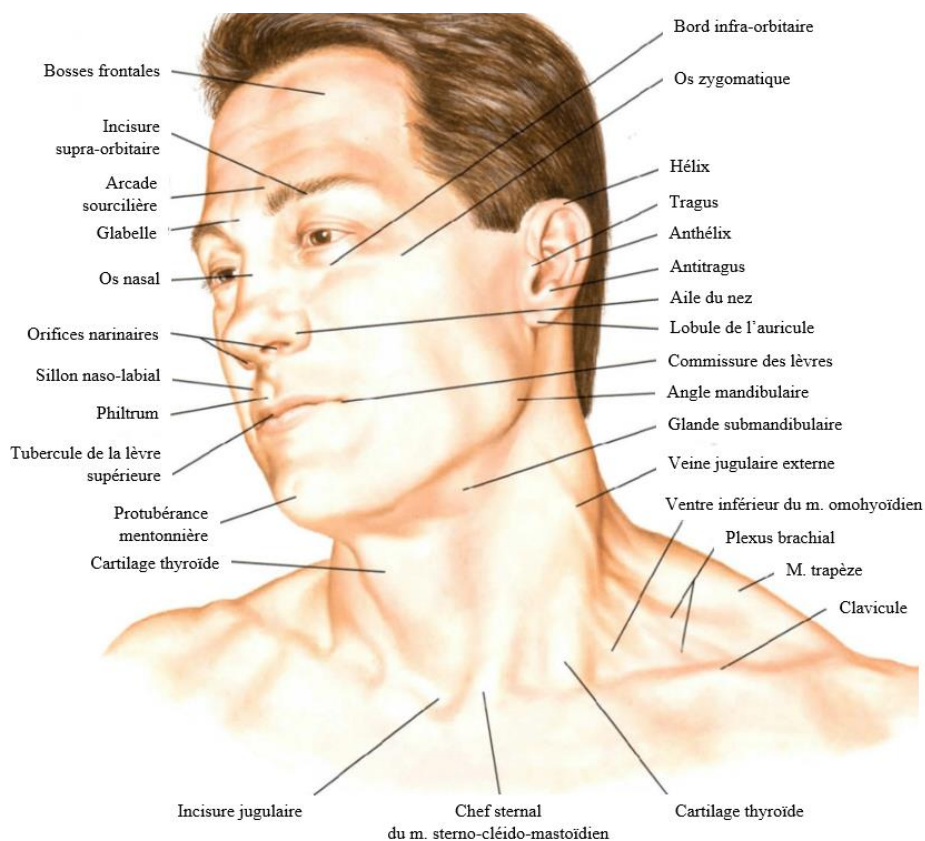


Figure 2. Principaux éléments de l'anatomie de surface de la face et du cou
(Modifié à partir de *Atlas Netter d'Anatomie Humaine*, 8^{ème} édition)

2. Anatomie structurale de la face et du cou

a. Portion fixe : le squelette osseux

1. Squelette osseux de la face

Le massif facial, encore appelé squelette facial, est l'ensemble des os qui constituent le squelette du visage. Il est dérivé du **splanchnocrâne** (crâne viscéral) et pour les os frontaux, d'une partie du **neurocrâne** (crâne cérébral). Les os du massif facial au sens strict du terme sont des **os dermiques** ou **os membraneux**. Ils sont issus de l'ossification de la profondeur du derme. Un os dermique est une structure osseuse issue d'une ossification endoconjonctive sans formation de cartilage, ce qui le différencie de l'os endochondral. Dans le squelette humain, les os membraneux sont retrouvés au niveau du crâne.

Le massif facial humain est constitué de **quinze os** : i) six os pairs : cornets nasaux inférieurs, os lacrymaux, os maxillaires, os nasaux, os palatins, os zygomatiques ; ii) et trois os impairs :

os frontal, mandibule et vomer. Parfois l'os hyoïde, qui fait partie du splanchnocrâne, est considéré comme faisant partie du squelette facial. De même l'os ethmoïde et l'os sphénoïde, faisant partie du neurocrâne, peuvent être inclus dans le squelette facial (Figure 3).

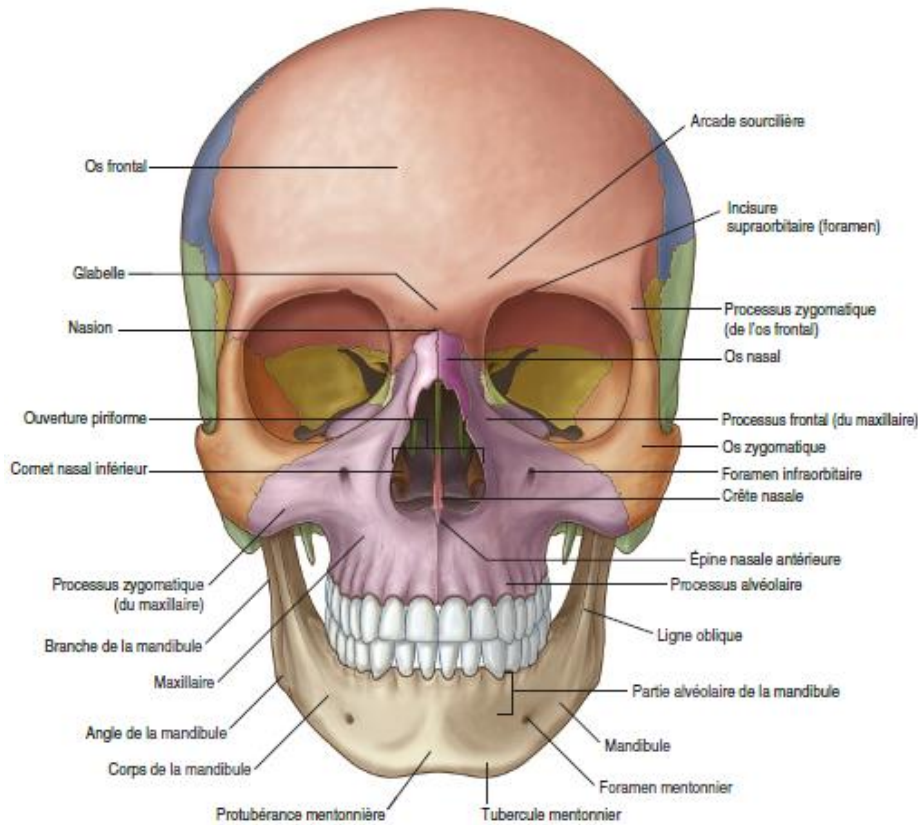


Figure 3. Eléments osseux constitutifs du massif facial
(Gray's, Anatomie pour les étudiants, 2005)

2. Squelette osseux du cou

Le squelette du cou est composé de la colonne vertébrale cervicale constituée de l'empilement des sept vertèbres cervicales. Les deux premières vertèbres cervicales, l'atlas et l'axis, ont une morphologie particulière qui permet une grande mobilité du cou notamment en rotations. La colonne vertébrale (*columna vertebralis*, TA) forme le canal vertébral (*canalis vertebralis*, TA) qui protège la partie cervicale de la moelle spinale (*medulla spinalis*, TA). L'os hyoïde (*os hyoideum*, TA) est situé à l'interface entre le cou et la tête, en avant, situé au-dessus du cartilage thyroïde (*cartilago thyroidea*, TA). C'est le seul os du corps non articulé avec un autre (Figure 4).

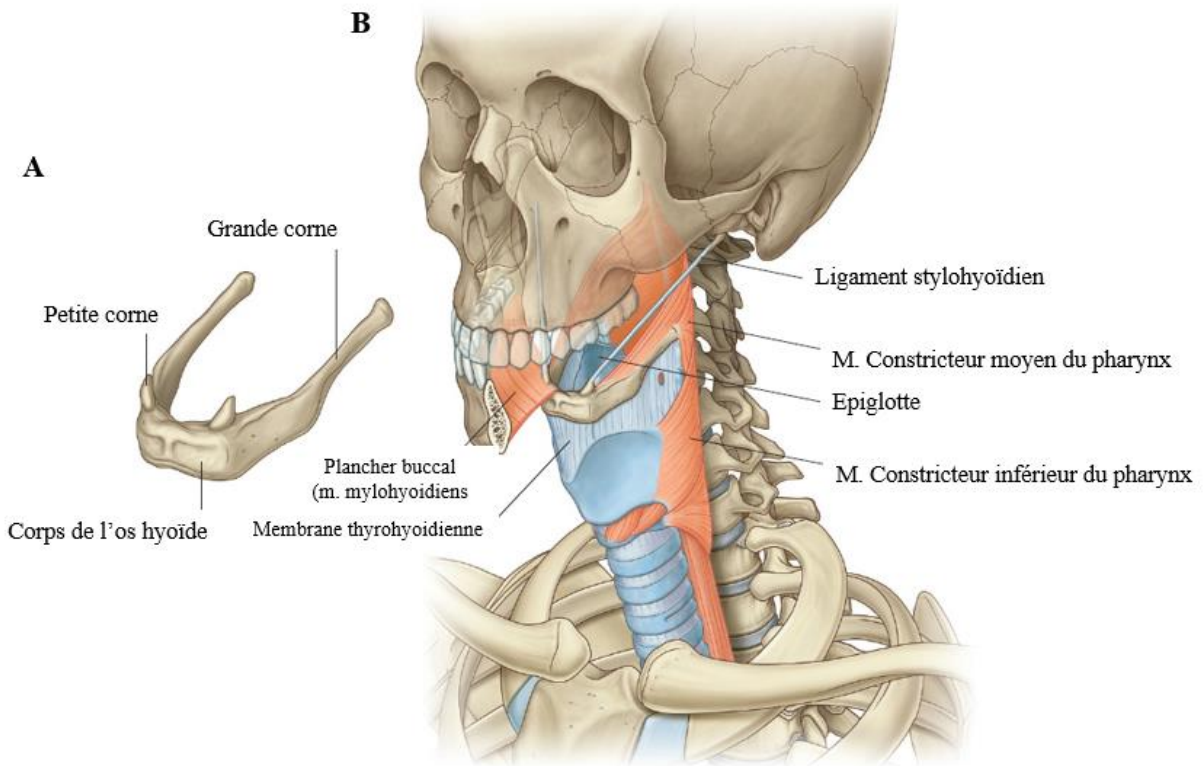


Figure 4. Eléments osseux constitutifs du cou. A. Os hyoïde ; B. Visualisation de la colonne vertébrale cervicale (Gray's, Anatomie pour les étudiants, 2005).

b. Portion mobile : Etude des différentes couches de la face et du cou

La portion mobile de la face et du cou s'envisagera ici par l'étude des différentes couches de la peau et des téguments, des structures musculaires en particulier non peaucières (les muscles peauciers seront traités dans une section ultérieure), de son innervation, de sa vascularisation et des structures glandulaires qui la constituent.

La face est constituée en **six couches**. De la couche superficielle à la couche profonde, elles comprennent la peau, les compartiments adipeux superficiels, le système musculo-aponévrotique superficiel, les muscles faciaux superficiels, le fascia profond et les compartiments adipeux profonds, ainsi que les ligaments de maintien qui ancrent les structures sus-jacentes au périoste des os de la face (Ghassemi *et al.*, 2003). Ce paragraphe se concentrera sur la peau, les muscles faciaux superficiels et le système musculo-aponévrotique superficiel, et n'abordera pas les compartiments adipeux superficiels et profonds (Figure 5).

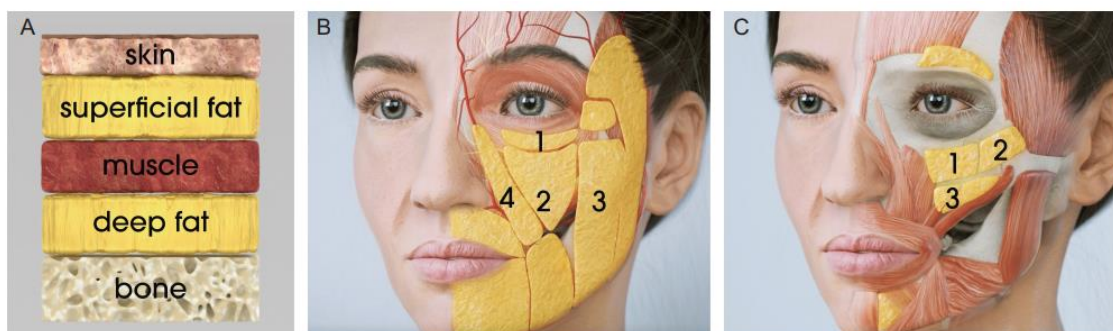


Figure 5. A. Anatomie multicouche de la joue, de l'os à la peau. B. Compartiments graisseux superficiels mobiles : 1, compartiment adipeux infra-orbitaire ; 2, compartiment adipeux de la joue médiane ; 3, compartiment adipeux de la joue moyenne ; 4, compartiment adipeux nasolabial. **C. Compartiments graisseux profonds statiques** : 1, graisse sous-orbitaire médiale ; 2, graisse sous-orbitaire latérale ; 3, graisse de la joue médiale profonde (graisse médiale et latérale de la joue médiale)(Trévidic *et al.*, 2022).

1) Peau et téguments

La peau (provenant du latin *pellis*) est l'organe le plus étendu et le plus lourd du corps humain.

Il représente la **première barrière de protection** de l'organisme. Chez l'adulte son épaisseur varie de 1 à 3 mm et sa surface représente environ 2 m². En comparaison, celle du poumon est d'environ 80 m² et celle de l'intestin atteint les 300 et 400 m².

D'un point de vue histologique et anatomique, la peau est constituée de **trois grandes couches tissulaires** : i) Epiderme ou couche superficielle ; ii) Derme ou couche intermédiaire ; iii) Hypoderme ou couche profonde.

Selon l'espèce considérée, la peau est plus ou moins épaisse, souple, innervée et riche en vaisseaux sanguins, et plus ou moins liée aux muscles, fascias et organes sous-jacents.

On y trouve aussi des **annexes** représentées par les cheveux, poils, ongles, glandes sudoripares et glandes sébacées (Figure 6). Chez l'homme, la peau et les phanères (ongles, poils) constituent le « **tégument** ».

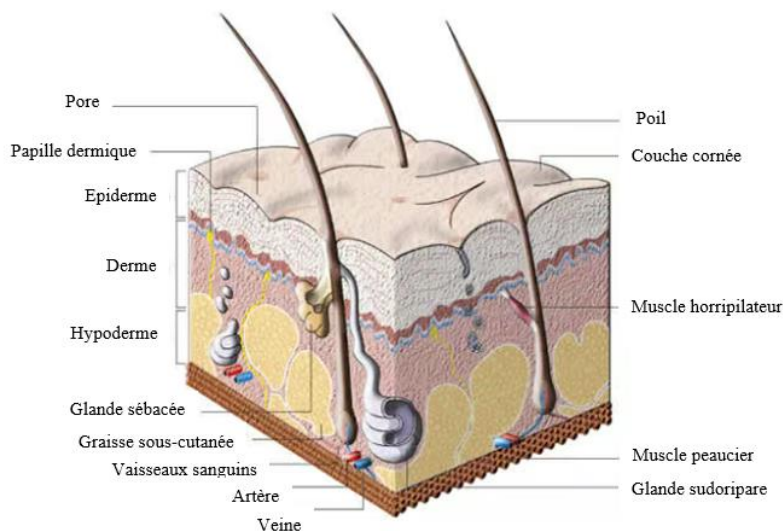


Figure 6. Schéma d'une coupe transversale de peau du visage et du cou
(<https://cicalearning.home.blog/en-theorie/la-peau/>)

a) Epiderme

C'est la couche la plus superficielle, la plus mince, qui se renouvelle continuellement et complètement une fois par mois et joue un rôle majeur contre les agressions extérieures. C'est un épithélium stratifié, squameux et kératinisé, constitué de **quatre sous-couches** : la couche cornée, la couche granuleuse, la couche épineuse et la couche basale (Figure 7). Il n'est pas vascularisé mais renferme de **nombreuses terminaisons nerveuses libres**, impliquées en particulier dans la transmission de messages douloureux. Il est recouvert d'un film hydrolipidique, le sébum, produit par les glandes sébacées du derme qui le protège des agressions extérieures.

Au niveau cellulaire, l'épiderme est constitué de **cinq catégories cellulaires** :

- Les **kératinocytes** majoritaires (90 à 95% des cellules épidermiques), adhérents les uns aux autres, produisent la kératine. Ils prolifèrent dans l'assise basale puis se différencient progressivement pour former les différentes couches de l'épiderme en migrant depuis la profondeur vers la surface. Les kératinocytes de la couche la plus superficielle de l'épithélium sont appelées cornéocytes et forment la couche cornée ;

- Les **cornéocytes** qui forment une couche imperméable et résistante appelée la couche cornée, sont des cellules mortes, aplaties, formant des lamelles et dépourvues de noyaux qui finissent par se détacher de l'épithélium, c'est le processus de *desquamation*. Ils sont liés entre eux par un ciment lipidique ;
- Les **mélanocytes** responsables de la pigmentation cutanée en synthétisant la mélanine ;
- Les **cellules de Langerhans** présentes dans la couche basale ont un rôle immunitaire : ces cellules présentatrices d'antigènes sont capables de capter des antigènes cutanés, de les apprêter et de les transporter de la peau jusqu'aux ganglions lymphatiques régionaux puis de les présenter aux lymphocytes T. Ces cellules ont un rôle essentiel au cours des réactions immunologiques de la peau ;
- Les **cellules de Merkel** (aussi appelées corpuscules de Merkel) présentes dans la couche basale sont des mécanorécepteurs qui ont un rôle essentiel dans la **sensibilité tactile**.

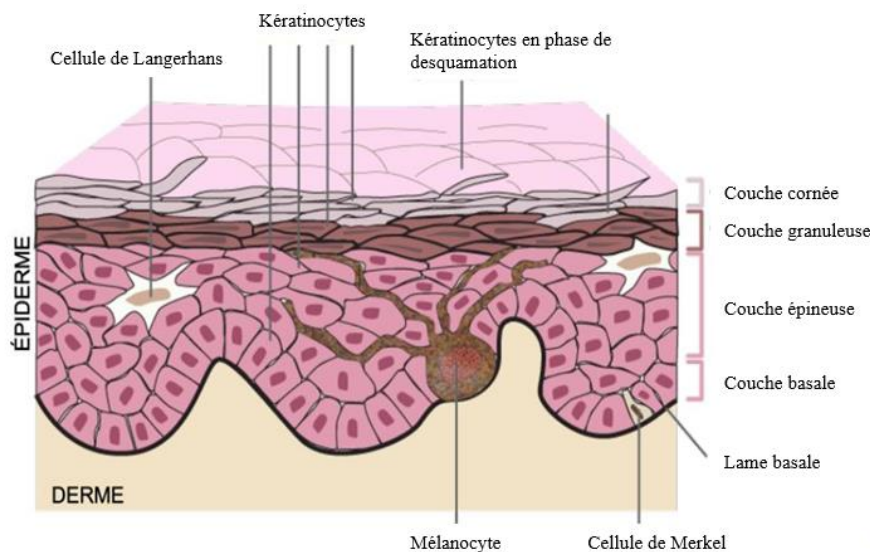


Figure 7. Coupe transversale de la structure de l'épiderme
(<https://microbiologiemedicale.fr/peau-anatomie/>)

b) Derme

Il s'agit de la couche la plus **complexe** et la plus **active** d'un point de vue métabolique. Il est 10 à 40 fois plus épais que l'épiderme. C'est un tissu conjonctif comprenant de nombreux

capillaires sanguins et **terminaisons nerveuses**. Le derme papillaire est rattaché à l'épiderme alors que le derme réticulaire est situé juste au-dessus de l'hypoderme.

Le derme est parcouru par d'innombrables vaisseaux sanguins et lymphatiques qui lui fournissent les nutriments nécessaires et transportent les cellules immunitaires en cas d'agression.

Au niveau cellulaire, le derme est essentiellement constitué de **fibroblastes** qui produisent la matrice extracellulaire, assimilable à un gel constitué de quatre macromolécules essentielles : 1) le collagène, qui confère une résistance aux forces de tensions et de tractions ; 2) l'élastine, qui apporte des propriétés élastiques et de souplesse à la peau ; 3) l'acide hyaluronique, qui agit comme une éponge et se gorge d'eau, induisant une hydratation et une résistance aux contraintes exercées sur la peau ; 4) les protéoglycanes, qui participent à la communication et à l'adhésion entre les cellules. Ces quatre macromolécules forment un **réseau tridimensionnel** résistant aux chocs et protecteur pour les structures situées plus en profondeur.

Le derme est également le siège du développement des **annexes cutanées** : 1) les follicules pileux forment les poils ; 2) les glandes sébacées produisent le sébum, un ensemble de matières grasses (monoglycérides, diglycérides, triglycérides, cires, acides gras libres, squalène et cholestérol) qui mélangées à la sueur renforcent la protection de l'épiderme. Cette émulsion s'appelle le film hydrolipidique ; 3) les glandes sudoripares produisent la sueur, un mélange d'eau, de minéraux et de substances organiques, essentielle à la thermorégulation.

Enfin, c'est aussi dans le derme que se trouvent l'essentiel des **terminaisons nerveuses** sensibles à la chaleur (corpuscules de Ruffini), au froid (corpuscules de Krause), à la douleur (terminaisons libres) et les récepteurs au tact grossier et au tact fin (corpuscules de Paccini).

c) Hypoderme

Il s'agit d'un **tissu conjonctif lâche** entre le derme et les aponévroses superficielles sous-jacentes qui recouvrent les muscles ou le périoste qui tapisse la surface extérieure des os. Il est

constitué de cellules particulières, les **adipocytes**, qui ont un volume variable selon la quantité de triglycérides qui y sont stockés. Il représente un tissu de réserve énergétique, mais également un important isolant naturel contre le froid.

3. Myologie et Système Musculo-Aponévrotique Superficiel

a) Système musculo-aponévrotique superficiel

Le **système musculo-aponévrotique superficiel** (SMAS) est une structure anatomique importante du visage décrite par Mitz et Peyronie en 1976 (Mitz and Peyronie, 1976). Il s'agit d'une **lame fibromusculaire continue** recouvrant l'ensemble du visage, de la région frontale à la région cervicale. Il se compose d'un tissu musculaire correspondant aux muscles peuciers du visage, ainsi que d'un tissu aponévrotique constitué de gaines fibreuses collagéniques et élastiques. Il est situé sous la peau et en particulier en dessous du tissu adipeux hypodermiques du visage et du cou. Le **nerf facial** y chemine et constitue son principal rapport anatomique.

Le SMAS constitue ainsi un véritable réseau fibreux continu et organisé reliant les muscles faciaux au derme. Il se compose d'un échafaudage tridimensionnel de fibres de collagène, de fibres élastiques et de cellules adipeuses. Deux types de SMAS ont été décrits d'un point de vue morphologique : l'architecture du **SMAS de type 1** est située latéralement par rapport au sillon nasogénien, avec des septa fibreux relativement petits entourant des lobules de cellules graisseuses, tandis que l'architecture **de type 2** est située médialement par rapport au sillon nasogénien, où le SMAS est constitué d'un réseau dense de fibres de collagène et de fibres musculaires (Hutto and Vattoth, 2015)(Figure 8). Le réseau dense de fibres de collagène du SMAS de type 2 assure une connexion beaucoup plus forte entre les structures sous-jacentes et le derme sus-jacent.

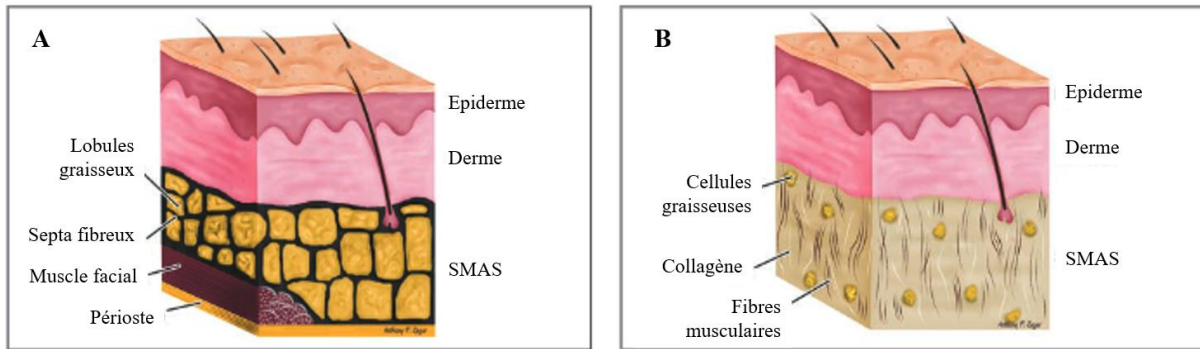


Figure 8. Systèmes musculo-aponévrotiques superficiels. A, de type 1 ; B, de type 2.
(Hutto and Vattoth, 2015)

Le SMAS joue un rôle important dans le maintien de la fermeté et de l'élasticité du visage. Avec le vieillissement, le SMAS subit des changements structurels, notamment une perte de tonicité et une détérioration de sa qualité, ce qui contribue aux signes du vieillissement facial tels que le relâchement cutané, la ptôse (affaissement) des tissus et l'apparition des rides et des plis.

En chirurgie plastique et esthétique, le SMAS est une cible importante pour les techniques de lifting du visage. Les procédures de lifting du visage visent à repositionner et à retendre le SMAS, et non plus la peau comme dans les différentes techniques de *deep-plane facelifts* (Kaya and Cakmak, 2022). Le SMAS est également un point de repère plus récent d'injections des agents comblants appelés *fillers* (Surek, 2019; Trévidic *et al.*, 2022).

b) Muscles peauciers

Les muscles peauciers de la face et du cou se développent à partir du **second arc branchial** et sont innervés par des rameaux du nerf facial ou VII^{ème} paire de nerfs crâniens (Figures 9 et 10). Ils se localisent dans le fascia superficiel, formant avec lui le système musculo-aponévrotique superficiel (SMAS). Ils appartiennent aux muscles cutanés ou superficiels, et ont ainsi la particularité d'avoir une de leurs insertions s'attachant à la face profonde de la peau (insertion dite sous-cutanée), l'autre insertion s'attachant sur un os ou un fascia. Ils ne sont pas directement recouverts par un fascia. Les muscles peauciers sont également appelés muscle de

la mimique ou de l'expression faciale par leur fonction dans le contrôle des expressions de la face, souvent en lien avec les émotions. Leur anatomie et leur fonction propre seront traitées dans une section ultérieure (Chapitre I, section C).

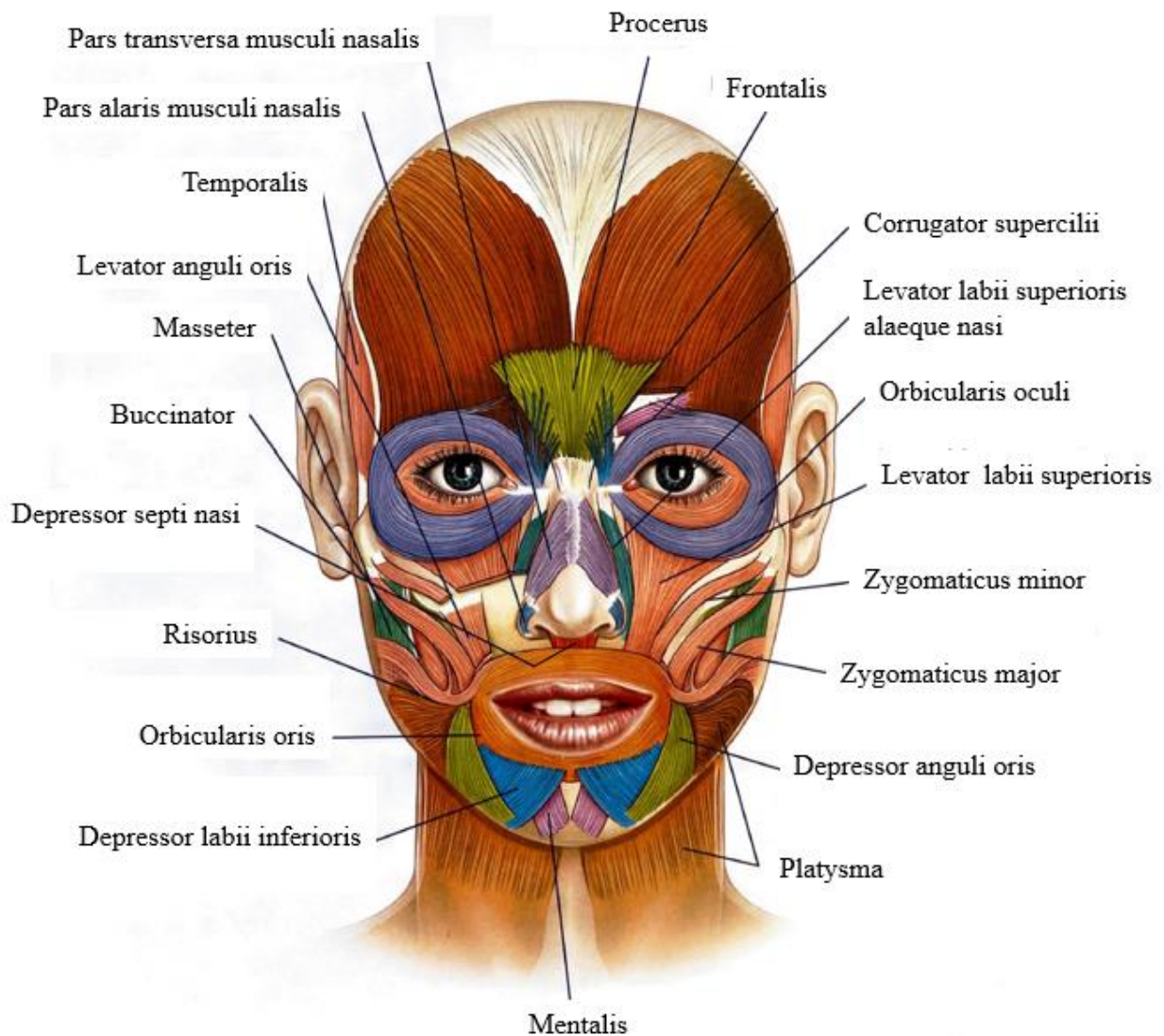


Figure 9. Muscles peauciers et manducateurs de la face et du cou sur une vue de face
(M. Baude et laboratoire Ipsen, 2024, pas encore publié)

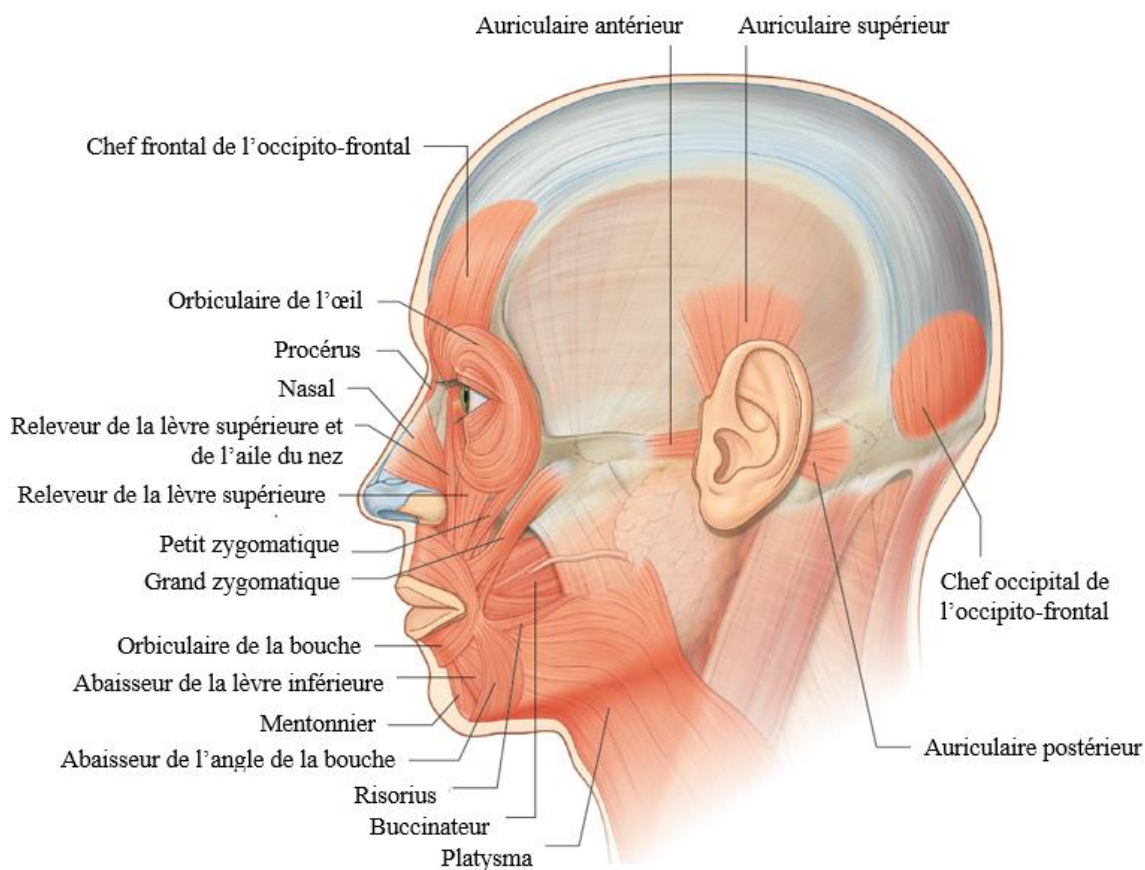


Figure 10. Muscles peuciers sur une vue de profil
(Modifié à partir de Gray's, Anatomie pour les étudiants, 2005)

a) Muscles non peuciers de la face

Les muscles de la face qui ne participent pas à la mimique faciale peuvent être classés fonctionnellement : i) **muscles extra oculaires** : muscles oculomoteurs, *i.e.* moteurs du globe oculaire (non traités dans ce manuscrit), muscle releveur de la paupière supérieure et muscle tarsal supérieur ; ii) **muscles de la mastication** qui mobilisent la joue et l'articulation temporo-mandibulaire.

i. Muscle releveur de la paupière supérieure

Le muscle releveur de la paupière supérieure (*musculus levator palpebrae superioris*, TA) prend son origine au niveau de l'apex orbitaire. Il se situe dans la peau de la paupière supérieure, sous le toit de l'orbite (Figure 11). Ce muscle se termine à environ 15 mm au-dessus du bord supérieur du tarse, sa portion musculaire se transforme en une lame musculo-tendineuse

appelée lame profonde. Au niveau fonctionnel, il **antagonise l'action du muscle orbiculaire de l'œil** en relevant et rétractant la paupière supérieure. Il est innervé par le nerf moteur oculaire commun (III).

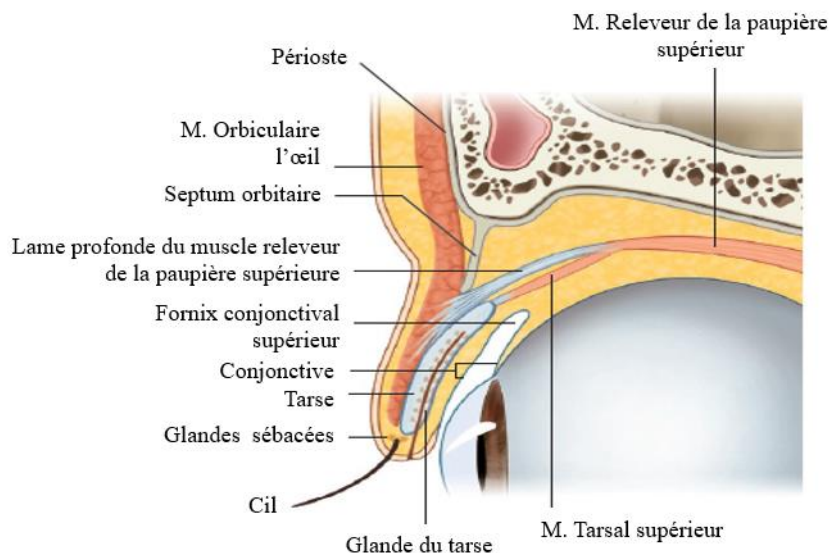


Figure 11. Muscle releveur de la paupière supérieure et muscle tarsal supérieur
(Modifié à partir de Gray's, Anatomie pour les étudiants, 2005)

ii. Muscle tarsal supérieur

Le muscle tarsal supérieur (*musculus tarsalis superior*, TA), partie supérieure du muscle de Müller, est un synergique du muscle releveur de la paupière, qui prend naissance sur son tendon terminal (Figure 11). Ses fibres ont une direction verticale. Il se termine sur le bord convexe du tarse supérieur (Figure 11). Il reçoit son innervation du système nerveux sympathique issu du ganglion cervical supérieur via le plexus nerveux carotidien interne, où de petites branches communiquent avec le nerf oculomoteur lors de son passage dans le sinus caverneux. Les fibres sympathiques continuent jusqu'à la branche supérieure du nerf oculomoteur, où elles pénètrent dans le muscle tarsal supérieur par sa face inférieure. Son homologue inférieur, le muscle *tarsal inférieur*, partie inférieure du muscle de Müller, possède des caractéristiques anatomiques analogues au niveau du tarse inférieur, s'insérant sur un fascia capsulopalpébral par ses fibres musculaires lisses qui débutent à environ 2,5 mm du tarse inférieur (Hawes and Dortzbach,

1982). Le muscle de Müller (muscles tarsaux supérieur et inférieur) est un **muscle accessoire** aidant au soulèvement de la paupière supérieure et à l'abaissement de la paupière inférieure.

La parésie du muscle de Müller par atteinte du sympathique ne cause pas de ptosis mais un *rétrécissement de la fente palpébrale*, caractéristique du syndrome de Claude Bernard Horner (Manson *et al.*, 1986). Le détachement du contingent inférieur peut aussi causer un ectropion inférieur (Putterman, 1978).

iii. Muscles de la manducation

Les muscles manducateurs sont situés au niveau de la face et du cou, mais en profondeur et ne sont pas des muscles peauciers. Ils ne sont pas innervés par le nerf facial mais par les branches motrices issues du nerf trijumeau (V) (Figures 12 et 13).

Ils appartiennent à l'appareil manducateur, permettant la manducation, c'est-à-dire les opérations antérieures à la digestion (préhension, mastication, salivation, ventilation et déglutition). L'appareil manducateur est constitué des maxillaires et de la mandibule, supportant les arcades dentaires et reliés par les articulations temporo-mandibulaires. Il comprend également la langue et les muscles masticateurs.

Les muscles manducateurs permettant l'**ouverture de la bouche** et l'abaissement de la mandibule sont les suivants : le muscle ptérygoïdien latéral (propulsion ; diduction controlatérale de la mandibule) ; le muscle ptérygoïdien médial (élévation ; propulsion ; diduction controlatérale de la mandibule) ; le muscle mylo-hyoïdien (abaissement de la mandibule) ; le muscle génio-hyoïdien (abaissement de la mandibule) ; le ventre antérieur du muscle digastrique (abaissement de la mandibule).

Les muscles permettant les mouvements de **fermeture de la bouche** sont : le muscle masséter (élévation de la mandibule) ; le muscle temporal (élévation ; rétropulsion de la mandibule) ; le muscle ptérygoïdien médial (élévation de la mandibule) ; le muscle digastrique (rétrorsion de la mandibule).

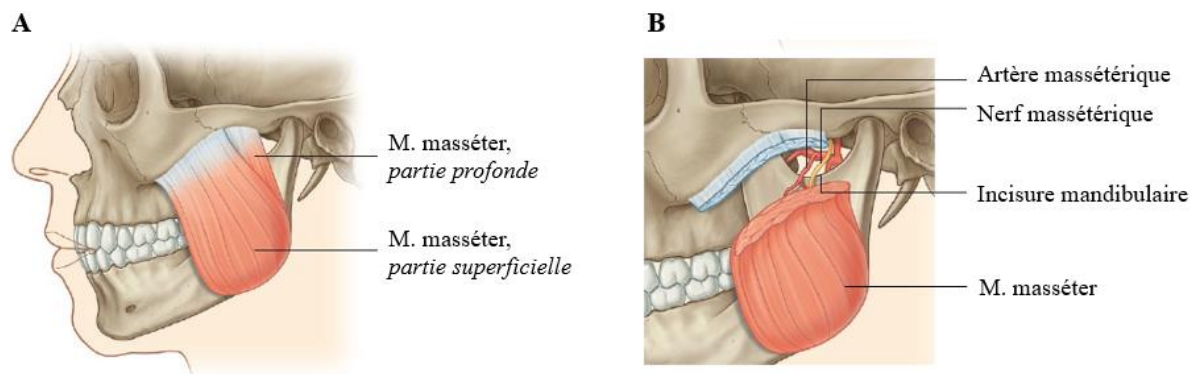


Figure 12. Muscle masséter
(Modifié à partir de Gray's, Anatomie pour les étudiants, 2005)

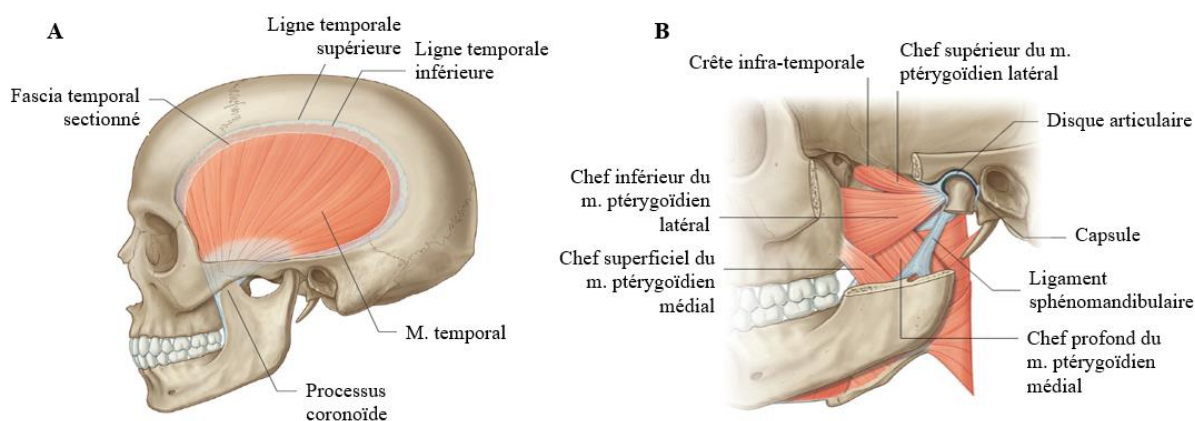


Figure 13. Muscles temporal (A), ptérygoïdien médial et ptérygoïdien latéral (B)
(Modifié à partir de Gray's, Anatomie pour les étudiants, 2005)

c. Innervation de la face et du cou

Chaque nerf crânien est associé à un arc branchial au cours de l'organogénèse. Au niveau de la face, le nerf trijumeau (V) innerve les structures faciales qui dérivent du premier arc branchial, le nerf facial (VII) innerve les structures faciales qui proviennent du second arc branchial.

1. Innervation somatique sensitivo-motrice

a) Innervation sensitive

L'innervation cutanée de la face est assurée en grande partie par plusieurs rameaux du nerf trijumeau (V) : les nerfs ophtalmique (V₁), maxillaire (V₂) et mandibulaire (V₃) sortent de la cavité crânienne pour innerver un territoire de la face. Les autres nerfs qui participent à

l'innervation sensitive de la face sont : le nerf facial (VII), le nerf vague (X) et les rameaux des racines cervicales C2 et C3 (Figures 14 et 15).

i. Nerf ophtalmique (V₁)

Il sort du crâne par la fissure orbitaire supérieure. Ses rameaux qui innervent *la face* sont : i. Le **nerf lacrymal**, ii. Le **nerf frontal** qui se divise en **nerfs supraorbitaire** et **supratrochléaire** qui innervent la paupière supérieure, le front et le scalp ; iii. Le **nerf nasociliaire** qui se termine en **nerf ethmoïdal antérieur** se divisant en deux rameaux dans la cavité nasale (Figures 14 et 15). En pathologie, le V₁ est typiquement impliqué dans le *zona ophtalmique*.

ii. Nerf maxillaire (V₂)

Il sort de la base du crâne par le foramen rond. Ses rameaux qui innervent *la face* sont : i. Le **nerf zygomatique** qui se divise en **nerf zygomaticotemporal** qui sort à travers l'os zygomatique et innerve la partie antérieure de la tempe et en **nerf zygomatofacial** qui innerve une petite surface de peau en regard de l'os zygomatique ; iii. Les **nerfs alvéolaires supérieurs** à destinée des incisives, canines et molaires supérieures ; iv. Le **nerf infraorbitaire** qui sort du maxillaire et innerve via plusieurs rameaux la paupière inférieure, la joue, la face latérale du nez et la lèvre supérieure (Figure 14). En pathologie, le V₂ est typiquement impliqué dans la *névralgie du trijumeau*.

iii. Nerf mandibulaire (V₃)

Il sort du crâne à travers le foramen ovale. Ses rameaux qui innervent *la face* sont : i. Le **nerf massétérique** qui innerve le muscles masséter et l'articulation temporo-mandibulaire ; ii. Les **nerfs temporaux profonds** pour la face profonde du muscle masséter ; iii. Le **nerf ptérygoïdien latéral** ; iv. Le **nerf ptérygoïdien médial** ; v. Le **nerf buccal** qui innerve une partie de la peau et de la muqueuse de la joue ; vi. Le **nerf auriculotemporal** qui innerve le méat acoustique externe, la surface du tympan et une grande partie de la tempe ; vi. : Le **nerf lingual** et vii. Le **nerf alvéolaire inférieur** qui se termine en **nerf mentonnier** qui sort de la

mandibule par le foramen mentonnier et se divisent en rameaux pour innerver la peau et la muqueuse de la lèvre inférieure et la peau du menton. En pathologie, le V₃ est typiquement impliqué dans les *douleurs dentaires*.

La neuroanatomie précise du nerf trijumeau (V) est proposée dans une section ultérieure (Chapitre I, section C).

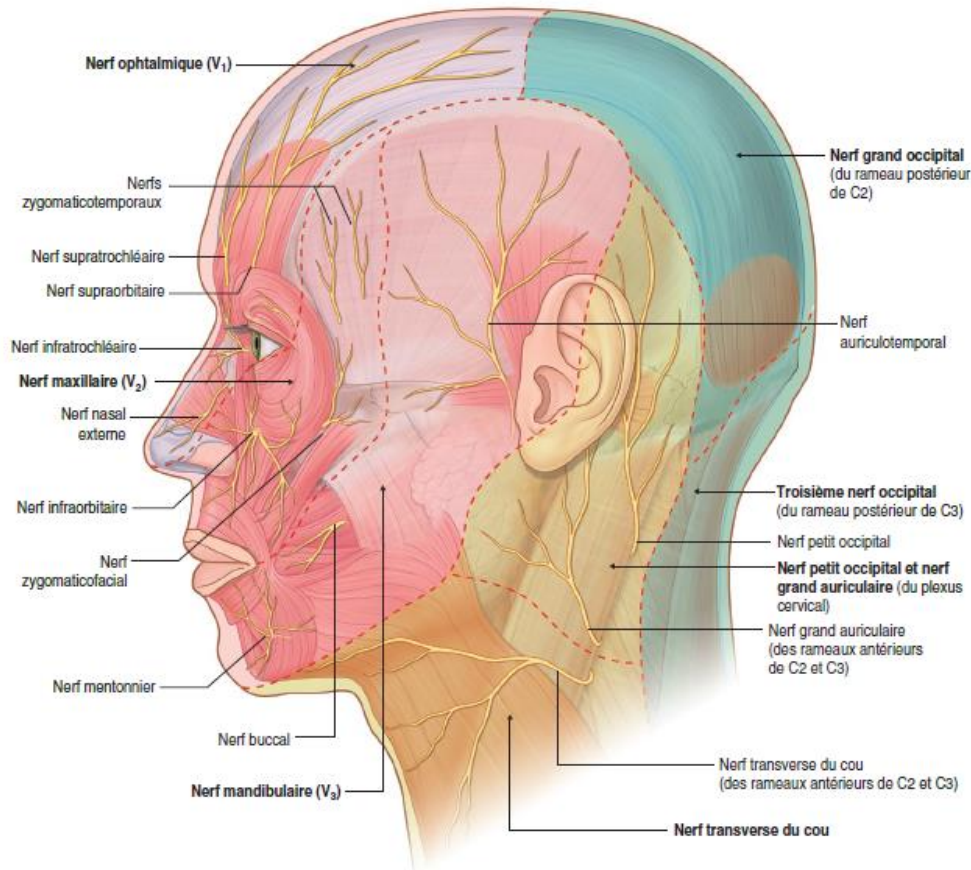


Figure 14. Branches nerveuses d'innervation sensitive de la face, du cou et du scalp
(Modifié à partir de Gray's, Anatomie pour les étudiants, 2005)

iv. Nerf intermédiaire

Les fibres afférentes sensibles du nerf facial, et plus précisément du **nerf intermédiaire**, conduisent les informations sensibles de la conque, de la partie antérieure de l'anthélix, de la racine de l'hélix, de la fossette triangulaire, des faces postérieure et inférieure du conduit auditif externe et du tympan. Le reste de l'oreille externe reçoit son innervation sensitive du nerf trijumeau (V) et de la branche postérieure du nerf grand auriculaire (C2, C3) (Figures 14 et 15).

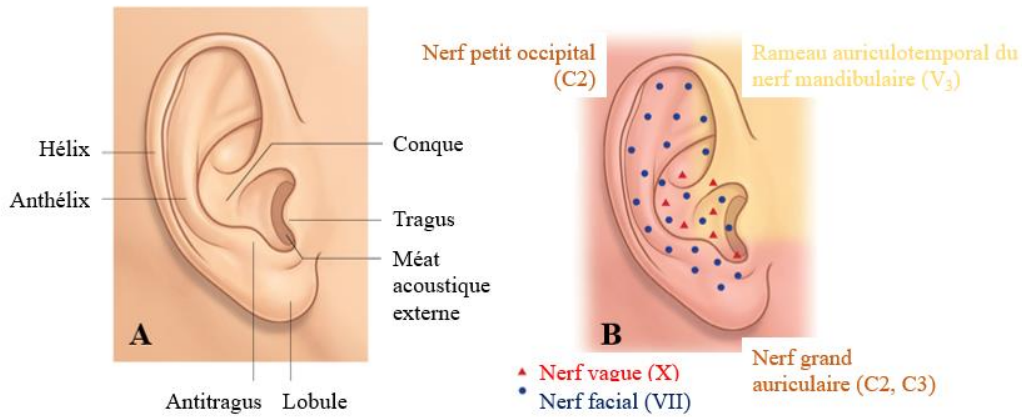


Figure 15. Auricule. A, anatomie de surface ; B, innervation sensitive (Modifié à partir de Gray's, Anatomie pour les étudiants, 2005)

v. Nerf vague

Les **rameaux auriculaires du nerf vague (X)** innervent les portions profondes de l'auricule (Figure 15).

vi. Nerfs cervicaux C2 et C3

Les surfaces les plus superficielles de l'auricule sont innervées par le **nerf grand auriculaire** (issu des rameaux antérieurs de C2 et C3) pour les parties inférieures antérieure et postérieure, le **nerf petit occipital (C2)** pour sa partie supérieure et postérieure, rameaux du plexus cervical (Figures 14 à 16).

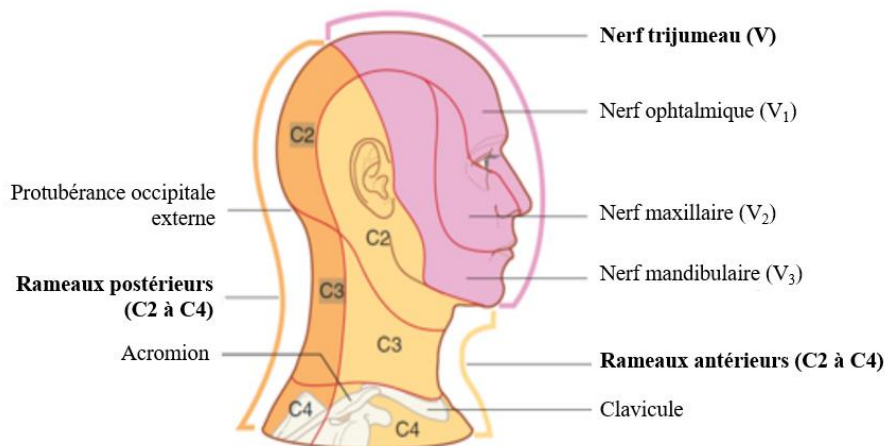


Figure 16. Dermatomes des nerfs cervicaux (Modifié à partir de Gray's, Anatomie pour les étudiants, 2005)

b) Innervation motrice

Les muscles peauciers de la face, tout comme ceux du scalp et de l'oreille externe, dérivent du deuxième arc branchial associé au **nerf facial** (VII) qui est responsable de leur innervation motrice. Au niveau de la face, le **tronc moteur du nerf facial** émerge de la base du crâne par le foramen stylo-mastoïdien et donne rapidement le **nerf auriculaire postérieur** qui se dirige vers le haut et l'arrière pour innerver le chef occipital du muscle occipitofrontal du scalp et le muscle auriculaire postérieur. Il donne ensuite **deux branches nerveuses** à destinée des muscles stylo-mastoïdien et ventre postérieur du digastrique puis pénètre dans la glande parotide par sa face profonde pour s'y diviser en deux rameaux supérieur et inférieur. Ces rameaux temporofacial et cervicofacial se divisent ensuite en **cinq rameaux terminaux** (Figure 17) : i) Rameaux temporaux qui innervent les muscles de la tempe, du front et de la surface supra orbitaire ; ii) Rameaux zygomatiques qui innervent la surface supra orbitaire, la face latérale du nez et de la lèvre supérieure ; iii) Rameaux buccaux qui innervent les muscles de la joue, la lèvre supérieure et le coin de la bouche ; iv) Rameaux marginaux mandibulaires qui innervent les muscles de la lèvre inférieure et du menton ; v) Rameaux cervicaux qui innervent le platysma.

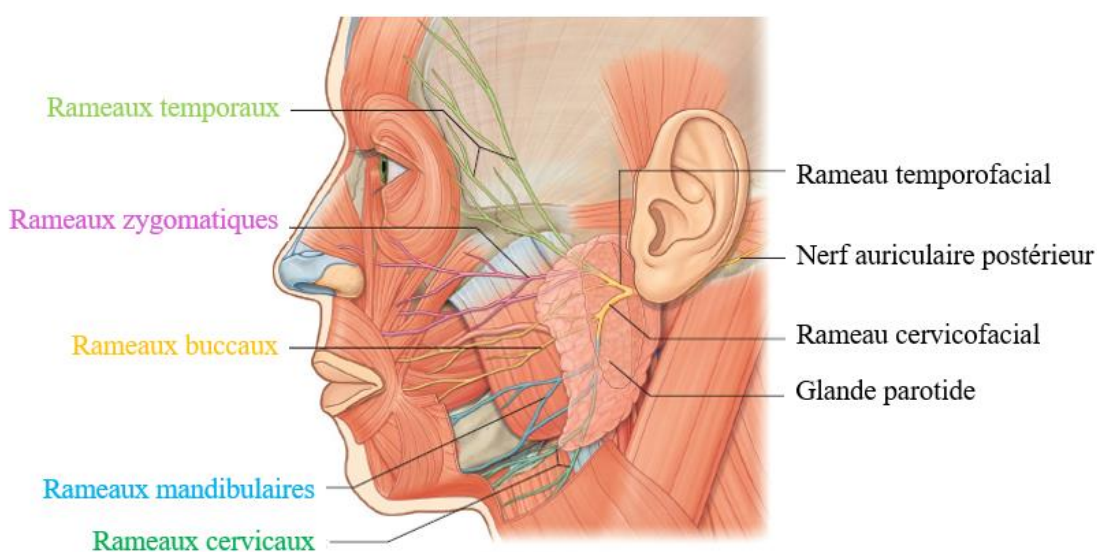


Figure 17. Rameaux terminaux du nerf facial dans la face
(Modifié à partir de Gray's, Anatomie pour les étudiants, 2005)

La neuroanatomie précise du nerf facial *dans son ensemble* est traitée dans une section ultérieure (Chapitre I, section C).

2. Innervation autonome

Le système nerveux autonome ou neurovégétatif, indépendant du contrôle volontaire, innerve et contrôle les fonctions viscérales (rythme cardiaque, respiration, digestion, glandes exocrines et endocrines, etc.). Il se subdivise en système nerveux sympathique et parasympathique. Le système nerveux autonome cutané se compose pour une minorité de fibres nerveuses, motrices et sécrétrices, et de fibres nerveuses sensorielles. Les fibres autonomes ont un rôle majeur dans la régulation de la fonction des glandes sudoripares, la vasomotricité, la régulation du flux sanguin ou encore la thermorégulation. Les fibres nerveuses autonomes sensorielles sont sensibles à la pression, l'étirement, la vibration, la température ou la douleur et leurs récepteurs sont soit libres soit spécialisés et situées au niveau de la peau (Figure 18).

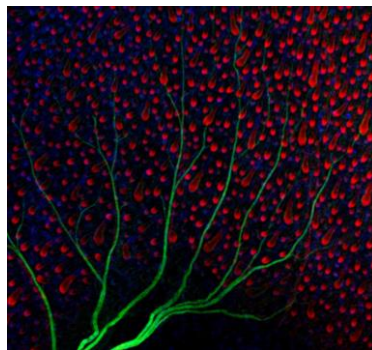


Figure 18. Nerf visible en vert sur cette photo prise en microscopie confocale sous la peau d'une souris dont les follicules pileux sont visibles en rouge et en bleu foncé © Dr. Kif Liakath-Ali, King's College London, Centre for Stem cells & Regenerative Medicine, London, UK / Nikon Small World

d. Vascularisation de la face et du cou

1. Vascularisation artérielle

La vascularisation artérielle de la face est assurée par les branches de l'artères carotide externe, auxquelles s'associent une branche de l'artère carotide interne.

a) Artère faciale

C'est le principal vaisseau afférent de la face (Figure 19). Elle naît de la face antérieure de l'artère carotide externe, chemine à travers les structures profondes du cou et apparaît au bord inférieur de la mandibule après avoir cheminé en arrière de la glande sublinguale. Son trajet s'incurve autour du bord inférieur de la mandibule, en avant du masséter (battements palpables) et l'artère entre à ce nouveau dans la face et développe un trajet tortueux vers le haut et le dedans. Elle passe le long de la face latérale du nez et se termine en artère angulaire au coin médial de l'œil. Le long de ce trajet, elle parcourt la face profonde des platysma, risorius, grand et petit zygomatiques, et la face superficielle du buccinateur et du releveur de l'angle de la bouche. Les branches de l'artère faciale comprennent les branches labiales, supérieures et inférieures, et la branche nasale latérale. Les branches labiales naissent près du coin de la bouche et s'anastomosent avec leurs homologues du côté opposé de la face près de la ligne médiane. La branche latérale nasale vascularise la surface latérale et la crête du nez.

b) b) Artère faciale transverse

Il s'agit d'une branche de l'artère temporale superficielle, elle-même une des deux branches terminales de l'artère carotide externe. Elle naît au sein de la parotide et chemine à la surface du muscle masséter puis entre l'arcade zygomatique et le conduit parotidien (Figure 19).

c) Branches de l'artère maxillaire

L'artère maxillaire est la plus grosse branche terminale de l'artère carotide externe, elle donne plusieurs branches qui participent à la vascularisation artérielle de la face : i) l'artère infraorbitaire qui vascularise la paupière inférieure, la lèvre supérieure et la région comprise entre ces structures ; ii) l'artère buccale qui vascularise le muscle buccinateur et la région buccale ; iii) l'artère mentonnière qui vascularise le menton.

d) Branches de l'artère ophtalmique

L'artère ophtalmique est une branche de l'artère carotide interne dont des petites branches naissent après son entrée dans l'orbite et vascularisent la face : i) l'artère

zygomatofaciale provient de la branche lacrymale de l'artère ophtalmique (Figure 19), rejoint la face à travers le foramen zygomatofacial et vascularise la surface de la face située au-dessus de l'os zygomatique ; ii) l'artère nasale dorsale, une branche terminale de l'artère ophtalmique, sort de l'orbite dans le coin médial et vascularise le dos du nez. La branche la plus importante de l'artère ophtalmique est l'artère centrale de la rétine qui naît au-dessous et en dehors du nerf optique et qui irrigue le nerf optique.

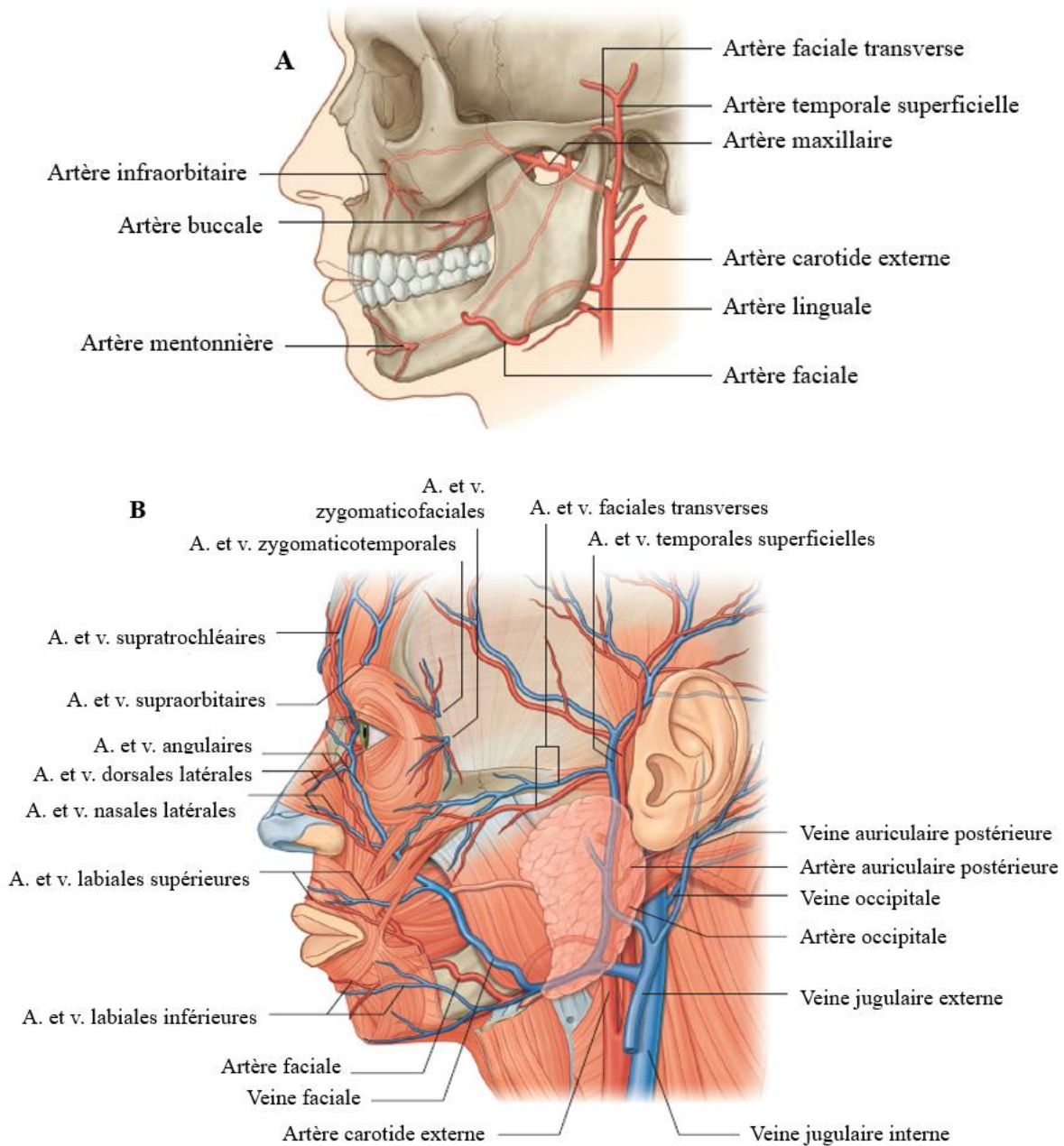


Figure 19. Vascularisation de la face. A. Branches de l'artère maxillaire. B. Vue latérale. (Modifié à partir de Gray's, Anatomie pour les étudiants, 2005).

2. Vascularisation veineuse

L'essentiel du retour veineux est dirigé vers la veine jugulaire interne, bien que d'importantes connexions de la face créent un autre retour veineux par un réseau intracrânien de grande importance clinique puisqu'il va impliquer le sinus caverneux.

a) Veine faciale

Il s'agit de la principale veine de drainage de la face (Figure 20). Son origine est située près de coin médial de l'orbite ; elle se dirige en bas en se plaçant juste en arrière de l'artère faciale pour atteindre le bord inférieur de la mandibule. La veine et l'artère se séparent alors, la veine se positionnant en superficie de la glande submandibulaire pour s'ouvrir dans la veine jugulaire interne. Sur son trajet elle reçoit des veines collatérales drainant les paupières, la face latérale du nez, les lèvres, la joue et le menton.

b) Veine faciale transverse

Elle accompagne le trajet de l'artère faciale transverse au niveau de la face (Figure 19) et se draine dans la veine temporale superficielle au sein de la parotide.

c) Connexions veineuses intracrâniennes

La veine faciale, en traversant la face, a de nombreuses connexions avec des veines provenant de régions plus profondes de la tête (Figure 20) :

- Près du coin médial de l'orbite, elle s'anastomose avec des veines ophtalmiques ;
- Dans la région de la joue, elle communique avec des veines qui passent à travers le foramen infraorbitaire ;
- Elle s'anastomose aussi avec des veines qui viennent de régions plus profondes de la face, en particulier la veine faciale profonde anastomosée avec le plexus veineux ptérygoïdien.

Toutes ces veines sont interconnectées avec le sinus caverneux intracrânien par l'intermédiaire de veines émissaires qui unissent les veines intracrâniennes et extra crâniennes. Il n'y a pas de

valvules dans la veine faciale ni dans les autres veines de la tête ce qui autorise la circulation dans les deux sens. Les injections de la face au-dessus de la bouche doivent donc être traitées avec de grandes précautions pour éviter la dissémination intracrânienne d'éléments injectés (injections en zone dangereuse).

3. Vascularisation lymphatique

Elle met en jeu trois groupes de nœuds lymphatiques ou lymphonœuds (Figure 21) :

-**Nœuds lymphatiques submentaux** situés en dessous et en arrière du menton qui drainent les canalicules de la partie médiale de la lèvre inférieure et du menton de chaque côté ;

-**Nœuds lymphatiques submandibulaires** à la surface de la glande submandibulaire et inférieurs par rapport au corps de la mandibule qui drainent les vaisseaux lymphatiques du coin médial de l'orbite, d'une partie de la face latérale du nez, de la partie médiale de la joue, de la lèvre supérieure et de la partie latérale de la lèvre inférieure, et suivent le trajet de l'artère faciale ;

-**Nœuds lymphatiques pré auriculaires et parotidiens** en avant de l'oreille qui drainent les vaisseaux lymphatiques de la grande majorité des paupières, de la partie latérale du nez et de la joue.

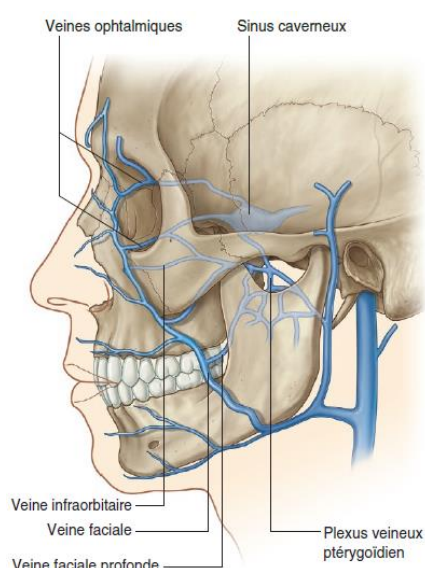


Figure 20. Connexions veineuses intracrâniennes

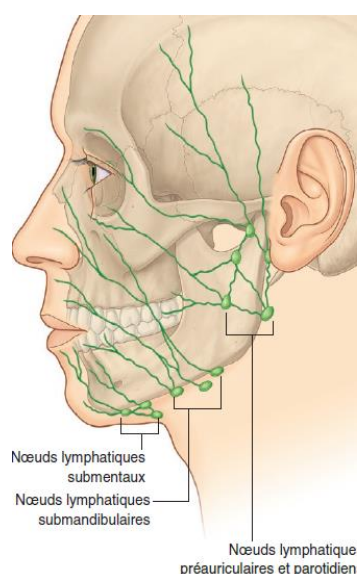


Figure 21. Vascularisation lymphatique de la face
(Gray's, Anatomie pour les étudiants, 2005)

e. Structures glandulaires

1. Glande lacrymale

Elle appartient à l'appareil lacrymal qui intervient dans la production, le mouvement et le drainage du liquide lacrymal à la surface du globe oculaire. Elle est située dans la partie antérieure de la région supérolatérale de l'orbite et le tendon du muscle releveur de la paupière supérieure la divise en deux portions : une **portion orbitaire** supérieure dans la fosse lacrymale de l'os frontal, et une **partie palpébrale** inférieure dans la partie supérolatérale de la paupière (Figure 22).

Son innervation présente trois composantes : i) une innervation sensitive via le rameau lacrymal du nerf ophtalmique (V_1) ; ii) une innervation sécrétomotrice parasympathique via le nerf du canal ptérygoïdien, via le nerf grand pétreux (VII), qui empruntera ensuite le trajet du nerf maxillaire V_2 puis du nerf zygomatique jusqu'au nerf lacrymal qui gagne la glande (Figure 23).

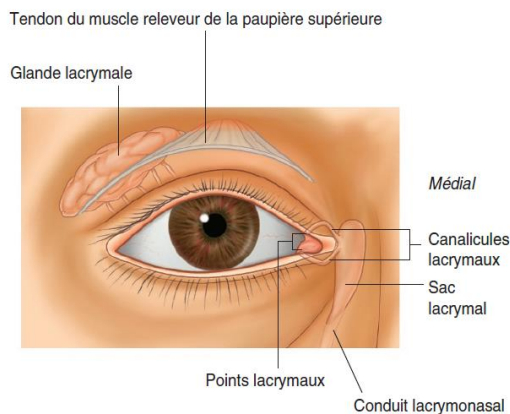


Figure 22. Système lacrymal, vue antérieure

(Gray's, Anatomie pour les étudiants, 2005)

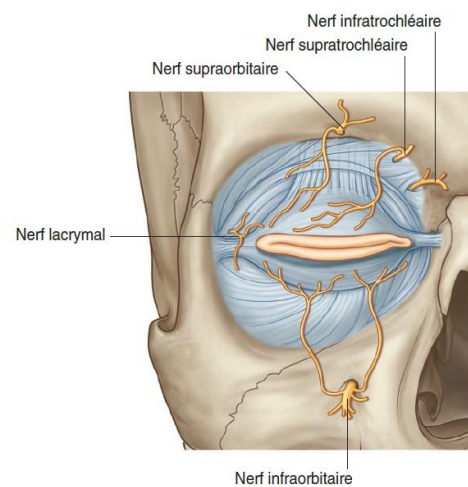


Figure 23. Innervation des paupières

2. Glandes salivaires

Elles s'ouvrent dans la cavité orale et sont pour la plupart de petites glandes de la sous-muqueuse ou de la muqueuse de l'épithélium oral qui tapisse la cavité buccale et s'ouvrent directement dans celles-ci. Il existe également des glandes dites macroscopiques plus

volumineuses au nombre de trois paires qu'il est nécessaire de connaître lors de procédures d'injection au niveau de la face et du cou : parotides, submandibulaires et sublinguales.

a) Glande parotide

Bilatérale et sous-cutanée, de forme triangulaire, il s'agit du lieu de division du nerf facial en rameaux. Ses limites sont les suivantes : muscle sternocléidomastoïdien en arrière, branche de la mandibule en avant, ligne joignant le méat acoustique externe et l'arcade zygomatique en haut. Elle est située en arrière et superficiellement par rapport au muscle masséter. Son conduit excréteur est le conduit parotidien (ou canal de Sténon), traverse le muscle buccinateur en profondeur pour s'aboucher en regard de la couronne de la deuxième molaire supérieure (Figure 24). Sa vascularisation naît de l'artère carotide externe et de ses branches adjacentes. Ses veines se drainent dans la veine jugulaire externe et ses lymphatiques dans les nœuds/ganglions parotidiens situés sur ou dans la glande qui se draineront dans les nœuds cervicaux. Elle reçoit son innervation de fibres qui cheminent avec le nerf glossopharyngien (IX) et qui rejoignent un rameau du nerf mandibulaire (V_3) dans la fosse infratemporale. Sa fonction est essentiellement une sécrétion réflexe à l'arrivée d'aliments dans la cavité buccale, ou à une odeur appétissante.

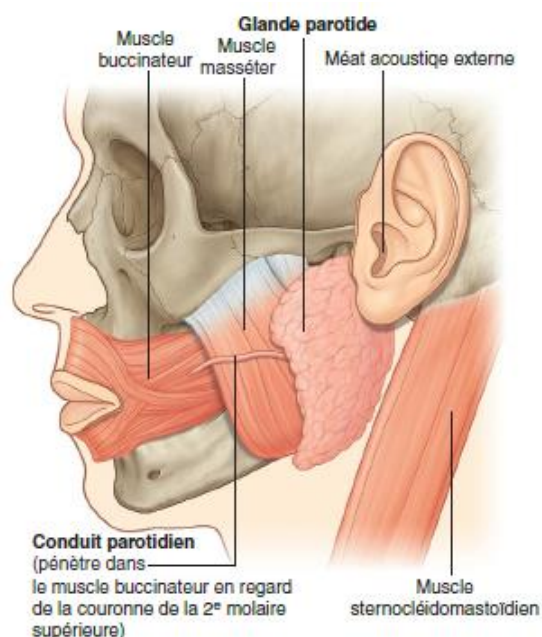


Figure 24. Glande parotide, vue latérale
(Gray's, Anatomie pour les étudiants, 2005)

b) Glande submandibulaire

De taille intermédiaire entre la parotide et la sublinguale, elle prend la forme d'un crochet et présente deux parties : une partie superficielle, la plus importante, est située dans la fosse submandibulaire située à la face médiale de la mandibule sous la ligne mylohyoïdienne ; une partie plus petite et plus profonde qui s'enroule autour du bord postérieur du muscle mylohyoïdien jusqu'à être latéral à la face latérale du muscle hyoglosse. Son conduit excréteur appelé conduit submandibulaire (ou canal de Wharton) s'ouvre au sommet de la papille sublinguale à côté de la base du frein de la langue (Figure 25). Elle est vascularisée par des branches des artères faciale et linguale. Ses veines se drainent dans la veine faciale ou linguale. Ses lymphatiques se drainent dans les nœuds submandibulaires puis cervicaux profonds. Son innervation parasympathique emprunte la corde du tympan du nerf facial (VII) qui s'unit au rameau lingual du nerf mandibulaire (V_3) dans la fosse infratemporale. Sa fonction est essentiellement une sécrétion tonique, non réflexe, lubrifiant la cavité buccale en continu.

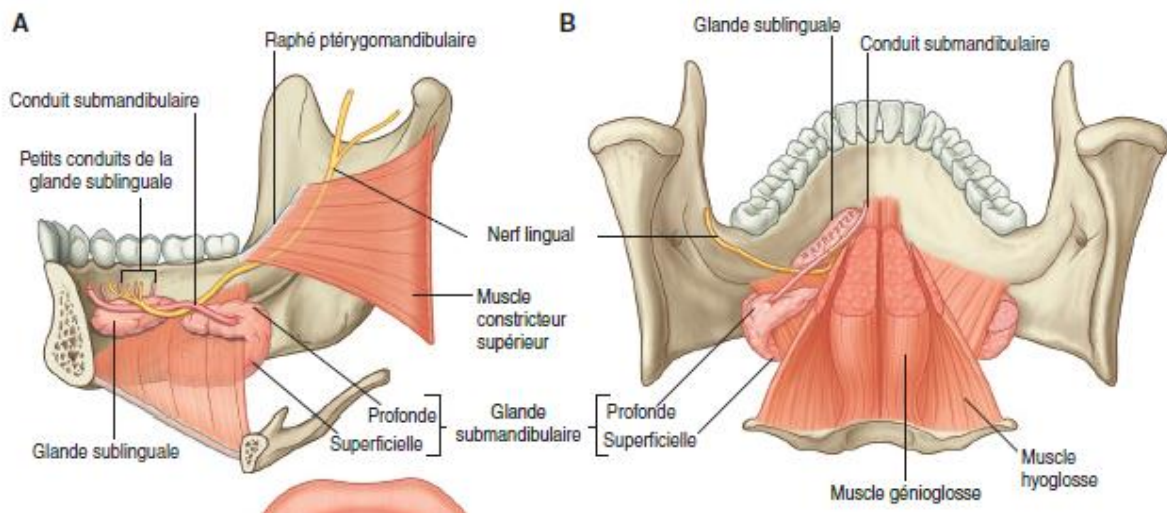


Figure 25. Glandes submandibulaire et sublinguale. A. Vue de profil. B. Vue postérieure.
(Gray's, Anatomie pour les étudiants, 2005)

c) Glande sublinguale

En forme d'amande, elle est située dans le plancher de la cavité buccale (Figure 25), contre la face médiale de la mandibule dans la fosse sublinguale. Elle se draine dans la cavité orale par

de nombreux petits conduits sublinguaux mineurs qui s'ouvrent sur la crête du pli sublingual. Elle est vascularisée par des branches des artères faciale et linguale. Ses veines se drainent dans la veine faciale ou linguale. Son innervation parasympathique emprunte la corde du tympan du nerf facial (VII) qui s'unit au rameau lingual du nerf mandibulaire (V₃) dans la fosse infratemporale.

3. Principales fonctions de la face et du cou

a. En lien avec les organes des sens

La face et le cou constituent l'habitable conditionneur et protecteur des systèmes récepteurs associés aux **fonctions sensorielles crâniofaciales** : cavités nasales avec l'olfaction, orbites avec la vision, oreilles avec l'audition et l'équilibre, et cavité buccale avec le goût mais également respiration et déglutition. Ce rôle classique d'optimisation des organes des sens domine les fonctions de mimique faciale et est donc un rôle fonctionnel majeur.

Les muscles des systèmes récepteurs s'organisent schématiquement autour de l'orifice buccal, des orifices narinaux et des orifices palpébraux. Ce sont des muscles péri-orificiels, cutanés, pairs à l'exception du muscle orbiculaire de la bouche. En conséquence directe, les uns sont dilatateurs et les autres constricteurs de ces orifices. Ils peuvent donc agir par synergie ou antagonisme.

b. Expression faciale

La principale fonction des muscles peauciers de la face réside en **l'expression des émotions** et de la **mimique faciale**. On entend par mimique les mouvements visibles – même s'ils sont parfois à peine perceptibles – des muscles du visage exprimant ce qu'une personne ressent et comment elle réagit. Les yeux et la bouche étant les parties du visage les plus mobiles, il leur revient une grande part en matière d'expressivité.

Le fascia superficiel de la face, qui correspond à une extension du fascia cervical superficiel du cou, englobe les muscles de la mimique faciale, qui forment le système musculo-aponévrotique

superficiel (SMAS). Le SMAS répartit les contractions des muscles faciaux responsables de l'expression faciale. Ces actions musculaires sont transmises à la peau par des attaches ligamentaires localisées entre le SMAS et le derme. Le SMAS est également connecté aux structures sous-jacentes osseuses par un réseau de septums fibreux et de ligaments. Ainsi, l'expression faciale est transmise depuis les structures fixées en profondeur de la face vers le derme sus-jacent. Le SMAS se poursuit au-dessus de l'arcade zygomatique, et il devient continu avec le fascia temporo-pariétal ; puis avec la galea aponevrotica (lame fibreuse recouvrant la surface de la voûte crânienne osseuse).

Les muscles peauciers sont en relation de commande avec le système limbique siège des émotions et en synergie potentialisatrice avec les muscles masséters et temporaux.

Bien que l'on reconnaisse en règle générale de nombreuses émotions distinctes, la plupart des études de recherche se sont limitées à six catégories de base – bonheur, surprise, tristesse, colère, peur et dégoût – ce qui s'explique par l'hypothèse selon laquelle seules ces six catégories sont représentées d'une manière différenciée à peu près uniforme à travers nos systèmes cognitifs et sociaux.

En utilisant le système FACS (Facial Action Coding System) permettant de quantifier les émotions d'un visage en utilisant des unités d'actions et proposé par Ekman et al. (Ekman and Friesen, 2019), une équipe de chercheurs a récemment montré qu'un nombre plus grand de catégories était utilisé par l'être humain avec la présentation de 22 émotions, 6 émotions dites de base et 16 émotions composées (Figure 26)(Du, Tao and Martinez, 2014). Cette reconnaissance des émotions dépend au moins en partie du système dopaminergique (Hälbig *et al.*, 2011).



Figure 26. Photographies des 22 émotions de l'être humain (Du et al, 2014) : (A) neutre, (B) heureux, (C) triste, (D) craintif, (E) en colère, (F) surpris, (G) avec dégoût, (H) surpris positivement, (I) avec dégoût mais positivement, (J) craintif avec malheur, (K) en colère et triste, (L) en colère avec surprise, (M) triste avec dégoût, (N) très en colère, (O) très surpris, (P) avec beaucoup de dégoût, (Q) surpris et en colère, (R) avec du dégoût et de la colère, (S), surpris avec du dégoût (T), consterné, (U) haineux, (V) impressionné.

C. Neuroanatomie et neurophysiologie des circuits neurologiques de la commande des muscles peauciers

1. Neuroanatomie du nerf facial et des muscles peauciers

a. Nerf facial

1. Préambule

Le nerf facial est le nerf le plus complexe de l'organisme ; il véhicule quatre types d'information nerveuses différentes. Il transporte des fibres afférentes somatiques générales, afférentes sensorielles, efférentes végétatives et efférentes branchiales motrices :

Les **fibres afférentes somatiques générales** conduisent les influx sensitifs du méat acoustique externe, de la partie profonde de l'auricule et d'une partie de la peau située en arrière de l'auricule ; les **fibres afférentes sensorielles** concernent le goût des deux tiers antérieurs de la langue ; les **fibres efférentes végétatives générales** stimulent l'activité motrice sécrétoire des

glandes lacrymale, salivaires submandibulaire et sublinguale, et des glandes des muqueuses de la cavité nasale, et des parties rigide et souple du palais ; **les fibres efférentes branchiales motrices** innervent les muscles de la mimique et du scalp venant du deuxième arc branchial ainsi que les muscles stapédien, ventre postérieur du digastrique et stylohyoïdien.

Anatomiquement, le nerf facial a **deux composantes** : la plus large est purement motrice et innerve les muscles de la mimique. Elle est accompagnée par une composante plus fine appelée nerf intermédiaire (*nervus intermedius*, TA ; anciennement de *Wrisberg* ou *VII bis*), contenant les fibres afférentes viscérales et somatiques, ainsi que des fibres efférentes viscérales.

2. Composante motrice du nerf facial

Le noyau moteur de la composante motrice du nerf facial est situé dans la partie ventrolatérale du tegmentum pontin, au-dessus du noyau ambigu (IX) et en dedans du noyau spinal du trijumeau (V). Les neurones de ce noyau moteur sont analogues aux motoneurones de la corne antérieure de la moelle spinale, mais ils dérivent embryologiquement du deuxième arc branchial. Ses **fibres afférentes** (commande centrale) proviennent du tractus pyramidal (implication dans la motricité faciale dite volontaire), des voies motrices indirectes (motricité faciale automatique et émotionnelle véhiculée avant tout par le système limbique mais aussi par d'autres structures du système nerveux central), du tractus tectospinal, du noyau du tractus solitaire et du tractus spinal du trijumeau (V).

Ses **fibres efférentes** radiculaires suivent un parcours compliqué : dans le pont, elles s'enroulent autour du noyau abducens formant le **colliculus du nerf facial** (Figures 27 et 28), créant ainsi une petite bosse sur le plancher du quatrième ventricule. Elles forment ensuite un faisceau compact, qui se propage ventrolatéralement jusqu'à l'extrémité caudale du pont et sort ensuite du tronc cérébral au niveau du sillon bulbo-pontique (Figures 28 et 29).

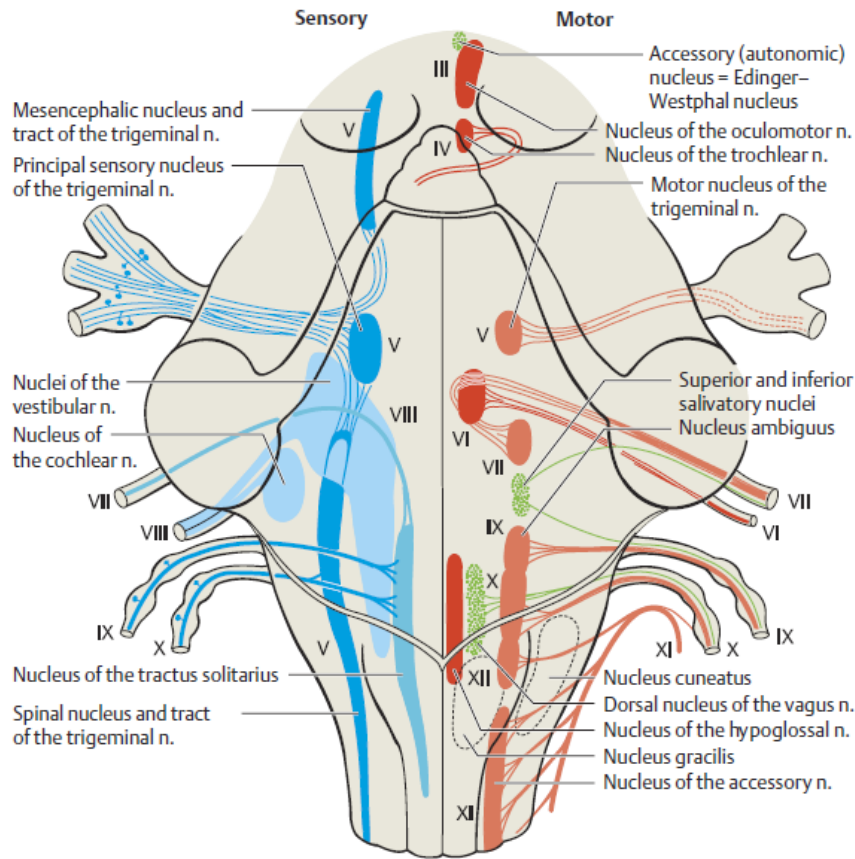


Figure 27. Schématisation des noyaux des nerfs crâniens, vue dorsale.
 Les noyaux sensitifs sont représentés sur la gauche du schéma, les composantes motrices et parasympathiques à droite (Duus, *Topical Diagnosis in Neurology*, 2005).

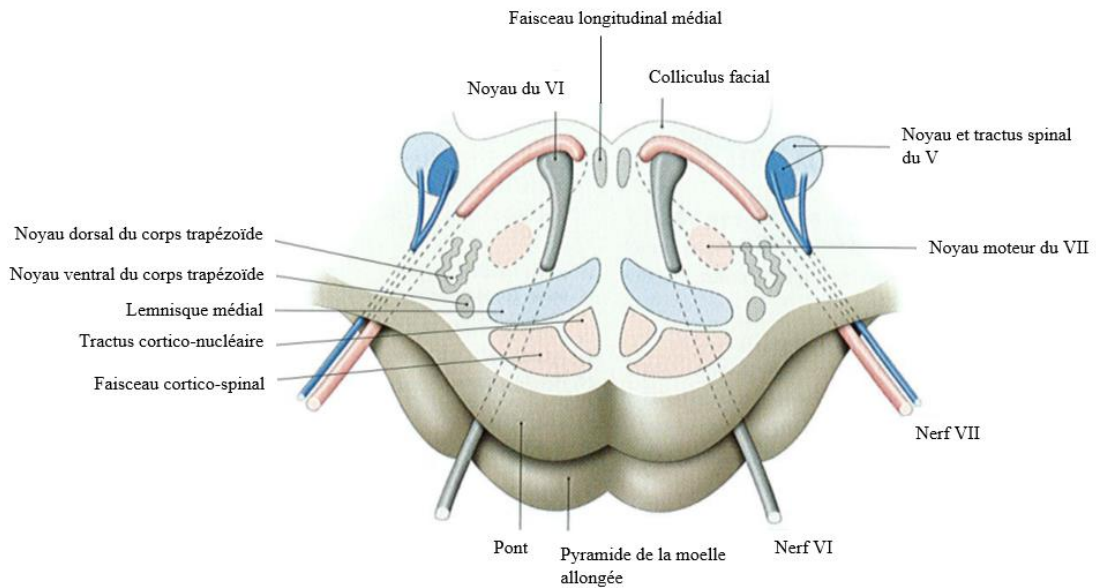


Figure 28. Noyaux du nerf abducens (VI) et du nerf facial (VII)
 Sur une coupe transversale du pont (Kamina, tome 5, 2^{ème} édition)

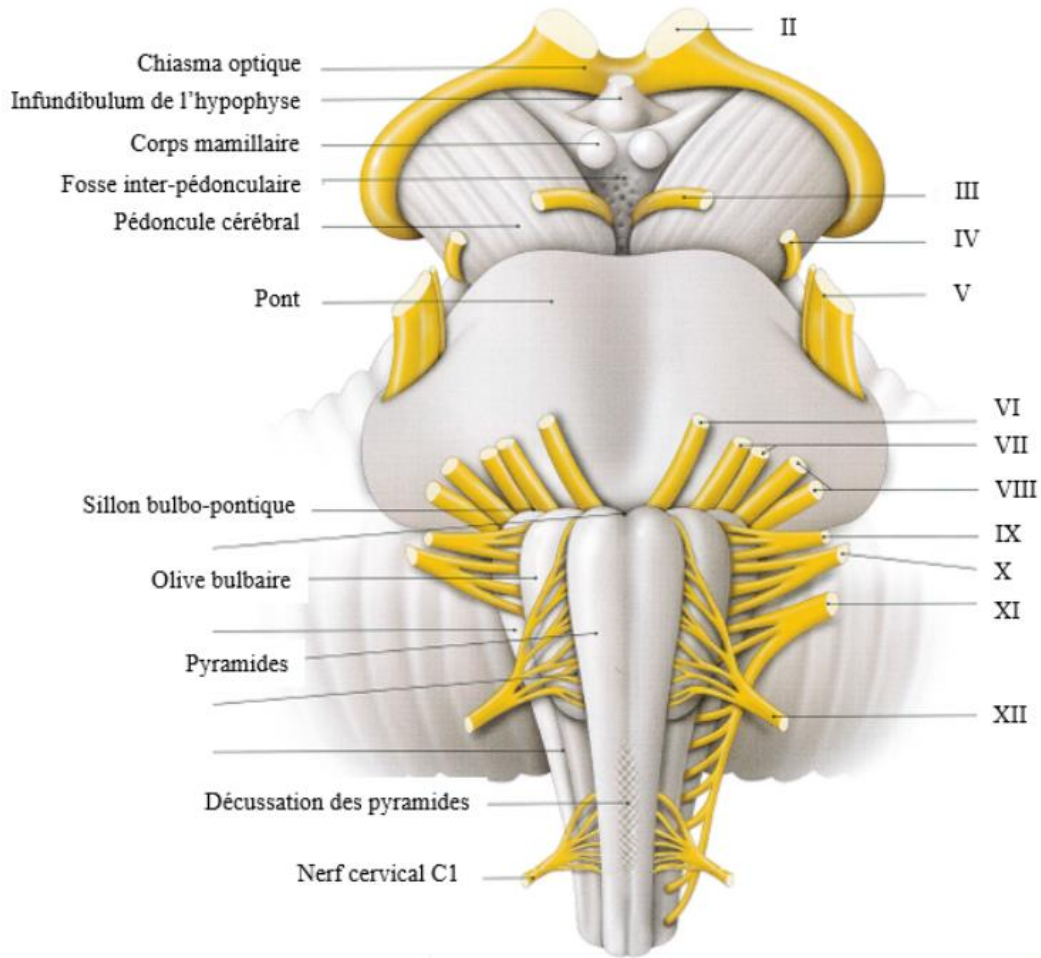


Figure 29. Tronc cérébral – origine des nerfs crâniens sur une vue antérieure
(Kamina, tome 5, 2^{ème} édition)

Le nerf facial moteur traverse l'espace subarachnoïdien dans l'angle ponto-cérébelleux et pénètre dans le méat acoustique interne (conduit auditif interne) avec le nerf intermédiaire et le nerf vestibulocochléaire (Figure 30). À l'intérieur du méat, le nerf facial et le nerf intermédiaire se séparent du nerf VIII et se déplacent latéralement dans le canal facial en direction du ganglion géniculé. Au niveau du ganglion, le nerf facial s'abaisse brusquement vers le bas (Figure 31). À l'extrémité inférieure du canal, le nerf facial sort du crâne par le foramen stylomastoïdien. Ses fibres motrices sont ensuite distribuées à toutes les régions de la face (la plupart d'entre elles passent d'abord par la glande parotide). Elles innervent tous les muscles de la mimique issus du deuxième arc branchial, ainsi que le stapedius, le platysma, le stylohyoïdien et le ventre postérieur du muscle digastrique (Figures 32 et 33).

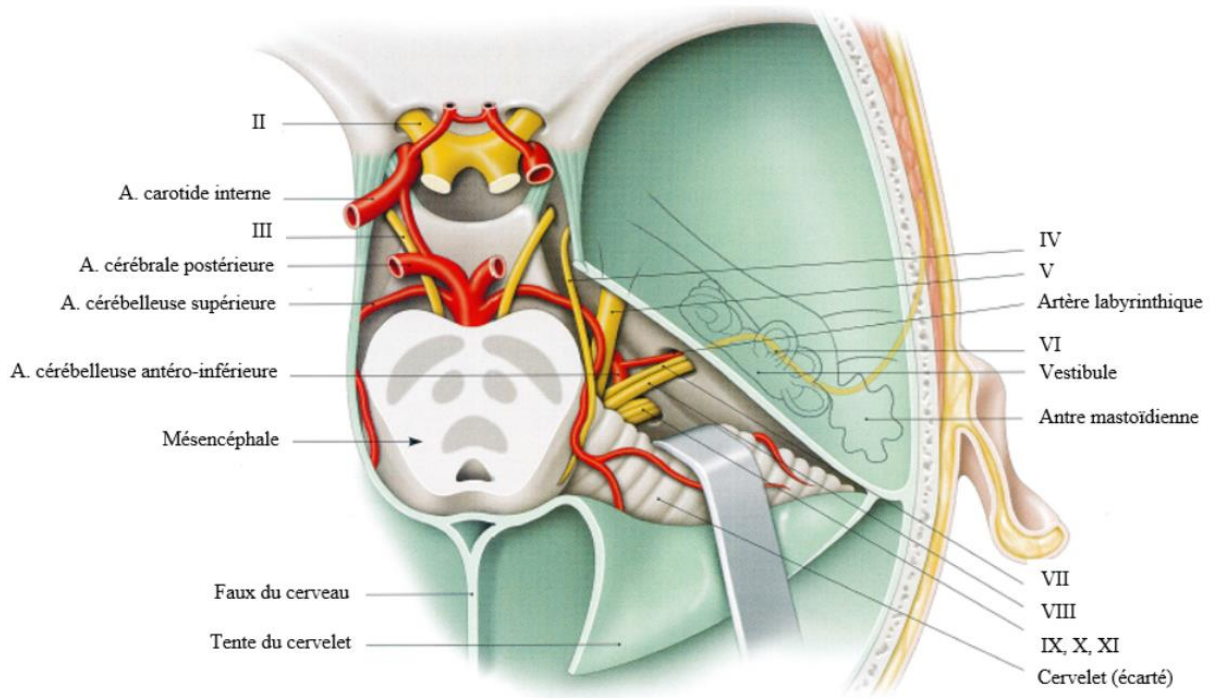


Figure 30. Nerf facial et nerf vestibulocochléaire
 Sur une vue antérieure de la fosse crânienne postérieure avec le cervelet récliné
 (Kamina, tome 5, 2^{ème} édition)

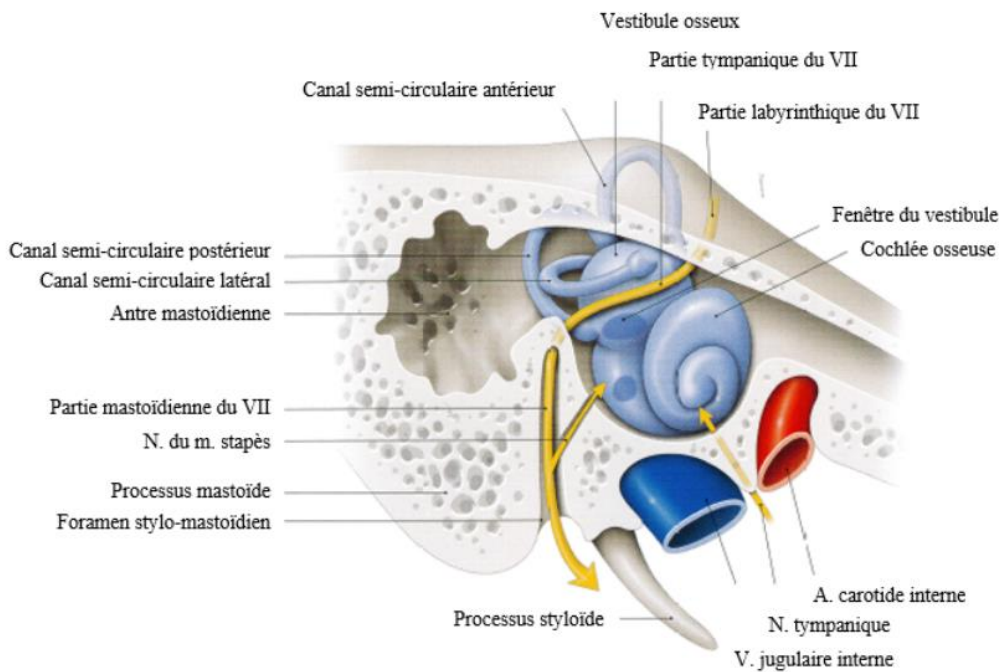


Figure 31. Nerf facial dans le canal facial sur une coupe longitudinale de l'oreille moyenne
 Avec ablation de sa paroi vestibulaire pour exposer le labyrinthe osseux
 (Kamina, tome 5, 2^{ème} édition)

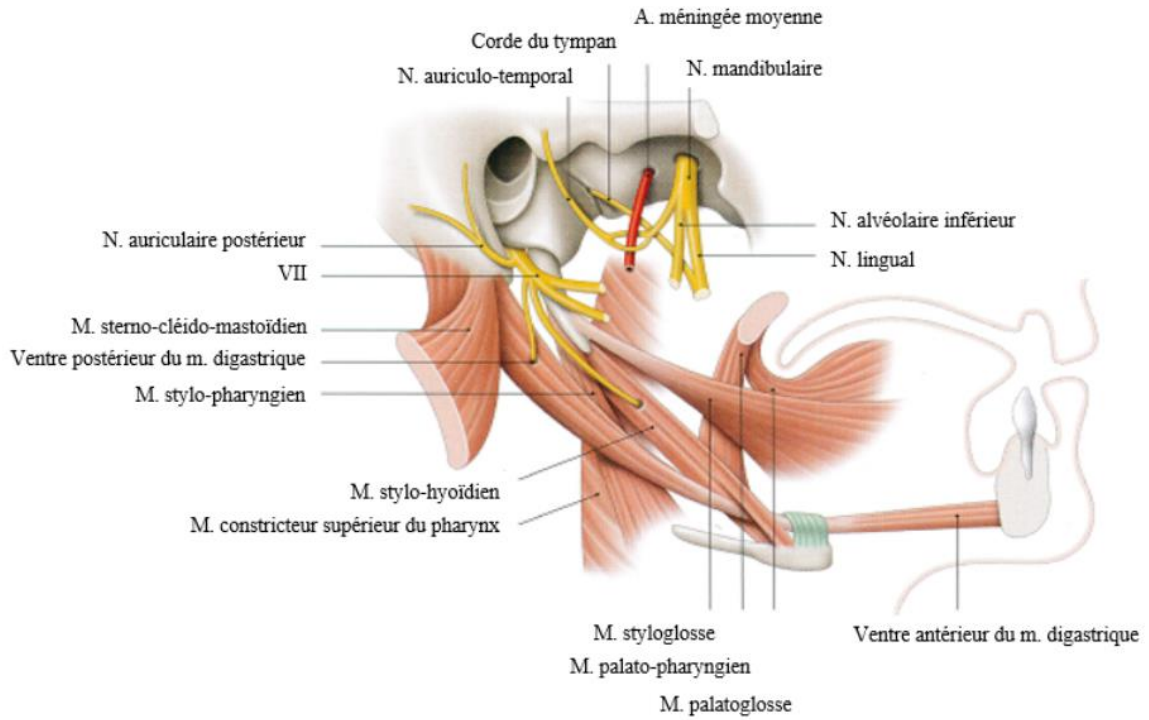


Figure 32. Branches collatérales du nerf facial sur une vue latérale
(Kamina, tome 5, 2^{ème} édition)

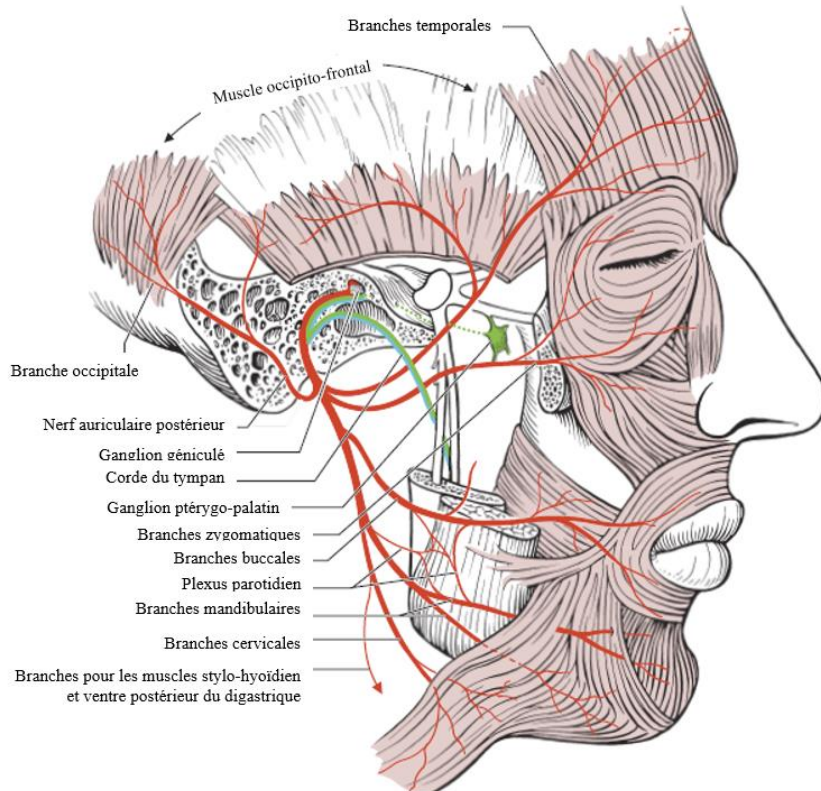


Figure 33. Trajet périphérique du nerf facial
(Duus', *Topical Diagnosis in Neurology*, 2005)

3. Nerf intermédiaire (de Wrisberg ou *nervus intermedius*, TA)

Le nerf intermédiaire (nommé parfois VII bis) contient des fibres afférentes et efférentes et véhiculent les informations non motrices, c'est-à-dire **somativo-sensorielles** et **gustatives**.

a) Fibres afférentes gustatives

Les corps cellulaires des fibres afférentes gustatives sont situés dans le ganglion géniculé qui contient des cellules pseudo-unipolaires ressemblant à celles des ganglions spinaux. Certaines de ces fibres afférentes naissent dans les papilles gustatives des deux tiers antérieurs de la langue. Ces fibres accompagnent d'abord le nerf **lingual** (une branche du nerf mandibulaire, la division la plus basse du nerf trijumeau), et transitent en passant par la **chorda tympani** (corde du tympan) jusqu'au **ganglion géniculé**, puis dans le **nervus intermedius** jusqu'à la partie supérieure du **noyau solitaire** (ancien *noyau gustatif de Nageotte*), située sous le trigone du nerf vague (X) de la fosse rhomboïde. Le noyau solitaire reçoit également des fibres gustatives du nerf glossopharyngien, représentant le goût sur le tiers postérieur de la langue et les papilles valléennes, et du nerf vague, représentant le goût sur l'épiglotte. Ainsi, les informations gustatives sont véhiculées par trois nerfs différents (VII bis, IX et X) de chaque côté. Une agueusie totale en lien avec une lésion nerveuse périphérique est ainsi peu probable. Au stade aigu d'une lésion du nerf facial impliquant le nerf intermédiaire, les patients décrivent une modification du goût avec parfois une impression de « goût métallique » sans franche hypogueusie, qui récupère rapidement en quelques jours. Le noyau solitaire est donc le noyau relais commun de toutes les fibres gustatives. Il envoie des influx gustatifs au à la partie médiale du noyau ventral postéro médial du **thalamus controlatéral**. Depuis le thalamus, la voie gustative se projette sur la partie inférieure du **gyrus post central** et sur l'**insula**. La Figure 34 illustre les récepteurs périphériques (papilles gustatives), le trajet périphérique des fibres gustatives (le long du nerf intermédiaire, du nerf glossopharyngien et du nerf vague) et leurs connexions centrales avec les noyaux correspondant du tronc cérébral.

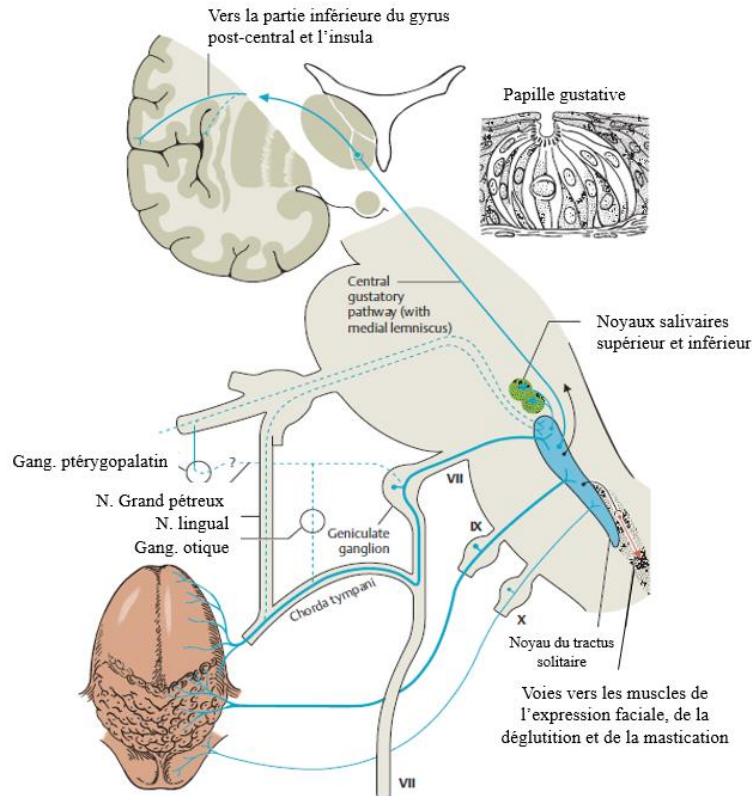


Figure 34. Fibres gustatives afférentes et voie gustative
(Duus, *Topical Diagnosis in Neurology*, 2005)

b) Fibres afférentes somatiques

Quelques fibres afférentes somatiques innervant une petite zone de l'oreille externe (pavillon), du conduit auditif externe et de la surface externe du tympan sont véhiculées par le nerf facial jusqu'au ganglion géniculé puis vers les noyaux sensitifs du nerf trijumeau (**noyau spinal du V**). Les fibres afférentes empruntent la branche auriculaire du **nerf vague** (X), puis le nerf intermédiaire (VII). La lésion cutanée typique de l'herpes zoster oticus ou zona du ganglion géniculé est due à la réplication virale dans ces fibres afférentes somatiques.

c) Fibres efférentes sécrétoires

Le *nervus intermedius* contient également des fibres efférentes préganglionnaires **parasymphiques** provenant de la **partie antérieure du noyau salivaire supérieur**, qui se trouve en position inféro-médiane par rapport au noyau moteur du nerf facial et qui sont responsables du contrôle des glandes lacrymales, nasales et salivaires, excepté la parotide. Elles

quittent le nerf intermédiaire au niveau du ganglion géniculé et empruntent deux voies : 1) une voie supérieure constituée du **nerf grand pétreux** et du nerf du canal ptérygoïdien, en faisant synapse dans le **ganglion ptérygopalatin** puis en se dirigeant soit dans le **nerf zygomatique** vers la glande lacrymale, soit dans des **rameaux nasaux** pour la muqueuse nasale, soit dans le **nerf grand palatin** pour le palais ; une voie inférieure constituée de la corde du tympan et du nerf lingual, jusqu'au ganglion submandibulaire et sublingual, dans lequel se trouve un relais synaptique. Les fibres postganglionnaires innervent les glandes sublinguales et submandibulaires induisant la salivation. Le noyau salivaire supérieur reçoit des informations du système olfactif par l'intermédiaire du **faisceau longitudinal dorsal** provenant de l'hypothalamus et du **noyau solitaire**. Cette connexion constitue la base anatomique de la salivation réflexe en réponse à une odeur appétissante. Les glandes lacrymales reçoivent leur stimulation centrale de l'**hypothalamus** (partie impliquée dans la gestion des émotions) par l'intermédiaire de la **formation réticulée** du tronc cérébral, tout comme le noyau spinal du nerf trijumeau (irritation de la conjonctive) (Figure 35).

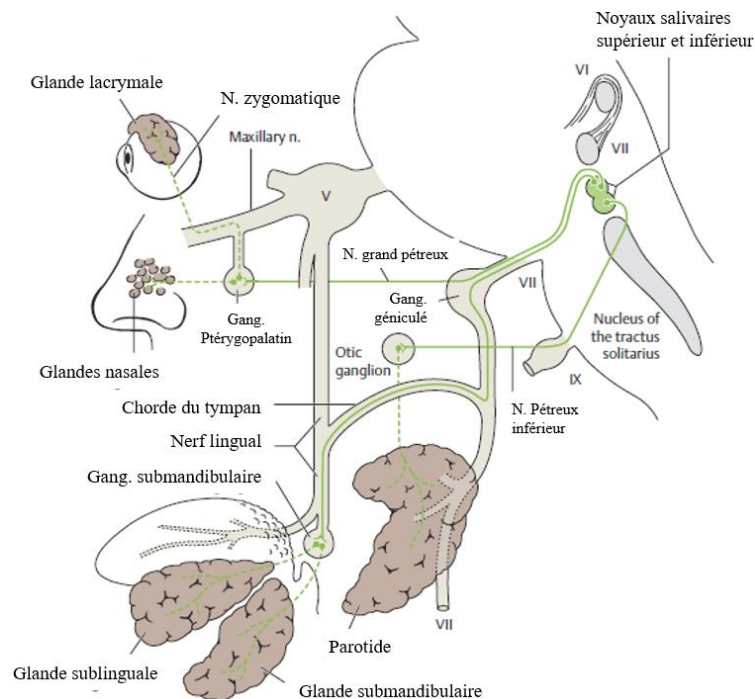


Figure 35. Innervation parasympathique des glandes de la face
(Duus, *Topical Diagnosis in Neurology*, 2005)

b. Muscles peauciers

1. Préambule

Les muscles peauciers sont un groupe unique de muscles cutanés qui mobilisent la peau par rapport au plan osseux sous-jacent et contrôle l'ouverture antérieure des orbites et de la cavité orale. La fonction première des muscles faciaux est l'expression faciale (« muscles de la mimique »). Ces muscles de la mimique faciale sont généralement très fins et jouent le rôle de sphincters et de dilatateurs des orifices faciaux, ainsi que d'élévateurs et d'abaisseurs des structures faciales. Ces muscles sont particuliers car ils s'insèrent directement dans le derme via le système musculo-aponévrotique superficiel (SMAS), ce qui leur permet leur fonction de muscles de l'expression. Dans le reste du corps, la peau et le tissu sous-cutané sont physiquement séparés de la musculature par une couche de fascia.

2. Anatomie microscopique des muscles peauciers

a) Embryologie des muscles peauciers

En embryologie humaine, six arcs branchiaux sont individualisés, mais le cinquième ne se développe pas. Chacun de ces arcs est associé au développement d'un nerf crânien ou de l'un de ses rameaux. De ces nerfs crâniens partent des fibres efférentes qui innervent les muscles dérivant des arcs branchiaux. Le **deuxième arc branchial** donnera le nerf facial responsable de la commande des muscles qui dérivent de ce même arc. Le développement de la face et du cou est fortement influencé par l'évolution des arcs branchiaux et de leurs dérivés. Chaque arc branchial est constitué d'un axe mésenchymateux tapissé extérieurement d'ectoblastes. En plus du mésenchyme d'origine locale, l'axe des arcs reçoit un contingent important de cellules de la crête neurale qui migrent dans les arcs branchiaux et vont contribuer à la formation du squelette de la face. Le **cartilage du deuxième arc**, dit de Reichert, encore appelé « arc hyoïde », donne naissance à l'étrier, à l'apophyse styloïde du temporal, au ligament stylo-hyoïdien et par sa partie ventrale, à la petite corne ainsi qu'à la partie crâniale de l'os hyoïde.

Cet arc, innervé par le nerf facial VII, donne aussi le ventre postérieur du muscle digastrique ainsi que les **muscles peauciers de la face et du cou**. Il est vascularisé par l'artère *stapédienne*, qui donnera les artères carotide interne et externe.

b) Histologie des muscles peauciers

Les muscles peauciers sont des **muscles striés à insertion conjonctive**. Ils montrent de grandes analogies avec le muscle strié squelettique : une localisation cellulaire similaire des protéines, une innervation acétylcholine-dépendante et des jonctions neuromusculaires également similaires. La présence de fuseaux neuromusculaires longtemps débattue a été remise en cause récemment en particulier dans les muscles péri-oraux tels que l'orbiculaire de la bouche et le zygomatique majeur (Omstead *et al.*, 2023). Rappelons que le fuseau neuromusculaire est un organe propriocepteur de la tension intramusculaire, en particulier de situations d'étirement, et accessoirement de la vitesse de contraction du muscle dont il est solidaire. Il est à l'origine du réflexe myotatique quand il est situé dans le muscle strié squelettique. Par contre, les fibres musculaires striées des muscles peauciers de la face ont un **diamètre inférieur** de l'ordre d'un facteur 3 à 5 à celui des fibres musculaires striées squelettiques, et les extrémités de ces fibres sont donc en contact direct avec le tissu conjonctif environnant (formant ainsi le *système musculo-aponévrotique supérieur* ou SMAS) sans présence de jonctions myotendineuses. Les unités motrices montrent une **organisation différente**, les fibres innervées par un seul axone apparaissant **contiguës**.

3. Anatomie macroscopique des muscles peauciers

Les muscles peauciers sont situés à différentes profondeurs au sein de l'architecture des tissus mous de la face et du cou. Certains sont superficiels quand d'autres sont profonds. Ils sont naturellement regroupés autour des orifices naturels de la face (orbite, orifice narinaire et bouche) et peuvent être présentés sous la forme de **groupes fonctionnels**.

a) Groupe fronto-orbitaire

Il est représenté par quatre groupes musculaires faciaux :

- Le **chef frontal du muscle occipito-frontal** (*musculus occipitofrontalis*, TA), communément appelé muscle **frontal**, ancien muscle épïcânien d'Albinus ou muscle peaucier du crâne. C'est un muscle fin, bilatéral, très adhérent au fascia superficiel sans insertion osseuse. Les deux muscles frontaux sont séparés par du tissu aponévrotique en regard de la ligne médiane du front. Il permet de relever les sourcils et d'abaisser la ligne d'implantation des cheveux (Figure 36). Dans la culture occidentale, il intervient avant tout dans les expressions d'étonnement et d'attention. Les rides frontales qui sont horizontales sont directement liées aux contractions du muscle frontal (Figure 37).
- Le muscle **procérus** (*musculus procerus*, TA), anciennement muscle **pyramidal du nez** ou encore **pilier du frontal**, est un petit muscle impair et superficiel qui s'insère sur le périoste de l'os nasal, l'aponévrose du muscle transverse du nez et le périchondre du cartilage latéral du nez. Ses fibres sont verticales et s'insèrent entre les deux têtes du sourcil en se mêlant aux fibres du muscle frontal (Figure 36). Il abaisse l'espace intersourcilier et remonte la peau en regard de la racine du nez. Il intervient dans la mimique du dégoût. Il détermine une ride transversale horizontale en regard de l'espace intercanthal (Figure 37).
- Le muscle **corrugateur du sourcil** (*musculus corrugator supercilii*, TA), ancien muscle **sourcilier**, est un petit muscle pair et profond situé sous le frontal et le procerus dans sa partie médiane. Il mesure environ 3 cm de long. Il s'insère sur l'os en regard de la partie interne de l'arcade sourcilière de l'os frontal, se dirige vers le haut et le dehors, de la profondeur à la superficie en passant entre les portions palpébrales et orbitaires de l'orbicularis oculi pour rejoindre la peau en regard de l'arcade sourcilière (Figure 36). Il fronce les sourcils et est le muscle du mécontentement, de la concentration, de

l'interrogation et de la douleur. Les rides dites « du lion » sont liées à sa contraction (Figure 37).

Le muscle **orbiculaire de l'œil** (*musculus orbicularis oculi*, TA) est un muscle pair, large, mince et concentrique. Il constitue un véritable sphincter pour le globe oculaire et ses annexes. Il est constitué d'une partie palpébrale interne, et d'une partie orbitaire externe. Il s'insère sur l'os frontal, l'os lacrymal, le maxillaire supérieur et le tendon canthal interne. Sa partie interne permet le clignement par fermeture oculaire douce alors que sa partie externe permet de fermer fortement les yeux (Figure 36). Il intervient par mise en jeu de sa partie interne dans la mimique du souci et de la préoccupation mais aussi de la séduction. La partie externe intervient davantage dans les réflexes de défense face aux agressions physiques extérieures (poussières, objet, soleil, etc.) ou l'expression du dégoût. On décrit en son sein une partie appelée **muscle de Horner-Duverney**, qui est entourée par le péricaliculaire et située en profondeur dans le sac lacrymal, et qui est d'une importance primordiale à tous les stades de l'écoulement du liquide lacrymal (Oklar, Yazıcıoğlu and Talan, 2023). La contraction de l'orbicularis oculi en particulier externe détermine les rides de la patte d'oie (Figure 37). Dans la partie palpébrale de l'orbiculaire de l'œil, on décrit une sous-partie appelée le **muscle de Riolan** qui intervient dans le clignement et qui est régulièrement injectée dans le blépharospasme ainsi que dans la PFP (Takahashi *et al.*, 2021). Le muscle de Riolan joue un rôle majeur dans la fermeture de la paupière et initie la fermeture de type sphincter effectuée par la partie orbitale de l'orbicularis oculi. Ce muscle est issu du muscle de Horner au niveau nasal et s'insère dans la bande canthale latérale au niveau temporal. Il est situé dans la zone la plus marginale de la paupière, qui s'étend sur et dans la plaque tarsale autour des cils. La *ligne grise*, qui est en fait la ligne brune observée sur la plate-forme du bord de la paupière, est l'expression du muscle de Riolan.

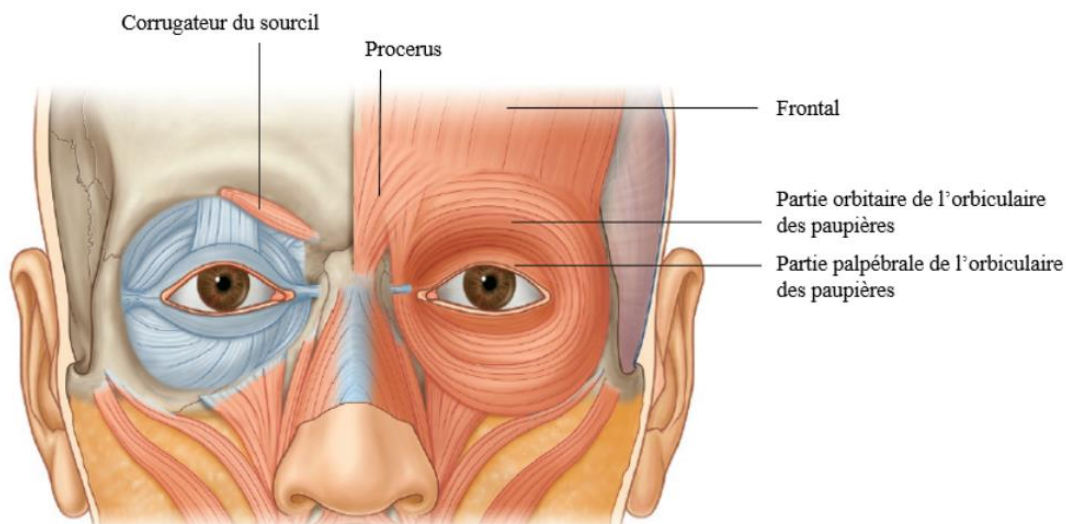


Figure 36. Groupe fronto-orbitaire des muscles de la face
(Modifié à partir de *Gray's, Anatomie pour les étudiants, 2005*)

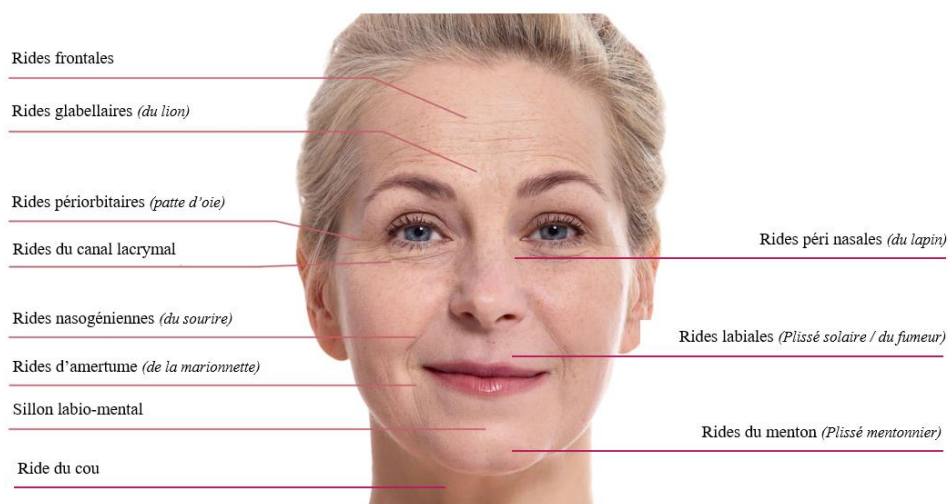


Figure 37. Principales rides de la face et du cou
(Modifié à partir de : <https://magazine.x115.it/fr/x115/rides-dexpression/>)

b) Groupe nasal

Il est composé de trois groupes musculaires qui sont de haut en bas (Figure 38) :

- Le muscle **élevateur de la lèvre supérieure et de l'aile du nez** (*musculus levator labii superioris alaeque nasi (TA)* ou **élevateur commun de la lèvre supérieure et de l'aile du nez** ou **releveur naso-labial** ou **élevateur superficiel** ou **releveur superficiel**, qui est pair, superficiel, fin et se situe en regard du sillon naso-génien. Il s'insère sur la face externe du processus frontal du maxillaire puis se dirige vers le bas et légèrement en

dehors pour se diviser en deux faisceaux : médial et latéral. Le faisceau médial se termine sur la face profonde de la peau du nez au niveau du cartilage de l'aile du nez ; le faisceau latéral s'insère sur la face profonde de la peau de la lèvre supérieure. Il intervient dans l'expression de la menace, du dégoût ou encore dans la détection d'une forte odeur. En se contractant, il attire la lèvre supérieure et l'aile du nez vers le haut, dégageant les dents.

- Le muscle **nasal** (*musculus nasalis*, TA), pair, fin, superficiel et médian, recouvre les cartilages nasaux. Il est semblable à un sphincter et est constitué de deux parties distinctes :
 - Une **partie transverse** : également appelée muscle triangulaire du nez ou muscle compresseur de la narine ou muscle transverse du nez ou muscle transversal du nez, il s'agit d'un muscle aplati, petit, mince, triangulaire qui prend son origine sur le maxillaire, au-dessus et latéralement de la fosse incisive. Ses fibres se dirigent vers le haut et l'intérieur, se transformant en une fine aponévrose qui se poursuit sur l'aile du nez. Elle se termine sur l'aponévrose du muscle controlatéral ainsi que sur celle du muscle procerus. Sa fonction est de comprimer voire fermer totalement les narines. Elle est impliquée dans l'expression de l'interrogation.
 - Une **partie alaire** : également appelée muscle dilatateur de la narine ou muscle dilatateur propre de Santorini ou muscle pinnal transverse de Cruveilhier, c'est un muscle petit, aplati, court et triangulaire situé sur l'aile du nez. Elle naît sur le maxillaire au-dessus de l'incisive latérale et se termine sur le grand cartilage alaire. La partie médiane de ses fibres peut fusionner avec celle du muscle abaisseur du septum nasal. Sa fonction est de dilater les orifices narinaires. Elle participe à exprimer l'énervement.

- Le muscle **abaisseur du septum nasal** (*musculus depressor septi nasi, TA*), encore appelé muscle myrtilforme (qui a la forme d'une baie de myrte) ou muscle abaisseur de l'aile du nez présente une forme aplatie, quadrilatère. Il est situé en dessous des orifices narinaires entre la muqueuse et la structure musculaire de la lèvre supérieure. Il s'insère sur le maxillaire dans la fosse canine puis ses fibres se dirigent vers le haut dans la face profonde de la peau en regard du septum nasal en arrière de la partie alaire du muscle nasal. Sa fonction est de fermer les narines en amenant la point du nez vers le bas, comme la partie alaire du muscle nasal. Il est mis en jeu lorsqu'on sent une odeur ou dans l'expression de la sidération et de l'hébètement.

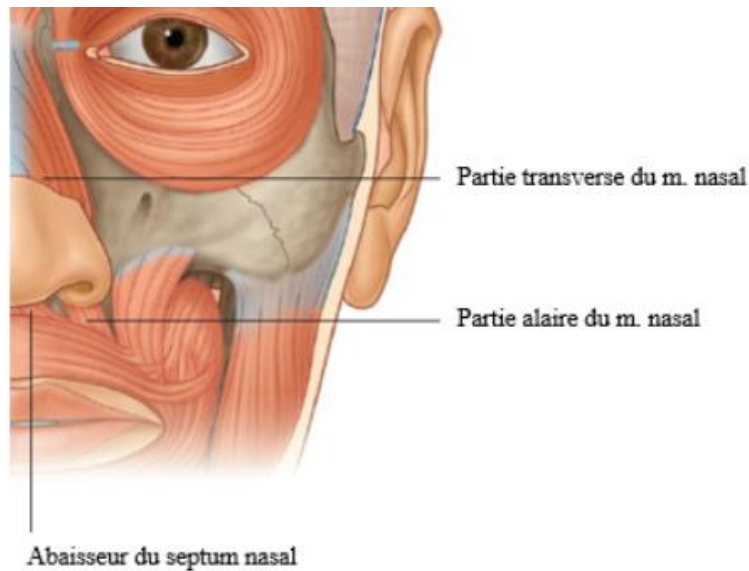


Figure 38. Groupe nasal des muscles de la face

Le muscle releveur de l'aile du nez et de la lèvre supérieure n'est pas représenté
(Modifié à partir de *Gray's, Anatomie pour les étudiants, 2005*)

c) Groupe oral

Il est constitué de 10 groupes musculaires qui sont de haut en bas (Figure 39) :

- Le muscle **élevateur de la lèvre supérieure** (*musculus levator labii superioris, TA*), pair, court, mince aplati, quadrilatère et dont la face longe les ailes du nez. Il s'insère sur le bord infra orbitaire du maxillaire et se termine sur la face profonde de la peau de

la lèvre supérieure. Il permet de relever la lèvre supérieure et intervient dans la tristesse et les pleurs.

- Le muscle **élevateur de l'angle de la bouche** (*musculus levator anguli oris, TA*) ou muscle **canin** ou muscle **releveur de l'angle oral**, pair, est un muscle plat et quadrilatère de la région jugale. Il s'insère dans la fosse canine du maxillaire, en dessous du foramen orbitaire, se dirige vers le bas et l'intérieur pour se terminer sur la peau de la lèvre inférieure, en regard de la canine, légèrement en dedans de la commissure labiale. Il est recouvert par le muscle releveur de la lèvre supérieure dans sa partie supérieure. Il permet d'élever la commissure labiale et de l'amener médialement, faisant apparaître la canine sous-jacente. Il intervient dans l'expression de l'agressivité et de la menace.
- Le muscle **petit zygomatique** (*musculus zygomaticus minor, TA*), pair, grêle, rubané, situé à la partie supérieure de la joue. Il s'insère sur la face latérale de l'os zygomatique en avant du muscle grand zygomatique. Il se dirige en bas et en dedans pour se terminer à la face profonde de la peau de la lèvre supérieure, en dedans de la commissure labiale. Il attire la lèvre supérieure en haut et en dehors ajoutant son action à celle du muscle grand zygomatique. Il exprime la joie et intervient dans le rire.
- Le muscle **grand zygomatique** (*musculus zygomaticus major, TA*), pair, allongé et rubané, qui naît latéralement au muscle petit zygomatique. Il s'insère sur la face externe de l'os zygomatique, se dirige vers le bas et en avant et se termine sur la commissure labiale ou ses fibres se mêlent avec celles de l'élevateur de l'angle de la bouche et de l'orbiculaire de la bouche. Il élève la commissure labiale vers l'extérieur et permet avec le petit zygomatique le sourire et l'expression de la joie et du rire.
- Le muscle **risorius** (*musculus risorius, TA*), pair est un petit muscle, plat, inconstant et de taille variable. Il naît du fascia massétéren et s'achève en avant dans la face profonde de la peau de la commissure labiale. C'est un muscle propre à l'homme qui attire la

commissure des lèvres en dehors et en arrière. Il intervient dans le sourire, la joie et la formation de la fossette du rire mais est également impliqué dans l'expression de l'ironie et du sourire narquois quand il se contracte de manière plus sélective. Il était anciennement appelé muscle **rieur** ou muscle risorius de Santorini (médecin et anatomiste italien du XVIIIe).

- Le muscle **orbiculaire de la bouche** ou des lèvres (*musculus orbicularis oris, TA*), est unique, a une organisation concentrique de ses fibres lui conférant un rôle de sphincter buccal. Ses insertions osseuses proviennent du maxillaire et de la mandibule. Il est composé de deux parties, une partie interne labiale et une partie externe jugale. Ses fibres se dirigent vers la peau et la muqueuse en regard des lèvres et du pourtour labial. Il ferme l'orifice buccal et projette les lèvres en avant. Il intervient dans la parole, la mastication. Il permet également de contenir l'air dans la cavité buccale et de gonfler les joues.
- Le muscle **buccinateur** (*musculus buccinator, TA*), pair, est un muscle rectangulaire et profond. Il s'insère sur les processus alvéolaires du maxillaire et de la mandibule, ses fibres se dirigent ensuite vers l'angle de la bouche où ses fibres inférieures sont en continuité avec celles de l'orbiculaire des lèvres. Il permet de rentrer et de creuser les joues et intervient dans l'action de souffler.
- Le muscle **abaisseur de l'angle de la bouche** (*musculus depressor anguli oris, TA*), ou anciennement muscle dépresseur de l'angle oral (DAO), ou muscle dépresseur de l'angle de la bouche, ou muscle triangulaire des lèvres. Il est pair, petit et de forme triangulaire. Il s'insère sur la mandibule en regard de la partie latérale du menton et se dirige vers le haut et l'intérieur pour s'insérer sur la peau au niveau des commissures labiales. Il abaisse l'angle de la bouche vers le bas et l'extérieur. Il exprime la tristesse.

- Le muscle **abaisseur de la lèvre inférieure** (*musculus depressor labii inferioris, TA*) ou anciennement appelé muscle carré du menton ou muscle dépresseur de la lèvre inférieure (DLI). Il est pair, de forme carrée, il est situé sur la partie latérale du menton. Il s'insère sur la mandibule, de façon plus médiale que le DAO puis ses fibres se dirigent vers le haut pour s'insérer en regard de la face profonde de la peau des lèvres inférieures. En se contractant, il tracte la lèvre inférieure homolatérale vers le bas et le dehors. Il transmet le mépris, la tristesse, la moue.
- Le muscle **mentonnier** (*musculus mentalis*), petit, pair, plat, triangulaire, il naît du bord inférieur de la mandibule près de la symphyse mentonnière et en dehors de la ligne oblique, se dirige vers le haut jusqu'au pli mentolabial. C'est le muscle de la partie centrale du menton. Il permet de relever directement la peau du menton, indirectement celle de la lèvre inférieure et de retourner la lèvre inférieure en donnant un aspect peau d'orange (froncement) de la peau du menton. Il intervient dans le mécontentement et la tristesse ainsi que les pleurs.

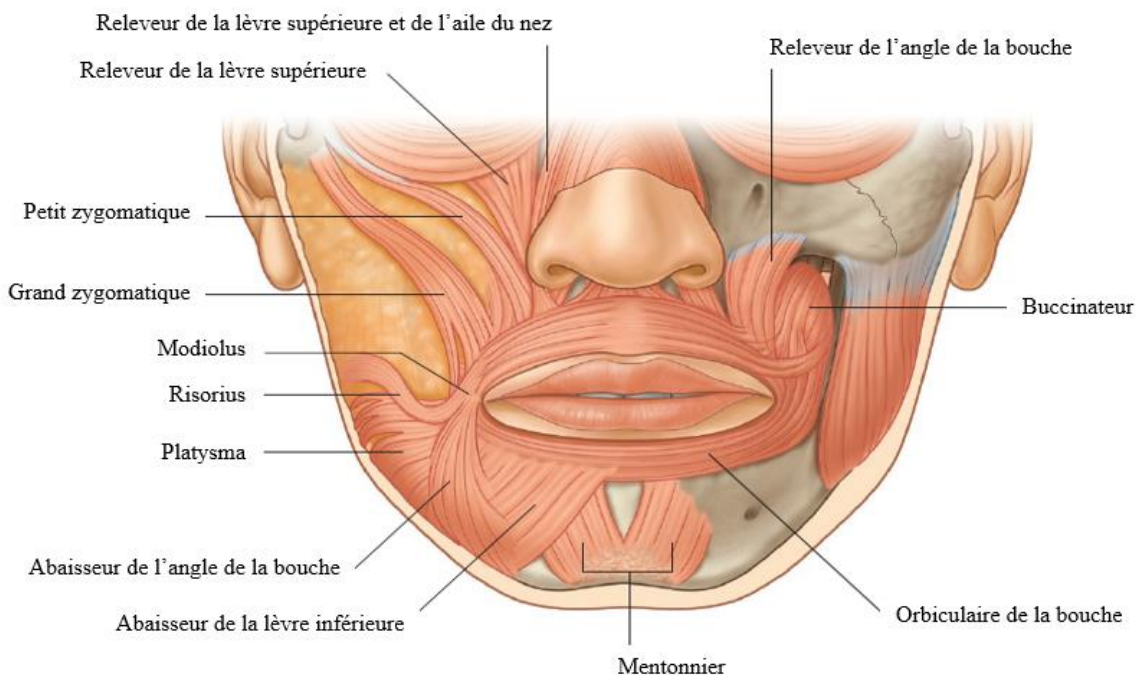


Figure 39. Groupe oral des muscles de la face
(Modifié à partir de *Gray's, Anatomie pour les étudiants, 2005*)

d) Groupe cervical

Il est constitué du muscle **platysma** (TA), anciennement peaucier du cou. Il s'agit d'un muscle plat, très fin, sous-cutané et quadrangulaire dans le fascia superficiel du cou. Il s'insère dans la partie supérieure du thorax dans la partie profonde de la peau en regard de la clavicule, de la partie deltoïdienne antérieure et de l'acromion et se dirige vers le haut vers la mandibule sur lequel il s'insère médialement, ses fibres les plus latérales rejoignant les muscles péribuccaux. Dans sa partie supérieure et postérieure il gagne parfois la nuque. Dans certains cas, ses fibres musculaires isolées constituent le **muscle transverse de la nuque**. En se contractant, il met en évidence les cordes platysmales à orientation verticale et qui persisteront au repos avec l'âge. Il est en continuité avec le muscle déprimeur de l'angle oral et le déprimeur de la lèvre inférieure et ces trois muscles fonctionnent ainsi souvent en synergie. A partir d'un point fixe sur la mandibule il met en tension et plisse longitudinalement la peau du cou ; à partir d'un point fixe inférieur il abaisse la mandibule (Figure 40).

e) Groupe auriculaire

Ce sont des muscles pairs, fins, situés dans la région de l'auricule. Ils sont au nombre de trois : muscle auriculaire antérieur, muscle auriculaire supérieur et muscle auriculaire postérieur (Figure 40).

- Le muscle **auriculaire antérieur** (*musculus auricularis anterior, TA*) : muscle mince, aplati en éventail, situé en avant de l'auricule. Il s'étend de l'épine de l'hélix et du bord antérieur de la conque de l'auricule à la galea aponevrotica. Il entraîne une légère protraction de l'auricule et une dilatation de la conque. Il est innervé par les rameaux de la branche temporo-faciale du nerf facial.
- Le muscle **auriculaire supérieur** (*musculus auricularis superior, TA*) : muscle très mince, de forme quadrilatère et radiée, situé au-dessus de l'auricule. Il s'insère depuis la galéa aponévrotique à la partie de la face médiale du cartilage de l'auricule en regard

de la fossette de l'anthélix. Il provoque une discrète élévation de l'auricule et une dilatation de la conque. Il est innervé par le rameau auriculaire postérieur du nerf facial.

- Le muscle **auriculaire postérieur** (*musculus auricularis posterior, TA*) : muscle très mince situé en arrière de l'auricule. Il s'insère de la convexité de la conque de l'auricule à la base du processus mastoïde au-dessous du ventre occipital du muscle occipito-frontal. Il entraîne une légère rétraction de l'auricule et une dilatation de la conque. Il est innervé par un rameau auriculaire postérieur du nerf facial.

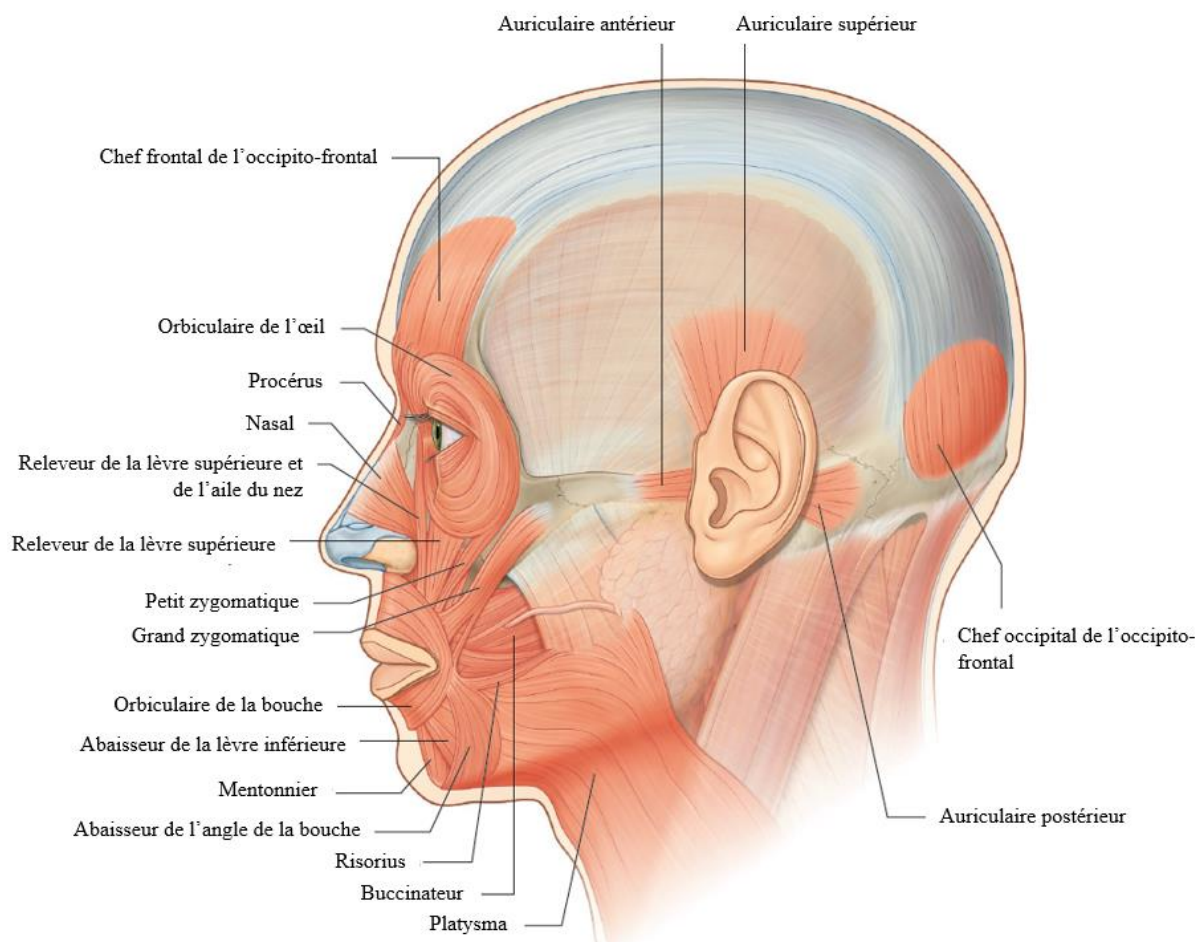


Figure 40. Principaux muscles peauciers de la face et du cou sur une vue de profil
(Modifié à partir de *Gray's, Anatomie pour les étudiants, 2005*)

f) Tableau synthétique des muscles peauciers

Muscle (TA)	Origine	Terminaison	Fonction anatomique	Fonction
GROUPE FRONTO-ORBITAIRE				
Frontal (<i>Frontalis</i>)	Peau du sourcil	Galéa aponévrotique	Elève le sourcil, plisse le front	Etonnement, attention
Procérus (<i>Procerus</i>)	Os nasal et partie supérieure du cartilage nasal latéral	Peau du bas du front entre les sourcils	Contracte la peau en regard de l'espace intercanthial	Dégout
Corrugateur du sourcil (<i>Corrugator supercilii</i>)	Peau en regard de l'extrémité médiale de l'arcade sourcilière de l'os frontal	Peau de la moitié médiale du sourcil	Tracte le sourcil vers le bas et le dedans (froncement)	Colère, interrogation, douleur
Orbiculaire de l'œil (<i>Orbicularis oculi</i>)				
- Partie palpébrale (<i>Pars palpebralis</i>)	Ligament palpébral médial	Raphé palpébral latéral	Occlusion palpébrale douce	Séduction, souci, préoccupation
- Partie orbitaire (<i>Pars orbitaris</i>)	Partie nasale de l'os frontal, processus frontal du maxillaire, ligament palpébral médial	Idem origine (ellipse)	Occlusion oculaire forte	Dégout, réflexe de défense face aux agressions extérieures
GROUPE NASAL				
Élévateur de la lèvre supérieure et du l'aile du nez (<i>Levator labii superioris alaeque nasi</i>)				
	Processus frontal du maxillaire	Faisceau médial : peau du cartilage de l'aile du nez	Relève l'aile du nez et la lèvre supérieure	Dégout, menace, détection d'une forte odeur
		Faisceau latéral : peau en regard de la lèvre supérieure		
Nasal (<i>Nasalis</i>)				
- Partie transverse (<i>Pars transversis</i>)	Os maxillaire, au-dessus et latéralement à la fosse incisive	Aponévroses du muscle controlatéral et du procérus	Compression voire fermeture des narines	Interrogation
- Partie alaire (<i>Pars alaris</i>)	Os maxillaire, au-dessus de l'incisive latérale	Cartilage alaire	Dilatation des narines	Enervement
Abaisseur du septum nasal (<i>Depressor septi nasi</i>)				
	Os maxillaire au-dessus de l'incisive médiale	Peau en regard du septum nasal	Attire le nez vers le bas	Détection d'une odeur, sidération, hébètement

Tableau 1. Synthèse anatomico-fonctionnelle des muscles peuciers du visage et du cou

Muscle (TA)	Origine	Terminaison	Fonction anatomique	Fonction émotionnelle
GROUPE ORAL				
Élévateur de la lèvre supérieure (<i>Levator labii superioris</i>)	Bord infra-orbitaire du maxillaire	Face profonde de la peau de la lèvre supérieure	Relève la lèvre supérieure	Tristesse, pleurs
Élévateur de l'angle de la bouche (<i>Levator anguli oris</i>)	Fosse canine du maxillaire, en dessous du foramen orbitaire	Peau de la lèvre inférieure en regard de la canine	Èlève la commissure labiale et l'amène médialement	Agressivité, menace
Petit zygomatique (<i>Zygomaticus minor</i>)	Face latérale de l'os zygomatique	Peau en regard de la commissure labiale	Attire la commissure labiale vers le haut et l'extérieur (sourire)	Joie
Grand zygomatique (<i>Zygomaticus major</i>)	Face latérale de l'os zygomatique	Peau en regard de la commissure labiale	Attire la commissure labiale vers l'extérieur et le haut (sourire)	Joie
Risorius (<i>Risorius</i>)	Fascia des muscles masséters	Peau du coin de la bouche	Rétracte le coin de la bouche	Joie
Orbiculaire de la bouche (<i>Orbicularis oris</i>)	Muscles environnants ; maxillaire et mandibule sur la ligne médiane	Peau de la bouche et des lèvres	Fermeture et protection des lèvres (bistou)	Interrogation, attention
Buccinateur (<i>Buccinator</i>)	Parties postérieures du maxillaire et de la mandibule ; raphé ptérygomandibulaire	Orbiculaire de la bouche	Appuie la joue contre les dents ; comprime les joues distendues	Etonnement, attention
Abaisseur de l'angle de la bouche (<i>Depressor anguli oris</i>)	Ligne oblique sur la mandibule, sous la canine, les prémolaires et la première molaire	Peau du coin de la bouche intrication avec l'orbiculaire de la bouche	Abaisse la commissure buccale vers le bas et l'extérieur	Tristesse, déception
Abaisseur de la lèvre inférieure (<i>Depressor labii inferioris</i>)	Partie antérieure de la ligne oblique mandibulaire	Lèvre inférieure, moitié médiane	Abaisse la lèvre inférieure et la porte vers l'extérieur	Tristesse, déception
Mentonnier (<i>Mentalis</i>)	Mandibule en dessous des incisives	Peau du menton	Èlève et retourne la lèvre inférieure, plisse la peau du menton	Interrogation

Tableau 1. Synthèse anatomo-fonctionnelle des muscles peuciers du visage et du cou
(suite)

Muscle (TA)	Origine	Terminaison	Fonction anatomique	Fonction émotionnelle
GROUPE AURICULAIRE				
Auriculaire antérieur (<i>Auricularis anterior</i>)	Partie antérieure du fascia temporal	Hélix auriculaire	Attire l'auricule vers le haut et l'avant	
Auriculaire supérieur (<i>Auricularis superior</i>)	Aponévrose épicroânienne de la face latérale de la tête	Partie supérieure de l'auricule	Attire l'auricule vers le haut	
Auriculaire postérieur (<i>Auricularis posterior</i>)	Partie mastoïdienne de l'os temporal	Convexité de la conque auriculaire	Attire l'auricule vers le haut et l'arrière	
GROUPE CERVICAL				
Platysma (<i>Platysma</i>)	Face profonde de la peau des régions deltoïdienne, acromiale et claviculaire ; peut gagner la nuque (m. transverse de la nuque)	Bord inférieur de la mandibule, tégnuments de la commissure labiale et de la joue	Point fixe sur la mandibule : tend et plisse longitudinalement la peau du cou; point fixe inférieur : abaisse la mandibule	Dégoût

Tableau 1. Synthèse anatomo-fonctionnelle des muscles peauciers du visage et du cou
(fin)

4. Repérage anatomique des muscles peauciers

Les muscles peauciers sont rarement mentionnés dans les rapports d'imagerie. Ils peuvent être difficiles à identifier avec précision sur l'imagerie de routine parce qu'ils sont étroitement entrelacés et peu épais. Leur **nature enchevêtrée** est principalement due à leur origine embryologique commune à partir du mésoderme du deuxième arc brachial (Som *et al.*, 2012). Ces muscles se forment d'abord comme une **grande nappe musculaire** au début du développement et commencent à **se différencier** rapidement en muscles individuels lorsque l'embryon atteint une longueur comprise entre 26 et 37 mm (Gasser, 1967).

Que ce soit dans un but diagnostique ou thérapeutique, le spécialiste (ORL, maxillo-facial, ophtalmologue, neurologue, plasticien, MPR neuroéducateur, kinésithérapeute ou encore orthophoniste) est régulièrement amené à repérer les muscles faciaux. Si le repérage clinique est la technique la plus utilisée, les muscles peauciers sont également identifiables à l'aide de différentes techniques d'imagerie.

a) Repérage clinique des muscles peauciers

La connaissance de l'anatomie de la face et du cou et des zones d'insertion des muscles peauciers décrites précédemment sont fondamentales dans la prise en charge des patients ayant une parésie faciale périphérique, qu'il s'agisse de son évaluation et/ou de sa prise en charge. La majeure partie des thérapeutes qui doivent accéder aux muscles du visage utilise un repérage clinique qui est visuel et qui peut parfois être palpatoire en fonction des muscles recherchés. Le clinicien peut également demander au patient de faire un mouvement volontaire, surtout lorsqu'il injecte dans un muscle du côté sain du visage, afin de repérer la zone la plus propice à l'injection.

b) Repérage des muscles peauciers par stimulation électrique, de surface et à l'aiguille

Les stimulations faciales par électrodes de stimulation de surface peuvent être effectuées par des opérateurs entraînés et en cas de muscles difficiles à repérer tels que les zygomatiçi ou le

depressor anguli oris ou encore pour détecter une activation musculaire lors de la contractions volontaire du muscle peaucier engagé (Arnold *et al.*, 2023; Efthimiou *et al.*, 2024). Il est également possible d'utiliser la stimulation à l'aiguille pour repérer un muscle facial donné (Cossu *et al.*, 1999; Utley and Goode, 1999), en utilisant de petites intensités et largeurs d'impulsion pour limiter au minimum le volume de stimulation efficace car les muscles peauciers de la face étant petits, plans et fins, les lignes de courant électrique peuvent facilement s'étendre et aller impliquer des muscles qui ne sont pas directement sous l'aiguille. Cette technique permet notamment de comparer différentes profondeurs d'insertion de l'aiguille en amont d'une injection de toxine botulique par exemple, pour une sélectivité maximale de l'injection. Elle permet également de mettre en évidence une activation anormale des unités motrices faciales au repos (contracture du muscle étudié) ou de détecter une activation même minime d'un groupe musculaire lors du mouvement volontaire maximale qui peut ne pas se traduire visuellement. Cela a en pratique clinique l'avantage de rassurer le patient et de le motiver à poursuivre sa rééducation

c) Imagerie par Résonance Magnétique

Lorsqu'on se réfère aux atlas et aux images anatomiques, on remarque qu'il existe des différences notables quant aux zones d'insertion des muscles faciaux (Freilinger *et al.*, 1987; Pessa *et al.*, 1998; Vercruyse *et al.*, 2016), probablement en lien avec des variations anatomiques inter-individuelles. Des études ont démontré que l'imagerie par résonance magnétique (IRM) est utile pour l'identification des muscles faciaux ainsi que la précision des zones d'insertion (Farrugia *et al.*, 2007; Som *et al.*, 2012; Schutte *et al.*, 2022, 2024). Il n'existe cependant à ce jour aucune méthode standardisée pour analyser l'anatomie des muscles faciaux. De plus, les séquences d'imagerie sont le plus souvent prises en condition de repos et sur des sujets exempts de lésion du nerf facial ce qui semble peu transposable au patient. Des équipes ont cependant montré que l'utilisation de l'IRM permettait de mettre en évidence des

modifications de volume musculaire des muscles peauciers après réinnervation chez des sujets atteints de parésie faciale périphérique (Mastryukova *et al.*, 2020) et que l'IRM était une technique pertinente en recherche clinique pour étudier les muscles peauciers (Gerd F. Volk *et al.*, 2014).

d) Echographie et doppler

L'émergence récente sur le marché d'appareils d'échographie de haute résolution a entraîné une utilisation croissante de ce type d'imagerie pour le repérage des muscles peauciers tout en sécurisant les injections de la face. Les injections de toxine botulique et d'acide hyaluronique sont très utilisées en médecine esthétique, notamment au niveau du visage et du cou (Nasr *et al.*, 2016; Hsu and Frankel, 2017), et des techniques de repérage écho et d'injection sont décrites depuis longtemps dans des recommandations. L'imagerie par échodoppler faciliterait ainsi le repérage des muscles cibles juste avant l'injection et éviterait de toucher les structures nerveuses ou surtout vasculaires de la région, comme l'artère faciale, pouvant être touchée au coin des lèvres en injectant de l'acide hyaluronique dans un sillon naso-génien. L'échographie peut également permettre de mettre en évidence l'absence de muscles peauciers, tel que le risorius qui est inconstant chez 5% des sujets.

L'échographie de haute résolution s'est imposée depuis quelques années comme l'un des outils d'imagerie les plus pratiques pour l'évaluation des tissus mous superficiels (Mlosek and Malinowska, 2013; Chang *et al.*, 2020). La plupart des muscles faciaux sont superficiels et clairement visualisables en échographie, permettant d'obtenir des informations morphologiques telles que **longueur, épaisseur, surface, volume et degré d'échogénicité**. A la différence de l'imagerie par résonance magnétique et de la tomодensitométrie, qui nécessitent des plans de coupe spécifiques pour une structure donnée, la sonde peut être positionnée à la demande selon l'alignement des muscles faciaux et l'évaluateur peut aisément observer la contraction musculaire.

Plusieurs études ont permis de visualiser les muscles faciaux en échographie (Alfen *et al.*, 2013; Volk *et al.*, 2013; Gerd Fabian Volk, Pohlmann, *et al.*, 2014; Abe *et al.*, 2019). Un protocole évaluant 19 muscles faciaux dont deux muscles non peauciers (muscles temporaux et masséters) a été proposé par une équipe taiwanaise en 2022 pour guider les cliniciens, en utilisant une sonde linéaire à haute fréquence de 10-25 MHz (X-Cube 90, Alpinion Medical Systems Co. Ltd., Anyang, Corée)(Wu *et al.*, 2022). En 2013, Alfen et al (Alfen *et al.*, 2013) ont utilisé les ultrasons pour étudier les muscles faciaux de 12 adultes sains et d'un patient atteint de dystrophie myotonique. Les auteurs ont observé une fiabilité test-retest modérée à excellente des mesures de l'épaisseur des muscles orbicularis oris, procerus et levator labii superioris. L'échogénicité de la plupart des muscles faciaux était plus élevée chez le patient atteint de dystrophie myotonique que dans le groupe témoin. Une autre équipe a étudié en échographie les muscles peauciers de 40 sujets adultes et a montré que les hommes présentaient des muscles depressor anguli oris plus épais et des muscles orbicularis oculi plus fins que les femmes. De plus, les femmes avaient une différence d'épaisseur de l'orbicularis oculi significative d'un côté par rapport à l'autre (Volk *et al.*, 2013). La même équipe a ensuite étudié les muscles faciaux de 140 sujets âgés de 21 à 93 ans (Gerd Fabian Volk, Sauer, *et al.*, 2014) et observé que quasiment tous les muscles, sauf le temporal, étaient symétriques. Ils ont également trouvé une corrélation entre l'indice de masse corporelle et la taille de la plupart des muscles peauciers étudiés. Ils ont ensuite utilisé les muscles faciaux de 20 patients souffrant d'une parésie faciale périphérique chronique et ont observé une taille musculaire significativement plus petite du côté parétique dans les muscles orbicularis oculi, orbicularis oris, depressor labii inferioris, depressor anguli oris et mentalis (Gerd Fabian Volk, Pohlmann, *et al.*, 2014). Aucune asymétrie latérale n'a été identifiée dans les muscles de la mastication (temporal et masséter) (Gerd Fabian Volk, Pohlmann, *et al.*, 2014). En 2016, ils ont étudié la corrélation entre les résultats échographiques et des analyses électromyographiques chez 44

patients atteints de parésie faciale périphérique unilatérale et ont observé que l'épaisseur des muscles faciaux au repos et pendant l'activation était corrélée avec l'activité d'électromyographie (Volk, Leier and Guntinas-Lichius, 2016). Les variations de l'épaisseur du muscle entre état de repos et contraction étaient significativement associées à l'activité volontaire sur l'électromyogramme. Ces corrélations étaient significatives 14 jours après l'apparition de la parésie. En 2019, Abe et al (Abe *et al.*, 2019) ont étudié la fiabilité de l'imagerie US pour mesurer l'épaisseur des muscles faciaux. La fiabilité intra-évaluateur exprimée à l'aide de coefficients de corrélation intra-classe allait de 0,425 (pour l'orbicularis oris) à 0,943 (pour le frontalis). La différence minimale importante variait de 0,25 mm (pour l'orbicularis oculi) à 1,82 mm (pour le masséter). En 2021, Hormazabal-Peralta et al (Hormazabal-Peralta *et al.*, 2021) ont étudié la profondeur des muscles médio faciaux et la distribution des vaisseaux à l'aide de l'échographie haute résolution chez 88 volontaires. Les auteurs ont clairement identifié l'artère faciale, la veine faciale, l'artère angulaire, la veine angulaire et les vaisseaux perforateurs du milieu de la face. En outre, une différence significative entre les sexes a été observée dans la profondeur de l'orbicularis oculi, du levator labii superioris alaeque nasi et du muscle zygomatique mineur.

e) Elastographie par ondes de cisaillement

L'élastographie par onde de cisaillement, ou *shear-wave elastography* (SWE), permet d'étudier le degré de rigidité ou de souplesse des tissus traversés par l'onde ultrasonore en affichant en temps réel la vitesse des ondes de cisaillement ou l'élasticité estimée des tissus (Bercoff, Tanter and Fink, 2004; Tanter *et al.*, 2008). Cette technique a été intégrée dans des systèmes d'échographie clinique polyvalents disponibles dans le commerce (machine Aixplorer®, Supersonic Imagine, Aix-en-Provence, France) et peut être utilisée dans différentes spécialités (hépatologie, chirurgie vasculaire, médecine vasculaire, etc.). La SWE produit des cartes élastographiques en couleur capables de fournir des mesures quantitatives de

l'élasticité dans une région d'intérêt définie par l'utilisateur. Contrairement à l'élastographie *de déformation*, la SWE ne nécessite pas de compression de la part de l'opérateur ni de source mécanique pour générer des contraintes, ce qui en fait une technique plus reproductible (Kim *et al.*, 2018). Elle a déjà été appliquée aux tissus mous de la tête et du cou et plus particulièrement pour évaluer les propriétés élastiques du muscle masséter (Herman *et al.*, 2017; Ewertsen *et al.*, 2018), des muscles cervicaux (Liu *et al.*, 2014; Dieterich *et al.*, 2017), des glandes salivaires (Mantsopoulos *et al.*, 2015), de la thyroïde (Bhatia *et al.*, 2012; Ariozi Habibi *et al.*, 2018) et du zygomaticus major (Ternifi *et al.*, 2019). Ces derniers travaux de Ternifi *et al.* ont étudié les propriétés morphologiques (épaisseur et texture) et élastiques (module de Young) du muscle grand zygomatique chez 15 volontaires sains en comparant deux transducteurs linéaires (résolution de 20 μ vs. Résolution habituelle de 50 μ) qui analysaient le groupe musculaire sur un plan horizontal (Figure 41). L'épaisseur du grand zygomatique était d'environ 2 mm quelle que soit la sonde, l'écho intensité variait de façon non significative selon la sonde contrairement au module de Young. L'utilisation de cette technique d'imagerie réalisable par le clinicien formé pourrait être une méthode d'analyse quantifiée intéressante des muscles peauciers avant/après de rééducation, injection ou chirurgie.

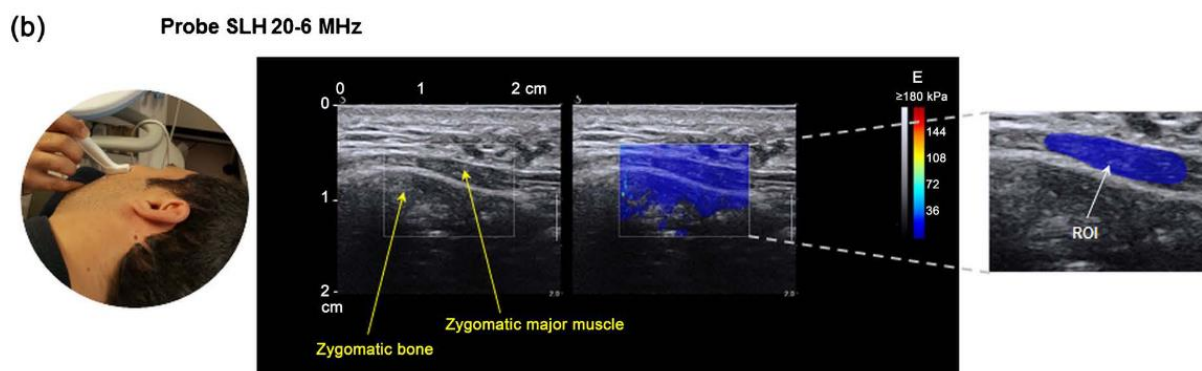


Figure 41. Mesure SWE à l'aide de la sonde SuperLinear™ SLH20-6 sur le muscle zygomaticus major. L'élastogramme couleur dans la case rectangulaire présente une couleur bleue homogène, indiquant l'uniformité des tissus mous dans une gamme de valeurs de module de Young allant jusqu'à 180 kPa. La zone d'intérêt (ROI) à droite représente la zone d'intérêt de la mesure sur le muscle ZM (Ternifi *et al.*, 2018).

2. Voies afférentes sensibles cervico-faciales

Les informations sensorielles afférentes provenant du visage et du cou partent de récepteurs faciaux extéroceptifs, proprioceptifs et intéroceptifs et sont conduites le long d'une fibre nerveuse afférente jusqu'à son corps cellulaire neuronal situé dans un ganglion (**géniculé** pour la zone de Ramsay-Hunt, **trigéminal** pour le territoire sensitif de la face innervé par le nerf trijumeau). Cet axone entre en contact synaptique avec un second neurone du tronc cérébral au niveau des noyaux sensitifs du tronc cérébral dont la course se poursuit soit jusqu'au thalamus – qui se projette soit au niveau du cortex somatosensoriel primaire situé dans le gyrus post-central du lobe pariétal (sensations conscientes) soit sur des structures sous-corticales (sensations inconscientes) – soit jusqu'au cervelet (sensations inconscientes).

a. Systématisation des voies sensibles cervico-faciales

Chaque voie sensible de la face et du cou est formée d'une **chaîne de trois groupes de neurones sensitifs**, un périphérique et deux centraux (Figure 42).

Le premier neurone sensitif est en relation avec le récepteur sensitif. Son corps cellulaire est situé dans un ganglion spécifique (trigéminal, géniculé) ou spinal (C2, C3). Son axone fait synapse au niveau de la corne postérieure homolatérale de la moelle spinale (C2, C3) ou dans un noyau homolatéral du bulbe.

Le deuxième neurone sensitif est central, son corps cellulaire est situé dans la corne postérieure de la moelle épinière ou dans un noyau du bulbe. Son axone **décusse** et monte pour faire synapse dans le cervelet ou dans le thalamus en passant parfois par les noyaux réticulaires. Enfin, le troisième neurone sensitif est aussi central, il se projette du thalamus vers le cortex cérébral, soit dans une aire spécifique, soit dans des aires dites non spécifiques.

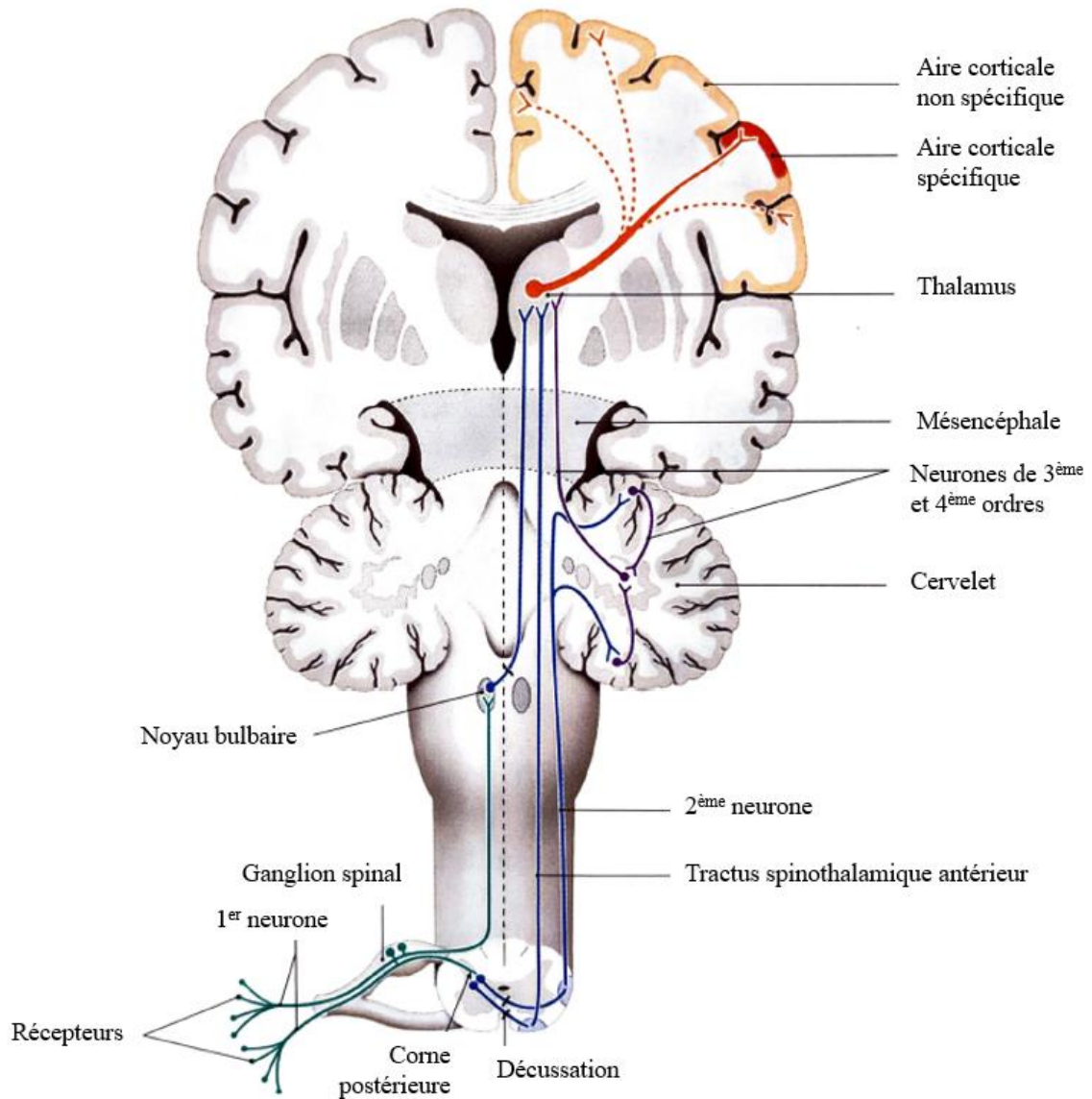


Figure 42. Schématisation des voies sensitives de la face et du cou
(Kamina, tome 5, 2^{ème} édition)

1. Voies sensitives conscientes de la face et du cou

Concernant les influx nociceptifs et thermiques de la face et du cou, le premier neurone part du récepteur via des fibres A delta et C et fait synapse sur un noyau de tronc cérébral. Le second neurone décusse au niveau du lemnisque médial et se dirige vers le noyau ventro-postéro-latéral du **thalamus controlatéral**. Enfin, le troisième neurone se projette du thalamus vers l'aire corticale somatosensitive et le gyrus précentral ou bien au niveau du gyrus cingulaire pour l'expression émotionnelle de la douleur.

2. Voies sensibles inconscientes de la face et du cou

Pour la sensibilité proprioceptive inconsciente des muscles, articulations et périostes de la face et du cou ainsi que pour la coordination des mouvements faciaux, le premier neurone par du récepteur périphérique et fait synapse dans un noyau du tronc cérébral. Le second neurone se dirige vers le **thalamus controlatéral** ou vers le **cervelet homolatéral** via le pédoncule cérébelleux inférieur homolatéral jusqu'au cortex cérébelleux. Le dernier neurone se projette enfin vers une **structure sous-corticale**.

b. Composantes périphériques du système somatosensoriel et circuits régulateurs périphériques

1. Récepteurs d'organes de la face et du cou

Les récepteurs sont des organes sensoriels spécialisés qui enregistrent les changements physiques et chimiques dans l'environnement externe et interne de l'organisme et qui les convertissent en signaux de communication chimiques dans l'environnement externe et interne de l'organisme puis en impulsions électriques (transduction) qui sont traitées par le système nerveux central. Ils se trouvent à l'extrémité périphérique des fibres nerveuses afférentes. Certains récepteurs informent l'organisme des modifications de l'environnement extérieur proche (**extérocepteurs**) ou de l'environnement extérieur lointain (**télécepteurs**, tels que l'œil et l'oreille). Les **propriocepteurs**, tels que le labyrinthe de l'oreille interne, transmettent des informations sur la position et le mouvement du corps, de la tête dans l'espace, la tension dans les muscles et les tendons, la position des articulations, la force nécessaire pour effectuer un mouvement donné, etc. Enfin, les processus à l'intérieur du corps sont signalés par les **intérocepteurs**, également appelés viscérocepteurs (y compris les osmorécepteurs, chémorécepteurs, mécanorécepteurs et barorécepteurs, entre autres). Chaque type de récepteur répond à un stimulus du type approprié et spécifique, à condition que l'intensité du stimulus soit supérieure au seuil de décharge. Les organes récepteurs sensoriels sont abondamment

présents dans la peau, mais on les trouve également dans des régions plus profondes de la face et du cou.

a) Récepteurs cutanés de la face et du cou

La plupart des récepteurs de la peau sont des **extérocepteurs**. Ceux-ci sont divisés en deux classes : (1) les **terminaisons nerveuses libres** (Figure 43) et (2) les **organes terminaux encapsulés**. Les organes terminaux *encapsulés* et différenciés sont probablement les principaux responsables de la médiation des modalités sensorielles *épicrotiques* telles que le toucher fin, la discrimination, la vibration, la pression, etc., tandis que les terminaisons nerveuses libres transmettent les sensations protopathiques telles que la douleur et la température.

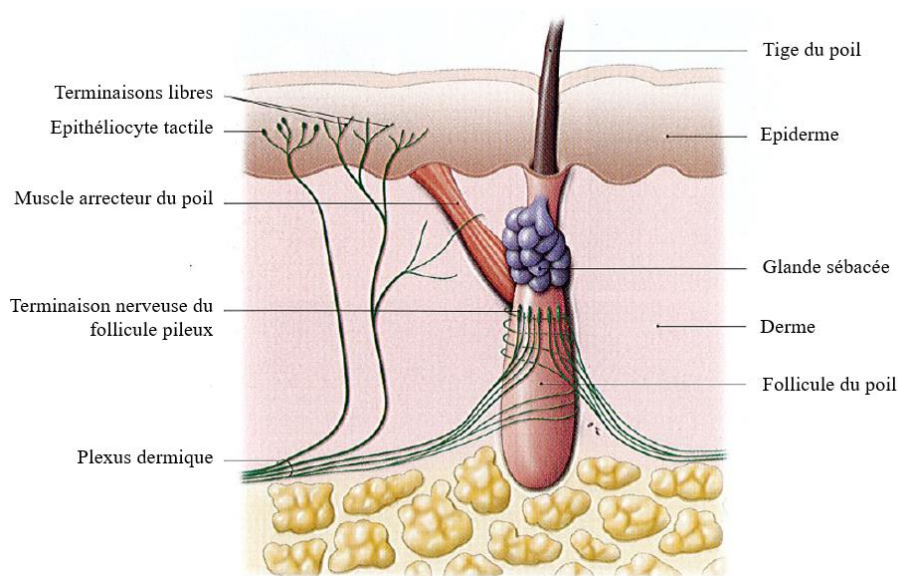


Figure 43. Terminaisons nerveuses cutanées in situ
(Modifié à partir de *Kamina, tome 5, 2^{ème} édition*)

Les différents organes récepteurs de la peau et de ses appendices sont représentés sur la figure 44.1. Ils comprennent les mécanorécepteurs (pour le toucher et la pression), les thermorécepteurs (pour le chaud et le froid) et les nocicepteurs (pour la douleur). Ces récepteurs sont situés principalement dans la zone entre l'épiderme et le tissu conjonctif. La peau peut ainsi être considérée comme un organe sensoriel qui couvre l'ensemble du corps.

Les récepteurs spécifiques d'organes comprennent par exemple les **terminaisons nerveuses pérित्रichiennes** autour des follicules pileux se trouvent dans toutes les zones de la peau poilue

et sont activées par le mouvement des poils. En revanche, les **corpuscules tactiles de Meissner** ne se trouvent que sur la peau glabre, en particulier sur la paume des mains et la plante des pieds, mais aussi sur les lèvres, la pointe de la langue et les organes génitaux, et sont activés par le mouvement des poils et les organes génitaux, et réagissent surtout au toucher et à la pression douce. Les **corpuscules laminés de Vater-Pacini** (corpuscules paciniens) se trouvent dans les couches plus profondes de la peau, en particulier dans la zone située entre le cutis (épiderme et derme) et le subcutis (hypoderme), et transmettent les sensations de pression modérée. Les **bulbes terminaux de Krause** étaient autrefois considérés comme des récepteurs du froid, tandis que les **corpuscules de Ruffini** étaient considérés comme des récepteurs du chaud. On a en effet constaté que les terminaisons nerveuses libres étaient capables de transmettre des informations sur la chaleur et le froid, ainsi que sur la position. Dans la cornée, par exemple, il n'y a que des terminaisons nerveuses libres pour transmettre des informations sur toutes ces modalités sensorielles. Outre les types de récepteurs mentionnés ici, il en existe de nombreux autres dans la peau et ailleurs, dont la fonction reste en grande partie inconnue.

Les terminaisons nerveuses libres se trouvent dans les fentes entre les cellules de l'épiderme, et parfois aussi sur des cellules plus spécialisées d'origine neuronale, comme les **disques tactiles de Merkel**. Les terminaisons nerveuses libres sont présentes non seulement dans la peau, mais aussi dans pratiquement tous les organes du corps, d'où elles transmettent des informations nociceptives et thermiques relatives aux lésions cellulaires. Les disques de Merkel sont principalement situés dans la pulpe des doigts et réagissent au toucher et à une légère pression.

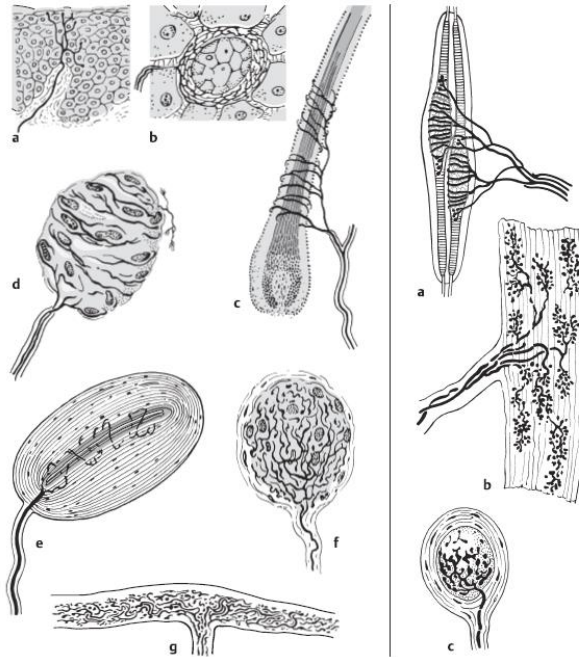


Figure 44.1

Figure 44.2

Figure 44.1 Récepteurs somatosensoriels de la peau. A Terminaisons nerveuses libres (douleur, température). B Disque tactile de Merckel. C Terminaisons nerveuses périrrichiennes autour d'un follicule pileux (toucher). D Corpuscule tactile de Meissner. E Corpuscule de Vater-Pacini (pression, vibration). F Bulbe terminal de Krause (froid ?). g Corpuscule de Ruffini (chaleur ?).

Figure 44.2 Récepteurs dans les muscles, les tendons et les fascias. A Extrémité annulospirale d'un fuseau musculaire (codant prioritairement pour l'étirement musculaire). B Organe tendineux de Golgi codant prioritairement pour la contraction du muscle)(*Houk and Henneman, 1967*). C Corpuscule de Golgi-Mazzoni (pression). (*Duus, Topical Diagnosis in Neurology, 2005*)

b) Récepteurs profonds de la face et du cou

Un deuxième groupe d'organes récepteurs se trouve en dessous de la peau, au sein des muscles, tendons, fascias et articulations (Figure 44.2). Dans les muscles, par exemple, on trouve les fuseaux neuromusculaires, qui répondent à l'étirement musculaire. D'autres types de récepteurs se trouvent à la jonction muscle/tendon, dans les aponévroses ou dans les capsules articulaires.

Les **fuseaux neuromusculaires** sont des corps très fins, en forme de fuseau, enfermés dans une capsule de tissu conjonctif et contenant des fibres dites intrafusales se trouvant entre les fibres striées de la musculature squelettique, en parallèle avec ces fibres dites extrafusales. Chaque fuseau musculaire contient généralement 3 à 10 fines fibres musculaires également

striées, appelées **fibres musculaires intrafusales**, par opposition donc aux fibres extrafusales du tissu musculaire proprement dit. Les deux extrémités de chaque fuseau, composées de tissu conjonctif, sont fixées dans le tissu conjonctif entre les fascicules musculaires, de sorte qu'elles se déplacent en même temps que le muscle. Une fibre nerveuse afférente, appelée terminaison annulospirale ou terminaison primaire, s'enroule au milieu du fuseau neuromusculaire. Cette fibre afférente possède une gaine de myéline très épaisse et appartient au groupe de fibres nerveuses à conduction la plus rapide de l'organisme, les fibres dites Ia (Lloyd).

Les **organes tendineux de Golgi** contiennent de fines terminaisons nerveuses, dérivées de branches de fibres nerveuses épaisses myélinisées, qui entourent un groupe de fibres tendineuses collagéniques. Ils sont enfermés dans une capsule de tissu conjonctif et sont situés à la jonction entre le tendon et le muscle, et sont connectées en série aux fibres musculaires adjacentes. A l'inverse des fuseaux neuromusculaires, ils signalent avant tout la *contraction* musculaire (c'est-à-dire l'étirement entre le muscle et le tendon)(Houk and Henneman, 1967). Les fibres auxquelles ils donnent naissance sont également du groupe I, on les appelle les fibres Ib.

Autres types de récepteurs. Outre les fuseaux neuromusculaires et les organes tendineux de Golgi, il existe d'autres types de récepteurs dans les tissus profonds comme les corpuscules laminés de Vater-Pacini et les corpuscules de Golgi-Mazzoni ainsi que d'autres terminaisons nerveuses terminales qui transmettent la pression, la douleur, etc.

2. Nerfs périphériques, ganglions et racines sensitives de la face et du cou

Pour atteindre le système nerveux central, l'influx afférent doit transiter par le nerf périphérique, son ganglion avant d'atteindre le noyau sensitif correspondant dans le tronc cérébral. Pour l'innervation sensitive de la face de la face antérieure du cou, plusieurs nerfs interviennent : nerf ophtalmique (V_1), nerf maxillaire (V_2), nerf mandibulaire (V_3), nerf grand

auriculaire (racines postérieures de C2-C3), nerf intermédiaire (VII bis) et nerf transverse du cou (racines postérieures de C2-C3) (Figure 45).

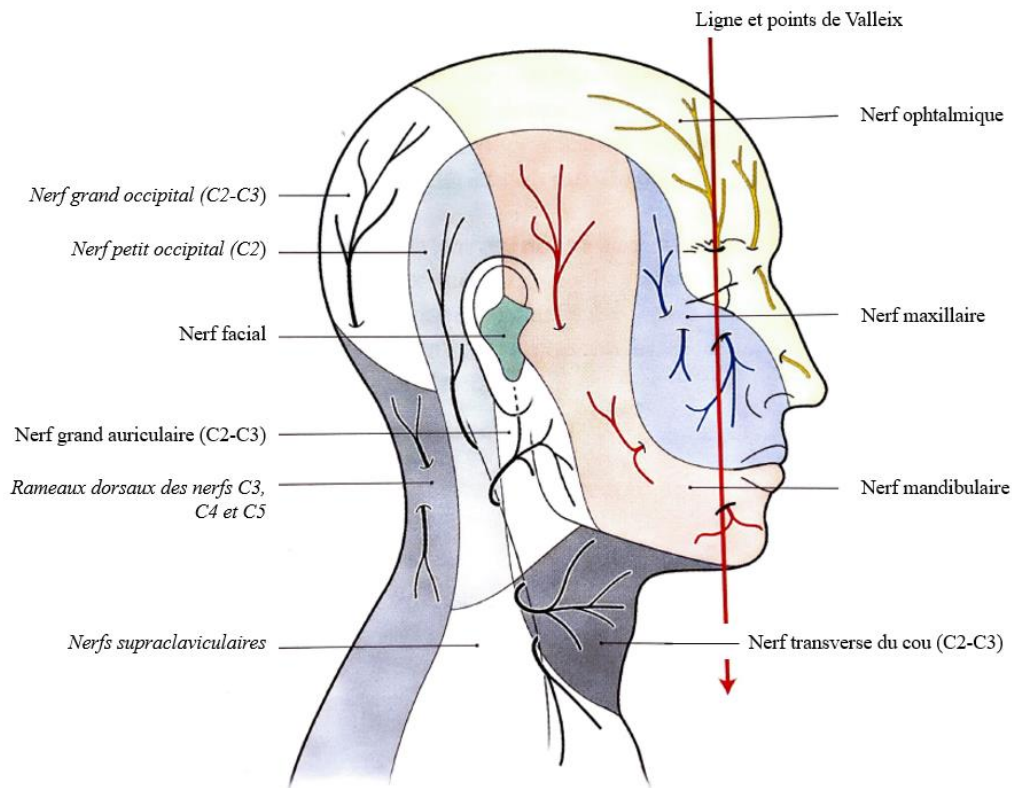


Figure 45. Innervation sensitive de la peau du visage, du crâne et du cou
(Modifié à partir de Kamina, tome 5, 2^{ème} édition)

a) Nerf ophtalmique (V₁)

Il se détache du ganglion trigéminal et parcourt le sinus caverneux pour se diviser en trois branches terminales après avoir donné des collatérales :

- Branches collatérales : elles sont constituées du nerf tentoriel (à destinée de la tente du cervelet et de la partie postérieure de la faux du cerveau), les rameaux méningés (pour le cavum trigéminal et le sinus caverneux) ;
- Branches terminales : elles cheminent dans la fissure orbitaire supérieure.
 - Le **nerf lacrymal** : il est responsable de la sensibilité de la **glande lacrymale** et de la **partie latérale de la paupière supérieure**. Il est souvent touché lors d'un

zona ophtalmique et se manifeste par une éruption vésiculeuse de la partie latérale de la paupière supérieure.

- Le **nerf frontal** : il transite au-dessus du muscle élévateur de la paupière supérieure et se divise en deux branches pour innerver les **téguments de la région du front** : le nerf supraorbitaire qui donne un rameau médial et un latéral ; le nerf supratrochléaire Il peut être également touché lors d'un zona ophtalmique.
- Le **nerf nasociliaire** : il se termine en deux branches : le nerf **éthmoïdal antérieur** qui pénètre dans la cavité nasale et s'y divise en deux rameaux nasaux internes, médial (destiné au **septum nasal**), et latéral (destiné à la **paroi latérale de la cavité nasale** en donnant le rameau nasal externe pour la **peau des ailes et de l'apex du nez**).

b) Nerf maxillaire (V₂)

Il transite par le sinus caverneux, le foramen rond, la fosse ptérygo-palatine, la fissure orbitaire inférieure, le sillon intra-orbitaire pour se terminer en nerf infra-orbitaire dans le canal intra-orbitaire.

- Branches collatérales : on retrouve le **rameau méningé moyen** à destinée de la dure-mère de la fosse crânienne moyenne, les **rameaux orbitaires** qui innervent les cellules éthmoïdales et le sinus sphénoïdal, le **nerf zygomatique** qui se divise en nerfs zygomatofacial et zygomatocotemporal, et les **nerfs alvéolaires supérieurs** qui innervent via un plexus nerveux les incisives, canines et molaires supérieures.
- Branche terminale : elle est unique, il s'agit du **nerf infra-orbitaire** qui se divise en rameaux palpébraux inférieurs, nasaux internes et externes et labiaux supérieurs.
-

c) Nerf mandibulaire (V₃)

Il présente un tronc nerveux très court qui se dirige rapidement vers le bas pour traverser le foramen ovale et se terminer dans la fosse infratemporale par deux branches : le nerf lingual et le nerf alvéolaire inférieur.

- Branches collatérales : on retrouve le **rameau méningé** qui innerve la dure-mère de la fosse crânienne moyenne ; des **rameaux ganglionnaires otiques** ; un **nerf massétérique** qui innerve le muscle masséter et l'articulation temporo-mandibulaire ; les **nerfs temporaux profonds** qui innervent la face profonde du muscle masséter ; le **nerf ptérygoïdien latéral** innervant le muscle ptérygoïdien latéral ; le **nerf ptérygoïdien médial** qui innerve le muscle ptérygoïdien médial mais aussi le tenseur du voile du palais et le tenseur du tympan ; le **nerf buccal** qui donne des rameaux cutanés et muqueux pour la muqueuse buccale et les gencives adjacentes aux 2^{ème} et 3^{ème} molaires inférieures ; le **nerf auriculo-temporal** qui donne le **nerf du méat acoustique externe**, les **nerfs auriculaires postérieurs**, un rameau pour la membrane du tympan, des rameaux parotidiens et un rameau communiquant avec le nerf facial et se termine par des branches qui innervent la peau de la région temporale.
- Branches terminales :
 - Le **nerf lingual** qui donne les rameaux de l'isthme du gosier, les rameaux communicants avec le nerf hypoglosse, les rameaux ganglionnaires submandibulaires et sublinguaux et se termine en rameaux linguaux destinés à la muqueuse du plancher buccal et de la langue située en avant du sillon terminal.
 - Le **nerf alvéolaire inférieur** qui se termine en nerf mentonnier pour donner le nerf mylo-hyoïdien qui innerve le muscle mylo-hyoïdien et le ventre antérieur du muscle digastrique et le plexus dentaire inférieur qui donne les rameaux dentaires et gingivaux inférieurs. Le nerf mentonnier se divise en rameaux

mentonniers pour la peau du menton et en rameaux labiaux inférieurs pour les téguments de la lèvre inférieure.

d) Ganglions impliqués

Les principaux ganglions participant à l'innervation sensitive et autonome de la face et du cou sont :

- Le ganglion du nerf trijumeau s'appelle le **ganglion trigéminal** (ancien ganglion de Gasser). Il est semi-lunaire, et mesure environ 1,5 mm de largeur, 0,5 de longueur et 3 mm d'épaisseur. Il est situé dans le cavum trigéminal qui correspond à un repli de la dure-mère et l'engaine jusqu'aux foramens crâniens. De son bord convexe naissent les trois branches du nerf trijumeau. En clinique, le syndrome para trigéminal ou encore dit de Raeder, dû à des compressions tumorales, débute par une névralgie faciale par compression de ce ganglion. Surtout, le repli de la dure-mère qui le contient se trouve à proximité géographique du pôle temporal situé au-dessus, proximité interprétée comme causale des atteintes temporales par contiguïté lors des encéphalites herpétiques.
- Le **ganglion ptérygopalatin** est situé dans la fosse ptérygo-palatine et est en connexion avec le nerf facial par le nerf du canal ptérygoïdien prolongeant le nerf grand pétreux. Il donne de nombreuses branches : des *rameaux orbitaires* qui innervent l'orbite, le sinus sphénoïdal et le sinus éthmoïdal ; le *nerf grand palatin* qui innerve la muqueuse du palais dur et les gencives en arrière de la deuxième prémolaire supérieure ; les *nerfs petits palatins* innervant le palais mou et la tonsille palatine ; les *nerfs nasaux latéraux* qui innervent les cornets nasaux et les cellules éthmoïdales postérieures ; le *nerf naso-palatin* qui innerve la partie antérieure du palais dur et le septum nasal et le *nerf pharyngien* qui innerve la muqueuse du nasopharynx.
- Le ganglion du nerf intermédiaire est le **ganglion géniculé**. Triangulaire, grisâtre, il est situé dans la partie labyrinthique du canal du facial, creusé dans la partie pétreuse de

l'os temporal. Il abrite les corps cellulaires des neurones sensitifs et autonomes qui transitent par le nerf intermédiaire. Son atteinte lors de répliquions virales herpétiques (zona dit du ganglion géniculé) est la cause de parésies faciales en contexte très douloureux puis fébrile éruptif, pouvant être particulièrement sévères.

e) Racines sensitives

Le nerf trijumeau émerge de la face latérale du pont, à la jonction du pont et du pédoncule cérébelleux moyen. La racine sensitive est située latéralement à la racine motrice et de taille nettement plus importante (environ 5 mm de diamètre contre 1mm pour la racine motrice). Les racines du nerf trijumeau transitent par la citerne ponto-cérébelleuse, entourées chacune par de la pie-mère et se dirigent vers la fosse trigéminal de la partie pétreuse de l'os temporal. Latéralement on retrouve le nerf facial et le nerf vestibulocochléaire (atteinte du V immédiatement après les symptômes cochléo-vestibulaires, et avant d'éventuelles atteintes cérébelleuses, lors de la croissance d'un neurinome vestibulaire de l'angle).

Les racines sensitives du nerf intermédiaire sont situées entre les racines motrices du nerf facial moteur et celles du nerf VIII. Elles émergent du sillon ponto-bulbaire au-dessus de l'olive bulbaire.

3. Circuits périphériques de régulation

a) Arcs réflexes

Ils existent de nombreux arcs réflexes au niveau de la face et du cou qui sont le plus souvent oligo- ou polysynaptiques et font intervenir des interneurones situés au sein du tronc cérébral et qui visent à protéger les éléments nobles tels que le globe oculaire, par exemple lors du réflexe cornéen (afférence par le trijumeau) ou le réflexe de clignement à la menace (afférence par le nerf optique) avec relais au niveau du tegmentum pontin via des interneurones qui

permettent une décussation partielle de l'influx et la stimulation des *deux* noyaux moteurs du nerf facial permettant la fermeture des yeux par contraction des deux orbicularis oculi.

b) Régulation de longueur musculaire et du tonus cervico-facial

Les fuseaux neuromusculaires présents dans les muscles peauciers sont les organes récepteurs à l'étirement et à la tension des fibres musculaires. Leur mise en jeu permet le maintien d'une contraction musculaire voire d'une longueur musculaire relativement constantes quand le sujet est en condition de repos. On parle de « tonus de repos ». En effet, chaque muscle cervico-facial possède un certain degré de tonus (au sens *physiologique français* du terme, c'est-à-dire d'activité résiduelle involontaire), y compris dans son état maximal de repos. Cliniquement au niveau du visage, le tonus ne s'observe que visuellement, l'extension *clinique anglophone* du terme *tone* au sens de résistance au mouvement passif n'étant pas transposable par rapport à l'examen clinique des membres. Une perte complète du tonus facial peut se produire lors d'une atteinte sévère de la composante motrice du nerf facial et dans une moindre proportion dans une atteinte sévère de la voie afférente sensitive. Le tonus de repos, n'est donc pas une propriété du muscle en soi mais est davantage maintenu par des arcs réflexes. Contrairement aux muscles des membres, la principale adaptation du tonus des muscles faciaux se fait en dehors d'une situation de lésion du nerf facial au stade chronique, face à la gravité terrestre et au mouvement : les muscles cervico-faciaux sont constamment soumis à la pesanteur mais sans nécessité d'y résister pour garder le visage « tonique ».

c. Composantes centrales du système somatosensoriel

Les fibres somatosensorielles vont ensuite pénétrer au niveau du système nerveux central au niveau de la zone de transition et donner naissance à de nombreuses fibres collatérales qui feront synapse avec d'autres neurones du tronc cérébral (tractus et noyaux du tronc cérébral). Les fibres correspondant à des modalités sensorielles différentes occupent des positions différentes dans le tronc cérébral. La gaine de myéline s'amincit considérablement quand les fibres traversent la zone d'entrée et pénètrent dans le tronc cérébral.

- **Noyaux sensitifs du nerf trijumeau (V)** : ils sont au nombre de trois et constituent le noyau crânien le plus long :
 - Noyau mésencéphalique du nerf trijumeau : il correspond à une mince colonne de chaque côté de l'aqueduc mésencéphalique. Ses fibres afférentes forment le tractus mésencéphalique du V, longent latéralement ce noyau. Elles véhiculent notamment la **sensibilité proprioceptive** des muscles masticateurs, de l'articulation temporo-mandibulaire, des dents et des **muscles faciaux** et extrinsèques de l'œil :
 - Noyau principal du nerf trijumeau (V) : anciennement appelé *noyau pontique du V*, il se trouve au niveau de l'angle latéral du quatrième ventricule, sous le tubercule trigéminal. Il est formé de deux noyaux : un noyau postéro-médial et un antéro-latéral. Ses fibres afférentes véhiculent la **sensibilité tactile discriminative de la face**.
 - Noyau spinal du nerf trijumeau (V) : il poursuit vers le bulbe et la moelle le noyau pontique suscité jusqu'au deuxième segment médullaire cervical où il se poursuit avec la corne dorsale de la moelle épinière. Il est longé par le tractus spinal du V. C'est ce noyau bas qui est le plus souvent atteint lors des gliomes

du tronc, causant des hypoesthésies péri-orales concentriques de diamètre croissant avec la progression tumorale.

- Fibres sensibles afférentes : elles conduisent les **sensibilités nociceptive et thermique de la face**. Le tractus spinal du V contient aussi des afférences des nerfs crâniens IX et X qui véhiculent la **sensibilité somatique de l'oreille**, de la langue, du pharynx et du larynx.
 - Fibres sensibles efférentes : elles forment le **lemnisque trigéminal** ou tractus trigémino-thalamique, **croisé** pour la majorité des fibres. Ces fibres gagnent le **noyau ventro-postéro-médial du thalamus**.
- **Noyau sensitif du nerf intermédiaire** (déjà vu précédemment)
 - **Voies sensibles conscientes** : les informations nociceptives thermiques et douloureuses provenant de la face et du cou transitent par le **tractus spino-thalamique latéral**. Les influx douloureux sont transmis par des fibres A delta à conduction relativement rapide qui alertent le sujet, puis par des fibres C à conduction plus lente qui prolongent la sensation douloureuse. La projection du troisième neurone se termine dans l'aire somato-sensitive et le gyrus post-central avec des connexions avec le gyrus cingulaire pour permettre l'interprétation émotionnelle de la douleur. Le **tractus spino-thalamique antérieur** permet lui de véhiculer aux centres nerveux des informations tactiles grossières et non discriminatives, des sensations prurigineuses et libidineuses. Le troisième neurone se comporte comme celui du tractus spino-thalamique latéral. Les sensibilités tactiles discriminative et proprioceptive conscientes sont impliquées dans la localisation spatiale et temporelle de la face. Elles sont véhiculées dans les faisceaux gracile et cunéiforme du tronc cérébral avant de faire relais dans les noyaux du même nom située dans le bulbe, puis empruntent le lemnisque médial controlatéral pour se terminer dans le noyau ventro-postéro-latéral du thalamus ou font relais dans le cervelet

homolatéral avant de rejoindre le cortex cérébelleux. Enfin le dernier neurone traverse la partie postérieure du bras postérieur de la capsule interne (région typiquement atteinte dans les infarctus de l'artère choroïdienne antérieure) et la corona radiata pour rejoindre le cortex du gyrus post central.

- **Voies somatosensitives inconscientes** : elles forment les tractus spinocérébelleux qui transmettent au cortex cérébelleux la sensibilité proprioceptive inconsciente des muscles faciaux, articulations et périostes. Ces tractus sont affectés au sens statocinétique et à la coordination des mouvements faciaux. Le premier neurone sensitif se projette sur le noyau sensitif du nerf intermédiaire dans le tronc cérébral. Le second neurone sensitif se dirige vers le cervelet (fibres montantes).
- **Poursuite centrale des colonnes postérieures** : tractus bulbo thalamique et lemnisque médian. Ces fibres traversent le bulbe, le pont et le mésencéphale et se terminent dans le noyau postéro-latéro-ventral du thalamus (VPL) ou ils font synapse avec le troisième neurone du tractus thalamocortical qui remonte postérieurement à la capsule interne et à la corona radiata jusqu'au cortex somatosensoriel primaire dans le gyrus post central.

3. Voies motrices descendantes

Paires et symétriques, elles acheminent les influx induits par le cortex moteur et impliqués dans la fonction motrice volontaire et involontaire (automatique). Concernant la motricité faciale, on distingue la voie motrice dite *directe* (volontaire) et la voie motrice dite *indirecte* (automatique et émotionnelle).

a. Voie motrice directe

Elle transmet l'influx moteur volontaire aux muscles peauciers et est constituée de deux neurones, central et périphérique (Figure 46). Le **premier neurone** est central, il prend son origine dans l'opercule rolandique (partie basse de la frontale ascendante). Son axone traverse la capsule interne au niveau de son genou, chemine dans le tronc cérébral (en médial dans le

pédoncule cérébral) puis fait synapse dans le noyau moteur du VII controlatéral (une partie accessoire des fibres ne décussent pas), empruntant le **faisceau corticonucléaire** (destiné à la motricité volontaire des nerfs crâniens V, VII, IX, X, XI et XII). Le **deuxième neurone** est périphérique et nucléo-musculaire, c'est le motoneurone facial. Il correspond au contingent moteur du nerf VII (Figure 47).

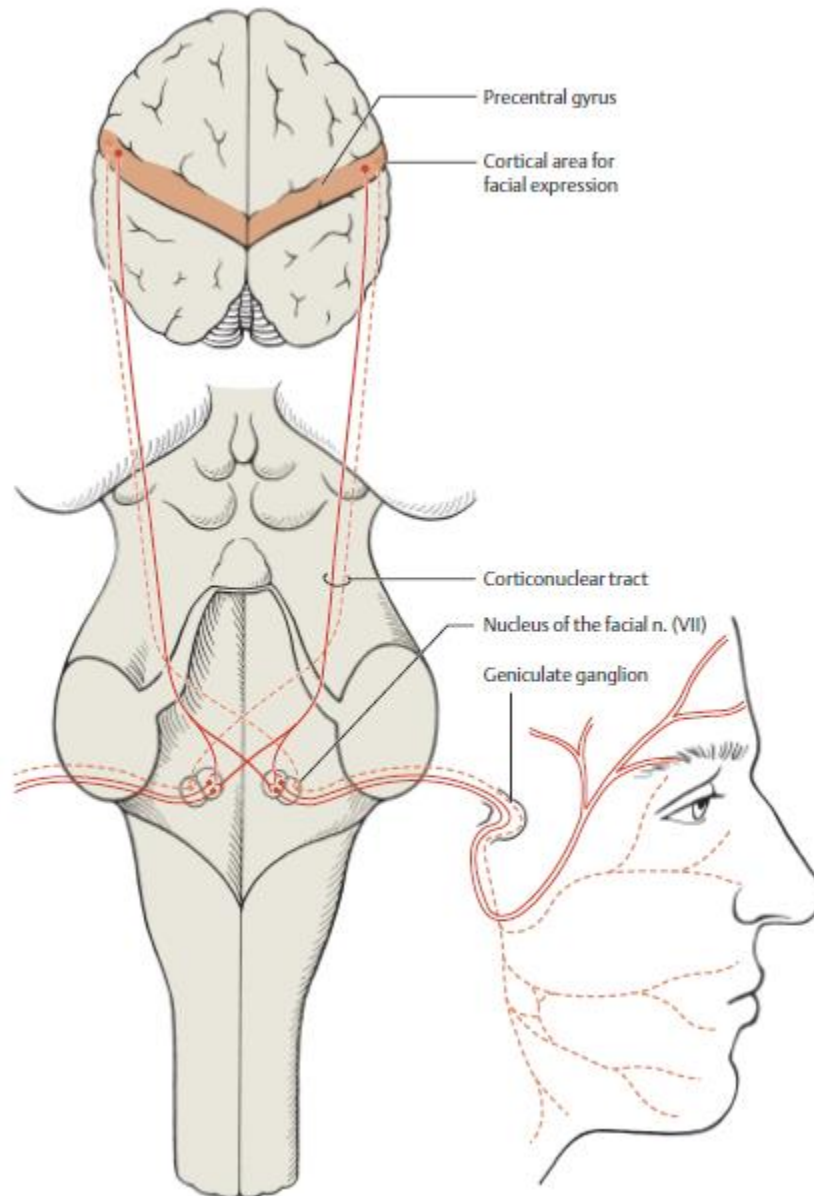


Figure 46. Innervation volontaire centrale de la zone nucléaire faciale dans le tronc cérébral.

La partie de la zone nucléaire contrôlant les muscles de la partie supérieure de la face (y compris l'orbiculaire des paupières) est innervée par les deux hémisphères cérébraux. Ainsi, une lésion affectant la voie corticonucléaire d'un côté n'entraîne pas de faiblesse des muscles du front. Le reste de la zone nucléaire, cependant, n'est innervé que par un hémisphère. Une lésion unilatérale le long de la voie corticonucléaire provoque donc une faiblesse faciale avec épargne des muscles de la partie supérieure de la face (syndrome de la parésie faciale dite « centrale »).

(Duus, *Topical Diagnosis in Neurology*, 2005)

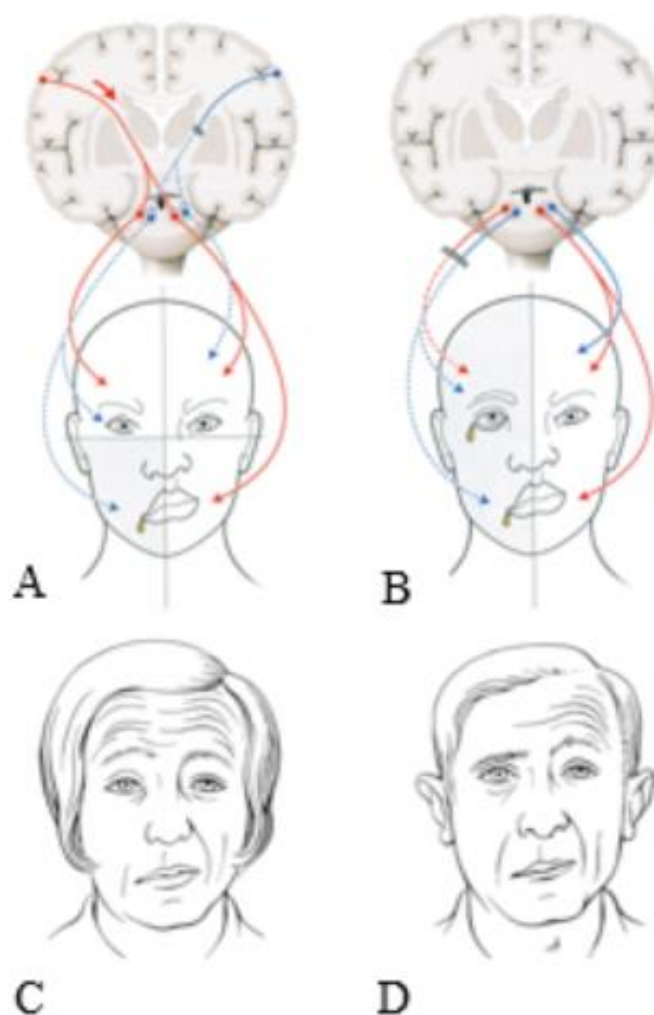


Figure 47. Neuroanatomie et clinique distinctives entre parésie faciale périphérique (PFP) et « centrale » (PFC). A. Lésion anatomique entraînant une PFC droite. B. Lésion anatomique entraînant une PFP droite. C. Sujet présentant une PFC droite. D. Sujet présentant une PFP droite. (Modifié à partir de *Kamina*, tome 5, 2^{ème} édition)

b. Voie motrice indirecte

1. Systématisation de la voie motrice indirecte

Elle véhicule l'influx moteur *automatique, émotionnel* ou « semi-volontaire » aux muscles peauciers, et participe à la régulation du tonus musculaire facial. Cette voie est dite indirecte car elle fait relais dans l'encéphale avant d'atteindre le tronc cérébral. Elle est constituée de plusieurs types de neurones centraux et d'un neurone périphérique (Figure 46).

Le **premier neurone** cortical (cortex limbique en particulier) fait relais soit dans un noyau basal du cerveau (noyau gris central), soit dans un noyau du tronc cérébral autre que le noyau

moteur du VII. Ce premier neurone est cortico-strié, cortico-réticulaire, cortico-rubral, cortico-pontique ou cortico-nigral. Le **deuxième neurone** central, part d'un noyau basal du cerveau et fait relais soit dans le cervelet, soit dans un noyau du tronc cérébral. Le **troisième neurone** central unit un noyau du tronc cérébral autre que le noyau moteur du VII ou un noyau du cervelet au noyau moteur du VII. Il est soit rubro-nucléaire, réticulo-nucléaire, vestibulo-nucléaire, tecto-nucléaire, olivo-nucléaire. Le **quatrième neurone** est périphérique et nucléomusculaire, c'est le motoneurone du nerf facial, évidemment commun aux deux voies directe et indirecte.

2. Structures impliquées dans la motricité automatique de la face

a) Formation réticulaire

Il s'agit d'un modulateur diffus du système nerveux formé de substance blanche et grise. Les neurones forment un réseau qui enserre des amas de péricaryon. Elle fonctionne avec des nombreux types de neurotransmetteurs notamment acétylcholine, dopamine, sérotonine ou encore noradrénaline. Elle est mal délimitée et part de la moelle épinière jusqu'au diencephale. Ses neurones sont organisés en noyaux formant trois colonnes : les noyaux du raphé (réticulaires médians, plutôt sérotoninergiques), les noyaux réticulaires médiaux (plutôt excitateurs sur les motoneurones situés en aval) et les noyaux réticulaires latéraux (plutôt inhibiteurs situés sur les motoneurones situés en aval). Ses fibres afférentes proviennent notamment du tronc cérébral et en particulier des axones sensoriels des nerfs crâniens, mais également du cervelet (noyau fastigial), du système limbique (corps mamillaires et noyaux habénulaires), de l'hypothalamus via les fibres hypothalamo-réticulaires et du cortex cérébral. Les fibres efférentes et en particulier ses noyaux bulbaires projettent vers les noyaux des nerfs crâniens via le tractus réticulo-bulbaire. Ses noyaux pontiques et mésencéphaliques se projettent eux vers le cortex cérébral, le système limbique, le thalamus via le tractus réticulothalamique et le cervelet.

Elle intervient dans plusieurs fonctions cervico-faciales : modulation du tonus musculaire et activité réflexe des muscles peauciers, contrôle et expression émotionnelle des muscles peauciers, contrôle de la sensibilité somatique et viscérale en lien avec ses multiples connexions aux voies sensitives, contrôle des systèmes nerveux autonomes et contrôle du cycle circadien veille – sommeil.

b) Locus coeruleus

Impliqué dans la modulation de l'attention et de l'éveil en général, son activité est noradrénergique. C'est lui qui est responsable d'une inhibition tonique sous-jacente pendant la phase de sommeil paradoxal, entre autres des muscles peauciers, permettant au corps de ne pas exprimer les activités motrices rêvées. Il est souvent atteint précocement dans la maladie de Parkinson (Stade précoce de Braak).

c) Système des ganglions de la base

Ce sont des amas de substance grise interconnectés situés à l'intérieur des hémisphères cérébraux. Anatomiquement, on distingue le noyau caudé, le noyau lentiforme, le noyau subthalamique (anciennement corps de Luys), la substance noire mésencéphalique, le nucleus accumbens, et le noyau pédonculopontin (Lanciego, Luquin and Obeso, 2012; Tatu and Béreau, 2020). Les noyaux caudé et lentiforme sont appelés noyaux de la base.

Au niveau fonctionnel, le noyau caudé et le putamen (partie latérale du noyau lentiforme) forment le striatum qui participe à la **régulation de la fonction motrice faciale indirecte** (ou extrapyramidale). Il coordonne les mouvements faciaux, module le tonus musculaire facial et contrôle l'activité motrice automatique ou semi-automatique des muscles de la mimique et de la parole. Il reçoit les influx dopaminergiques de la **substance noire**. En cas d'atteinte dégénérative de la substance noire et de ses connexions avec le putamen comme dans la maladie de Parkinson, on observe une perte d'expressivité faciale (hypomimie parkinsonienne). A l'opposé, les patients parkinsoniens avancés peuvent présenter en cas de traitement

dopaminergique exogène excessif des dyskinésies faciales. Les lésions du globus pallidus, du noyau subthalamique ou du noyau caudé peuvent-elles être responsables de l'hyperactivation des muscles faciaux tels que dans l'athétose ou encore la chorée.

d) Cervelet

Il est impliqué dans la coordination des mouvements volontaires mais aussi automatiques des muscles peauciers. Il contribue à la régulation du tonus musculaire. Il assure la coordination des mouvements faciaux volontaires mais surtout automatiques dans le temps et l'espace en permettant un mouvement harmonieux et fin. Ce contrôle de la synergie des muscles faciaux permet l'exécution rapide des mouvements lors des tâches dites spontanées tels que le rire ou la colère et donc généralement impliquées dans les émotions. Au cours de l'exécution volontaire d'un mouvement facial tel qu'un relever de sourcil, le cervelet contrôle la continuité de la contraction musculaire. Il contrôle enfin la synergie fonctionnelle des muscles peauciers. Dans les atteintes cérébelleuses, on retrouve fréquemment des troubles de la parole et de la mobilité faciale.

e) Noyaux du tronc cérébral

- **Noyau rouge** – Il s'agit d'un gros noyau ovoïde situé en postéro-médial par rapport à la substance noire. Ses fibres afférentes proviennent du cortex cérébelleux controlatéral, du noyau lenticulaire, de l'hypothalamus, du noyau sous-thalamique, de la substance noire et de la moelle épinière. Ses fibres efférentes sont rubro-spinales et rubro-réticulaires, tout en émettant aussi des fibres vers le thalamus. Le noyau rouge est un **centre relais des voies cérébelleuses et de la motricité automatique et semi-volontaire** qui a un rôle important dans la **synergie des mouvements faciaux**.
- **Tectum** – Il s'agit d'un relais des voies optiques qui intervient notamment dans les arcs réflexes impliquant les muscles faciaux.

3. Voies motrices impliquées dans la motricité émotionnelle de la face

a) Préambule

Les noyaux moteurs du nerf facial sont innervés non seulement par le cortex facial operculaire mais aussi par le **diencephale**, qui joue un rôle majeur dans les expressions faciales liées aux émotions. D'autres informations proviennent des noyaux gris centraux ; en cas de lésion des noyaux gris centraux, on peut parfois observer une hypomimie ou une amimie, ou un aspect moteur facial discordant avec l'humeur exprimée ou supposée parfois appelée athymhormie (dans le cadre d'une schizophrénie). Il existe également divers syndromes dyskinétiques affectant les muscles de l'expression faciale, avec différents types de mouvements anormaux : *dyskinésies faciales* par excès dopaminergique ou *dyskinésies bucco-linguo-faciales* dans le cas de traitements neuroleptiques chroniques pouvant correspondre à des moments de sevrage relatif.

b) Implication du système limbique

Décrit par Broca en 1878, il rassemble les structures encéphaliques impliquées dans les processus de l'émotion et du comportement. Il est constitué par le **lobe limbique**, et essentiellement le **cortex hippocampique**, le **corps amygdaloïde**, la **substance innominée encéphalique**, les **noyaux septaux** et l'**aire subcallose**, le **noyau accumbens** et le **corps mamillaire** qui fait communiquer le système limbique avec le thalamus et la fonction réticulaire.

Le **lobe limbique**, arciforme, constitue la majeure partie de la face médiale de chaque hémisphère cérébral. Il circonscrit le corps calleux et le diencephale. Il est divisé en quatre parties : le **gyrus cingulaire** (parallèle au corps calleux), le **gyrus fasciolaire** (en arrière du splénium du corps calleux), le **gyrus parahippocampique** (au-dessus au gyrus occipito-temporal médial) et l'**hippocampe** qui constitue un repli complexe du lobe limbique

partiellement enfoui dans le gyrus parahippocampique avec un degré de courbure variable selon les individus.

L'hippocampe est constitué de trois parties : le gyrus dentelé, l'hippocampe proprement dit (ou corne d'Ammon) et le cortex subiculaire.

i. Structure du cortex hippocampique

Le cortex hippocampique est en continuité avec le cortex cérébral. Il est constitué de l'hippocampe proprement dit et du gyrus dentelé et subdivisé en cinq régions (dénommées CA1 à CA5) en partant du subiculum : quatre régions hippocampiques et la région du gyrus dentelé. Le subiculum est la partie basse de la formation hippocampique. Il constitue une zone de transition entre le néocortex à six couches vers le cortex parahippocampique (entorhinal) et l'archicortex à trois couches de la corne d'Ammon.

ii. Systématisation du système limbique

Les fibres afférentes proviennent de l'aire septale, de la substance perforée antérieure, du cortex cingulaire, des noyaux du raphé, de l'aire entorhinale. Les fibres efférentes via l'alveus puis la fimbria et le fornix, se dirigent vers le corps mamillaire, le noyau antérieur du thalamus et le noyau accumbens. Les fibres associatives, nombreuses, relient :

- Les noyaux amygdaloïdes au bulbe olfactif, aux aires septales, au thalamus, à l'hypothalamus ainsi qu'à l'aire entorhinale ;
- Le corps mamillaire au thalamus, au tegmentum et au gyrus cingulaire.

iii. Fonction du système limbique

Le système limbique présente de nombreuses connexions qui en font une **zone d'intégration** intervenant dans les processus endocriniens, viscéraux et affectifs. En effet, l'émotion ne s'exprime pas uniquement par la mise en jeu des muscles peauciers du visage et du cou, mais s'accompagne également de phénomènes vasomoteurs (sueurs, rougeur cutanée, pâleur, élévation de la tension artérielle, malaise vagal, etc.). Ces fibres associatives assurent un circuit

neuronal en boucle décrit par Papez en 1937, unissant l'hippocampe, le fornix qui se projette sur le corps mamillaire et l'aire septale, le noyau antérieur du thalamus, le gyrus cingulaire, le cortex entorhinal et l'hippocampe.

Ses connexions avec l'aire entorhinale, qui reçoit des fibres olfactives, visuelles, auditives, somesthésiques et motrices font de l'hippocampe un élément clé dans les processus émotionnels en lien avec la mémorisation. Le système limbique est aussi impliqué dans la mémoire épisodique qui concerne les événements vécus à un moment donné dans un contexte particulier. Les lésions du système limbique entraînent une amnésie des événements de la vie quotidienne, par exemple ne plus réussir à reconnaître un visage. Il permet l'activation d'un souvenir en associant d'autres stimulations émotionnelles et sensorielles comme la vision (appréciation émotionnelle de la beauté).

D. Physiopathologie de la parésie faciale périphérique

1. Préambule : définition, épidémiologie, temporalité

a. Définitions

La parésie faciale périphérique est une diminution d'activation, volontaire ou automatico-émotionnelle, des muscles peauciers du visage, en lien avec une lésion nucléaire ou infra-nucléaire du nerf facial (VII), depuis la région du noyau moteur du VII située dans le tronc cérébral, jusqu'à la jonction neuro-musculaire. Elle correspond à l'atteinte du dernier neurone des voies de la motricité faciale (motoneurone). Sa gravité dépend de la localisation de la lésion, de la cause et du degré d'atteinte nerveuse faciale.

b. Epidémiologie

La parésie faciale périphérique (PFP) est une pathologie affection fréquente prédominant chez les adultes entre 40 et 50 ans (Hohman and Hadlock, 2014), sans prédominance de sexe. Soixante-dix pour cent des cas sont dits « idiopathiques » (appelés Bell's palsy dans la littérature anglophone), avec une incidence au cours de la vie de 1 personne sur 60 (de Almeida

et al., 2014), soit une incidence de 15 à 50 nouveaux cas pour 100 000 personnes par an (Devriese *et al.*, 1990; de Almeida *et al.*, 2014).

c. Temporalité

Elle dépend de la cause. En cas de parésie faciale périphérique idiopathique, elle est de survenue rapide, en quelques heures à un ou deux jours, même si des prodromes peuvent donner l'alerte les jours précédents (otalgies, acouphènes, cervicalgies homolatérales, etc.). En fonction de la cause et du degré d'atteinte nerveuse, la guérison peut être totale ou partielle. On considère en général les stades suivants : i) stade aigu : jusqu'à 6 mois depuis la lésion ; ii) stade subaigu : entre 6 mois et 12-18 mois d'évolution ; iii) stade chronique : à partir de 12-18 à 24 mois depuis la lésion. Ces stades n'ont pas la même pente d'évolution dans la récupération motrice ni les mêmes stratégies thérapeutiques, qu'elles soient médicamenteuses, rééducatives ou chirurgicales.

2. Etiologies et évolution

Les causes de parésie faciale périphérique sont variées et bien décrites dans la littérature grâce au recensement de cohortes importantes de patients (Hohman and Hadlock, 2014). Dans une série de 1989 patients, Hohman *et al.* en 2014 retrouvaient 38% de cause idiopathique (induite par un virus courant non retrouvé lors du bilan étiologique), 10% de survenue après exérèse d'un neurinome acoustique, 7% de cancers, 7% de lésions iatrogènes, 7% de zona du VII, 5% de lésions bénignes, 5% d'origine congénitale, 4% de maladie de Lyme et 17% d'autres causes. Plus récemment et durant la pandémie de Covid19 en 2020-2021, des cas de PFP ont été recensés sans lien franc de cause à effet qui ait pu être clairement établi (Martin-Villares, Alba and Gonzalez-Gimeno, 2021). En pratique clinique, le diagnostic est clinique et l'anamnèse, l'examen clinique ainsi qu'un bilan complémentaire orienté permettent de retrouver la cause et de pronostiquer la récupération motrice.

Dans 70 à 90 % des cas, la récupération de la fonction motrice faciale se produit *ad integrum* dans un délai de 6 à 9 mois (Adour *et al.*, 1978; Peitersen, 2002; Sullivan *et al.*, 2007; Hohman and Hadlock, 2014). Les 10 à 30 % des patients qui ne récupèrent pas en totalité entrent ainsi dans la phase chronique de la pathologie avec deux formes évolutives possibles : une forme **non hyperactive** avec flaccidité de l'hémiface parétique, décrite comme une perte globale de tonus, et une **forme hyperactive**, plus fréquente, dans laquelle la parésie s'accompagne de la survenue progressive de plusieurs types d'hyperactivités musculaires involontaires au sein de la même hémiface (Salles *et al.*, 2015). Cette hyperactivité musculaire peut survenir au repos sous la forme de contractions permanentes, toniques, localisées et involontaires de certains muscles du visage, qui sont appelées **contractures hémifaciales**, ou bien sous la forme de petites contractions brèves (<100 ms), similaires à des secousses, localisées au sein d'un ou de plusieurs groupes musculaires faciaux et détectables au repos que l'on appelle **spasmes hémifaciaux**. L'hyperactivité musculaire peut enfin survenir lors des mouvements volontaires ou automatico-émotionnels du visage et se manifester par des coactivations involontaires de groupes musculaires faciaux alors que la commande est dirigée vers un autre groupe musculaire facial, on parle de cocontractions hémifaciales ou plus communément de **syncinésies hémifaciales**. Ces signes moteurs nuisent probablement à la qualité de vie des patients, et affectent potentiellement leur santé psychique (Rath *et al.*, 2007; Díaz-Aristizabal *et al.*, 2021) bien que les corrélations utilisant des scores spécifiques d'évaluation des syncinésies indépendamment des scores de parésie (faiblesse motrice) soient rares dans la littérature.

3. Composantes motrices de la Parésie Faciale Périphérique

a. Diminution du recrutement d'unités motrices : la parésie

La parésie faciale correspond à la diminution quantitative du recrutement volontaire ou automatico-émotionnel de muscles faciaux (adapté de Gracies, 2005). Lorsque ce recrutement est nul, ce qui est rare en pratique clinique, on parle de plégie ou de paralysie. Cliniquement, la

parésie faciale se traduit par une diminution de la force motrice sur commande volontaire et une augmentation de l'asymétrie faciale « tolérable » (Guihard, Gracies and Baude, 2022). Au visage, le sourcil se relèvera moins, l'œil fermera incomplètement ou plus lentement, le sourire sera moins symétrique, le baiser sera dévié.

Elle s'observe en réalité lors de l'effort moteur de façon plus générale, qu'il soit volontaire (par exemple lors d'un testing moteur facial) ou conversationnel (et donc davantage lié à la composante automatique ou émotionnelle de la commande motrice des muscles peauciers).

Enfin, la parésie peut également se traduire au repos, en situation théorique de faible recrutement des muscles peauciers, par une hypotonie homolatérale, avec chute du sourcil, fente palpébrale élargie, effacement du sillon naso-génien, chute de la base de l'aile du nez, chute de la commissure, hémilèvres plus galbées etc. On peut ainsi considérer qu'il s'agit là de la composante de la parésie en commande automatique qui se manifeste au repos.

b. Différentes formes d'hyperactivités musculaires cervico-faciales

Lors d'une lésion du nerf facial, il n'est pas rare de voir apparaître dans les 4 à 6 mois après la lésion nerveuse initiale des activations musculaires involontaires qui siègent de manière homolatérale à la lésion nerveuse et se superposent à la parésie. La plus fréquente d'entre elle est la *syncinésie* ou cocontraction faciale qui survient lors du mouvement volontaire ou involontaire mais il existe également d'autres formes d'hyperactivité que nous individualisons ci-dessous.

1. Contracture hémifaciale

La *contracture hémifaciale* correspond à une tension permanente involontaire présente au repos qui peut contraster avec l'hypotonie de certains groupes musculaires environnants. Elle se traduit généralement par un sourcil trop relevé, un œil trop fermé, une pommette surélevée ou encore un pli nasogénien trop marqué, une commissure labiale trop relevée ou un menton froncé alors que le sujet est au repos. Elle entraîne les signes inverses à ceux induits par la

parésie. Elle survient au cours de la phase de chronicisation de la PFP, souvent aux alentours du sixième mois. En conversationnel, on observe qu'elle se majore et aggrave encore l'asymétrie faciale.

En dehors des scores d'asymétrie par contracture au repos et en conversationnel de l'Echelle de Créteil (décrite plus bas) ainsi que des scores Procruste de contracture en biomécanique développés dans cette thèse, il n'existe à notre connaissance aucun outil subjectif ou objectif permettant de l'évaluer et aucun questionnaire permettant d'en analyser le retentissement clinique en termes de qualité de vie pour le patient.

2. Spasmes hémifaciaux

Les spasmes hémifaciaux correspondent à des contractions involontaires brèves (<100 ms) et localisées du côté parétique, essentiellement au repos. Les spasmes sont souvent inhibés par l'activation musculaire conversationnelle et peut-être aussi par les autres formes d'hyperactivation musculaire présentes en conversation telles que les syncinésies. Les spasmes surviennent le plus souvent au niveau de l'orbicularis oculi, dans la région de la glabella par contraction du corrugateur du sourcil, au niveau de la commissure labiale qui se dirigera alors vers le haut, ou encore dans la région de l'hémi-menton en donnant un aspect de peau d'orange. Ils apparaissent souvent aux alentours du 4-6^{ème} mois post-lésionnel et leurs fréquences et localisations sont variables en fonction des patients. Ils ne sont le plus souvent pas ressentis par le patient. Ils sont généralement associés aux autres formes d'hyperactivité musculaire involontaire faciale.

A l'instar de la contracture hémifaciale, l'*Echelle de Créteil* avec deux sous scores de fréquence de spasmes au repos et en conversationnel ainsi que la quantification des spasmes via notre système d'analyse 3D facial CaraTM sont les seuls outils permettant de les quantifier et de les étudier. L'Echelle de Créteil implique le comptage et la localisation des spasmes sur 30 secondes. Il est important d'observer le patient sur un laps de temps suffisant et de

l'enregistrer sur des séquences vidéographiques suffisamment longues, afin de les comparer d'une fois à l'autre.

3. Syncinésies ou cocontractions faciales

a) Définition

La syncinésie est la contraction involontaire d'un groupe musculaire alors que la commande émotionnelle ou volontaire est destinée à un autre groupe musculaire facial ou cervical (Moran and Neely, 1996). Il s'agit de la composante d'hyperactivité musculaire involontaire faciale la plus connue et étudiée après des lésions du nerf facial. Elle apparaît souvent entre le 6^{ème} et le 9^{ème} mois post-lésion sous la forme initialement d'une petite gêne, voire une « pulsation », ressentie par le patient mais mal visible par le clinicien, qui s'accroîtra voire se diffusera aux autres groupes musculaires de l'hémiface parétique. Cette cocontraction est souvent d'autant plus importante que le mouvement volontaire ou émotionnel à laquelle elle s'associe est intense. En raison de son importance fonctionnelle, la syncinésie entre les muscles faciaux oculaires et buccaux fait l'objet d'une grande attention et est souvent au centre des efforts thérapeutiques. La plus commune est la syncinésie bucco-oculaire. Cependant, toutes les branches du nerf facial peuvent être touchées par des syncinésies, certaines atteintes sont cependant plus rares comme la syncinésie de la branche motrice à destination du stapedius qui se manifeste par une hypoacousie unilatérale voire des acouphènes lorsque le patient anime son visage (Hutz, Aasen and Leonetti, 2020).

b) Physiopathologie

La majorité des patients ayant une PFP idiopathique ne présentent qu'une neurapraxie, c'est-à-dire un blocage transitoire de la conduction du nerf facial sans lésion axonale (Sunderland, 1951) et récupéreront *ad integrum* leur fonction motrice faciale en quelques jours, semaines voire mois sans développer pour la plupart de signes d'hyperactivité. La syncinésie hémifaciale est directement liée au degré d'atteinte axonale initiale et concerne les lésions nerveuses qui

entraînent un phénomène de dégénérescence wallérienne. Elle pourrait être liée à des phénomènes de repousse nerveuse aberrante et donc à un aiguillage anormal de fibres nerveuses faciales qui se régénèrent dans des neurolemmes vides adjacents. Elle est corrélée au pourcentage de dénervation qui peut être mesuré en électroneuromyographie à la phase aiguë (Morishima *et al.*, 2013; Guntinas-Lichius *et al.*, 2020). Une condition préalable au développement de la syncinésie faciale est donc la lésion axonale (par opposition à la neurapraxie, pathologie limitée à la myéline engainant le nerf) et la repousse anormale de ces axones lésés (mécanisme le plus largement accepté) qui peut être repérée à l'aide d'examen électrophysiologiques au stade aigu ayant une valeur pronostique (Morishima *et al.*, 2013; Guntinas-Lichius *et al.*, 2020). En cas de lésion axonale, d'autres mécanismes ont été évoqués afin d'expliquer la repousse nerveuse anormale à l'origine des phénomènes d'hyperactivité musculaire (syncinésies, spasmes et contractures hémifaciales post-PFP), les plus connus étant l'hyperexcitabilité de certaines régions du noyau facial, la transmission nerveuse *éphaptique* et des réorganisations corticales supérieures aberrantes.

i. Repousse aberrante des fibres nerveuses

La plupart des axones développeraient des bourgeons axonaux (également appelés bourgeons collatéraux) et repousseraient de manière aléatoire, attirés entre autres par les facteurs de croissance ou molécules d'adhésion des neurolemmes adjacents pour atteindre la fibre musculaire d'un muscle non ciblé au départ par le motoneurone concerné. Une étude animale a suggéré que cette erreur d'aiguillage pouvait se produire sur toute la longueur périphérique du nerf facial (Choi and Raisman, 2004). Le bourgeonnement terminal est un autre phénomène de bourgeonnement observé dans les études animales au cours de la régénération du nerf facial et de la réinnervation musculaire (Guntinas-Lichius *et al.*, 2005) ; chez l'homme, il n'a été confirmé qu'après des injections de toxine botulique dans les muscles faciaux et favoriserait la syncinésie faciale (Holds *et al.*, 1990). Si un axone lésé en cours de régénération

envoie au hasard plusieurs bourgeons collatéraux vers le même muscle facial, une hyperactivation de ce muscle peut se produire lors de l'activation volontaire ou automatique / émotionnelle de ce muscle, se traduisant par des syncinésies faciales voire une majoration de la contracture hémifaciale de repos. Si le mécanisme et l'activation syncinétiques touchent des muscles faciaux dits *antagonistes*, le mouvement résultant peut créer une *illusion* de parésie musculaire (anciennement appelé *syndrome autoparalytique*) (Stennert, 1982). Le meilleur exemple est la perte systématique du froncement de sourcils du côté lésé, pouvant être expliquée par une coactivation antagoniste des muscles frontalis et orbicularis oculi (Stennert, 1982) ou encore par la syncinésie des muscles abaisseurs de la commissure orale lors du sourire (Figure 48).



Figure 48. Photographie d'une patiente de l'étude VISAGE présentant une PFP gauche chronique avec hyperactivité. *On observe des syncinésies des muscles frontalis, orbicularis oculi et levator nasolabialis au sourire ainsi qu'un défaut d'excursion de la commissure gauche signant une parésie du zygomaticus major gauche avec syncinésies du depressor anguli oris et depressor labii inferioris gauches. Patiente ayant donné son accord pour diffusion.*

ii. Hyperexcitabilité du nerf facial et transmission nerveuse éphaptique

Si la remyélinisation s'effectue après régénération de l'axone lésé, cet axone pourrait exciter un axone adjacent via un couplage dit *éphaptique*, conduisant à une coactivation potentielle de plusieurs muscles et donc à une syncinésie. Bien que ce mécanisme soit mentionné dans

beaucoup d'études sur la syncinésie faciale depuis des décennies, il n'en existe aucune preuve factuelle (Valls-Solé, 2007). En revanche, le phénomène de « stripping synaptique » au sein du noyau moteur de nerf facial, correspondant à une perte des afférences synaptiques sur le corps cellulaire ainsi que les troncs dendritiques, retrouvée post-mortem chez un patient qui présentait des syncinésies faciales (Graeber, Bise and Mehraein, 1993), pouvant être considéré comme une forme de déafférentation, pourrait contribuer pour certains auteurs à l'hyperexcitabilité du noyau moteur du nerf facial. Le stripping synaptique se produit tôt après une lésion du nerf facial mais semble ne pas être complètement réversible après la régénération. Cela entraîne un déséquilibre permanent entre entrées excitatrices et inhibitrices sur les motoneurons faciaux (Raslan *et al.*, 2014).

iii. Réorganisation corticale supérieure

Plusieurs études d'imagerie par résonance magnétique (IRM) et d'IRM fonctionnelle (IRMf) menées chez l'homme ces dernières années ont confirmé le rôle d'un contrôle moteur cortical anormal chez les patients PFP présentant des syncinésies faciales (Ma *et al.*, 2021, 2022). Cela pourrait contribuer à l'élaboration de nouveaux concepts thérapeutiques. En effet, des travaux ont montré qu'une déafférentation périphérique transitoire dans le cas d'une PFP idiopathique avec récupération clinique complète entraînait une altération de la connectivité fonctionnelle du cortex controlatéral à la lésion nerveuse périphérique faciale (Klingner *et al.*, 2011) . Par rapport à une population de sujets sains, les patients PFP atteints de syncinésies faciales présentent une diminution d'activation de la zone de représentation motrice cortico-faciale et une augmentation d'activation dans la zone motrice supplémentaire pendant les mouvements faciaux (Wang *et al.*, 2018). La même équipe a également montré que les patients présentant des syncinésies bucco-oculaires du côté parétique présentaient une diminution de la distance entre les sites de représentation corticale faciale pendant les tâches de clignement des yeux et de sourire (Wang *et al.*, 2019). Une autre équipe évoque un couplage pathologique des aires

corticales pendant des tâches motrices faciales (Ma *et al.*, 2022) avec une synchronisation locale liées au mouvement dans les régions cérébrales qui serait réduite (Ma *et al.*, 2021). Cependant, si ces réorganisations concernent le cortex moteur primaire, cela n'explique pas les syncinésies quotidiennes en conversation. A ce sujet, il semble également se produire un remodelage cortical temporal chez les patients PFF atteints de syncinésies faciales avec des gyri temporaux supérieurs et inférieurs controlatéraux présentant une épaisseur corticale réduite (Wu *et al.*, 2021).

La syncinésie faciale est donc associée à une régénération pathologique complexe avec des changements dans le noyau facial et des régions corticales afférentes.

c) Evaluation de la syncinésie

La syncinésie faciale se manifeste le plus souvent par un rétrécissement ou une fermeture involontaire des yeux lors de mouvements volontaires de la bouche (sourire, faire un baiser ou souffler, syncinésie bucco-oculaire) ou inversement par une contraction involontaire de muscles médians de la face lors de la fermeture volontaire des yeux (syncinésie oculo-buccale). La syncinésie peut être présente dans tous les muscles faciaux, y compris le platysma, entraînant une contraction inconfortable du cou (Beurskens, Oosterhof and Nijhuis-van der Sanden, 2010) voire dans les muscles externes et internes de l'oreille (Rüschenschmidt *et al.*, 2022). En cas de lésion intra-temporale ou plus proximale, une syncinésie stapédienne peut se produire, entraînant des modifications temporaire du seuil auditif (Brichacek *et al.*, 2013). Un autre symptôme rare est l'hyperlacrimation gustative (larmes de crocodile) induite par une réinnervation mal dirigée des fibres gustatives par le nerf grand pétreux pour atteindre la glande lacrymale. Il en résulte un épiphora concomitant de la sécrétion salivaire (Montoya *et al.*, 2002). Ceci peut être quantifié par un test de Schirmer modifié (test de Schirmer réalisé au cours d'un repos).

Plusieurs systèmes d'évaluation permettent de quantifier le degré de syncinésies cervico-faciales :

- Le système de classification de *House-Brackmann*, le plus connu, ne comprend qu'une description brute de la gravité de la syncinésie (pas de syncinésie, pas de syncinésie défigurante, ou syncinésie) (House and Brackmann, 1985). La mise à jour du système House-Brackmann par le *Facial Nerve Grading System 2.0*, a introduit la catégorie « mouvement secondaire » pour quatre régions : les sourcils, les yeux, le sillon nasogénien et la bouche, avec une échelle de Likert en 4 points (0 = pas de syncinésie ; 3 = syncinésie défigurante) (Vrabec *et al.*, 2009).
- Le *Sunnybrook Facial Grading System* évalue la symétrie du visage au repos, la symétrie au mouvement *volontaire* lors de cinq mouvements faciaux (relever des sourcils, fermeture douce des yeux, sourire bouche ouverte, grognement et baiser) et le degré de *syncinésie* avec un score final composite allant de 0 à 100 (Ross, Fradet and Nedzelski, 1996). Le score de syncinésies est ordinal de 0 (aucune syncinésie) à 3 (syncinésie de masse) et réalisé pour chacun des cinq mouvements volontaires précités (donc un score allant de 5 à 15) et permet une classification régionale de la syncinésie.
- L'*eFACE* qui sera abordée dans la section 4 est une version électronique et améliorée du Sunnybrook Facial Grading System et comporte de la même façon une évaluation de la symétrie de repos, au mouvement volontaire et une évaluation des syncinésies (Banks *et al.*, 2015). L'évaluation des syncinésies est toujours régionale avec cette fois-ci quatre territoires étudiés (œil, médio-facial, mentonnier et platysmal) et utilise un système de cotation quantitatif avec une échelle visuelle analogique allant de 0 (syncinésie sévère) à 100 (aucune syncinésie). L'*eFACE* a récemment été perfectionné à l'aide d'un outil d'évaluation automatisée dérivé de l'apprentissage automatique (auto *eFACE*) (Miller *et al.*, 2021).

- L'*Echelle de Créteil* propose de quantifier le nombre de muscles syncinétiques, de les désigner et de coter la sévérité des syncinésies lors de 12 mouvements volontaires faciaux d'amplitude maximale en quantifiant l'intensité de la syncinésie à travers un système de cotation ordinal allant de 0 à 3 par pas de 0,5. Les scores sont moyennés pour obtenir le nombre moyen de muscles syncinétiques par effort volontaire et un score d'intensité des syncinésies. D'un point de vue biomécanique, des indices cinématiques sont en cours de développement dans notre service sur les données issues de la cohorte de patients non PFP puis de patients PFP de l'étude VISAGE (Guihard, Gracies and Baude, 2022). Ces indices permettront de quantifier les syncinésies au repos et au mouvement volontaire facial ainsi que lors d'un mouvement automatico-émotionnel (sourire spontané) en comparant notamment les indices de Procruste qui étudient la déformation de volumes entre les deux hémifaces à distance du mouvement volontaire inaugurant la syncinésie.

4. Quantification de la parésie faciale périphérique

a. Auto-questionnaires spécifiques de la PFP

1. Evaluation de la qualité de vie spécifique

Les deux outils les plus communément admis pour évaluer la qualité de vie perçue spécifique des patients présentant une PFP sont le *Facial Clinimetric Evaluation* (FaCE) (Kahn *et al.*, 2001) et le *Facial Disability Index* (FDI)(VanSwearingen and Brach, 1996). Ces auto-questionnaires sont composés d'un score total et de plusieurs sous-scores évaluant plusieurs domaines tels que la fonction motrice, le confort lacrymal ou encore la fonction sociale et ont été traduits et validés dans plusieurs langues. Le FaCE est recommandé depuis 2018 dans le bilan du patient PFP en complément de l'évaluation motrice faciale avec le *Sunnybrook Facial Grading System* (Hamlet *et al.*, 2018).

2. Evaluation de l'impact des syncinésies

Le Synkinesis Assessment Questionnaire (SAQ) est un auto-questionnaire spécifique pour l'évaluation des syncinésies (Mehta, Wernick Robinson and Hadlock, 2007) qui comporte neuf questions portant sur la perception des syncinésies en terme de fréquence et nature, telles que ressenties par le patient (Lannadère *et al.*, 2023). Chaque item est noté de 1 (rarement, pas du tout) à 5 (tout le temps, sévèrement). Il a été traduit en français par une équipe canadienne en 2021 (Martineau *et al.*, 2021). L'utilisation conjointe d'auto-questionnaires tels que le FaCE, le FDI et le SAQ suggère que de nombreux patients atteints de syncinésies faciales perçoivent également une diminution de leur qualité de vie (Van Veen *et al.*, 2019; Bruins *et al.*, 2022; Osthues *et al.*, 2022) mais le SAQ n'interroge pas le patient sur les conséquences des syncinésies au niveau fonctionnel, esthétique, psychologique ou social.

b. Echelles cliniques de motricité faciale

Il existe de nombreuses échelles permettant de quantifier la motricité du visage dans les suites d'une lésion du nerf facial. Cette hétérogénéité rend la comparaison entre les diverses interventions difficile (Fattah *et al.*, 2015). Les principales échelles actuellement utilisées sont décrites ci-dessous, la liste n'étant pas exhaustive.

1. Echelles de House-Brackmann

En 1985, House et Brackmann, deux chirurgiens ORL, publient une échelle d'évaluation qui évalue les conséquences d'une lésion du nerf facial en six grades allant de I à VI (House and Brackmann, 1985). Ce système a ensuite été largement utilisé et publié dans la littérature, que ce soit aux stades aigu ou chronique de la pathologie. Il était rapide d'utilisation, *i.e.* l'échelle ne prend que quelques secondes pour être renseignée mais avait le double inconvénient de ne pas assez décrire les différentes composantes découlant d'une lésion du nerf facial et d'avoir une faible fiabilité intra- et inter-évaluateurs (Coulson *et al.*, 2005). La distinction entre les grades III et IV était également difficile (Vrabec *et al.*, 2009). Une seconde version appelée

HBGS 2.0 a été présentée en 2009 (Vrabec *et al.*, 2009). Elle présentait de meilleures propriétés métrologiques que la version initiale. Elle avait l'avantage de considérer l'examen du visage dans différentes conditions : repos et mouvement volontaire tout en étudiant plusieurs composantes de la PFP telles que la force motrice mais sans testing moteur muscle par muscle, le tonus, l'asymétrie/la déformation, les spasmes et les syncinésies. Par contre, la commande motrice faciale en spontané n'était pas étudiée, il n'y avait aucun testing moteur et même si la face était étudiée par région, l'évaluation restait globale avec la persistance de six grades. Les échelles de House-Brackmann sont toujours utilisées dans la pratique clinique ainsi qu'en recherche clinique, et en particulier par certains spécialistes ORL dans le cadre du pronostic et de la prise en charge initiale. De façon intéressante, elles incluent une forme d'automaticité de relation bifide entre la sévérité des syncinésies et celle de la parésie, positive des stades II à IV puis inverse entre les stades IV et V. Cette relation sera à vérifier dans le présent travail. **Ces échelles ne sont cependant plus recommandées** en raison de paramètres psychométriques insuffisants, en particulier en ce qui concerne leur validité (Ross, Fradet and Nedzelski, 1996).

2. Sunnybrook Facial Grading System

L'échelle *Facial Grading System de Sunnybrook* (SFGS) a été proposée en 1996 par une équipe de rééducateurs australiens (Ross, Fradet and Nedzelski, 1996). Elle est actuellement considérée par beaucoup comme l'échelle actuelle de référence internationale pour la cotation des lésions nerveuses faciales depuis un consensus datant de 2015 (Fattah *et al.*, 2015), reconfirmé en 2018 (Hamlet *et al.*, 2018) .

Le SFGS propose un score composite (/100) qui prend en compte trois scores évalués au préalable comme cela est indiqué dans la figure 49. Le premier score évalue la **symétrie de repos** par rapport au côté controlatéral sain dans trois régions du visage : fente palpébrale, sillon naso-génien et commissure labiale. Un score de symétrie de repos sera obtenu, variant de 5 à 15 ; le second score quantifie la **symétrie au mouvement volontaire** à travers le degré

d'excursion lors de cinq mouvements faciaux : relever des sourcils, fermeture douce des yeux, grognement, sourire bouche ouverte et bisou. Lors de chaque mouvement, le degré d'excursion est évalué sur une échelle ordinale en cinq grades allant de 1 (aucun mouvement) à 5 (mouvement complet) et la somme de ces cinq valeurs est multipliée par un facteur quatre pour obtenir le score de symétrie au mouvement volontaire variant de 20 à 100. Le degré de syncinésie associé à chaque mouvement volontaire est évalué de 0 (aucune syncinésie) à 3 (syncinésies défigurantes ou gros mouvement de masse concernant plusieurs groupes musculaires) afin d'obtenir un dernier score allant de 0 à 15. On a donc retiré du House-Brackmann les présuppositions de relations inverses entre sévérités de la parésie et des syncinésies, chacune ayant un score séparé, et on introduit aussi une distinction entre symétrie de repos et mouvement volontaire maximal, qui effectivement n'ont pas forcément de relation, aspect que le présent travail avec les données séparées de l'*Echelle de Créteil* pourra peut-être valider.

La fiabilité intra- et inter-évaluateurs du score de symétrie au mouvement volontaire est bonne alors que celle du score de syncinésies est faible (Coulson *et al.*, 2005). Ceci a conduit à la publication par Neely et al en 2010 de critères plus précis d'évaluation afin d'améliorer la fiabilité de l'échelle, en particulièrement pour la recherche clinique (Neely *et al.*, 2010). La grille d'évaluation et les critères ont été traduits par une équipe française en 2022 (Waubant, Franco-Vidal and Ribadeau Dumas, 2022). Cabrol et al en 2022 ont étudié les fiabilités intra-évaluateurs (avec un délai de deux mois entre les évaluations) et inter-évaluateurs des évaluations SFGS vidéo-enregistrées auprès d'une banque de 20 patients présentant une PFP. Le nombre d'évaluateurs était élevé (n=31) et de professions différentes (ORL, orthophonistes et kinésithérapeutes) et la moitié d'entre eux était novice en expérience clinique de prise en charge de la PFP. Les auteurs ont trouvé une excellente fiabilité intra-évaluateur quelle que soit la profession en dehors des kinésithérapeutes (fiabilité moins bonne) pour le score composite,

le score de symétrie au mouvement volontaire et le score de syncinésie mais une **moins bonne fiabilité pour le score de symétrie de repos** (ICC=0.69 [0,65-0,73], ICC, coefficient de corrélation intra-classe). Concernant la fiabilité inter-évaluateurs, elle était bonne à excellente pour le score composite et le score de symétrie au mouvement volontaire, mais encore une fois **plus modérée pour le score de symétrie de repos** et par contre **faible pour le score de syncinésies** (ICC=0,48 [0.33-0.67] (Cabrol *et al.*, 2021).

Sunnybrook Facial Grading System									
Resting Symmetry		Symmetry of Voluntary Movement					Synkinesis		
Compared to normal side		Degree of muscle EXCURSION compared to normal side					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 Initiated movement with mild excursion Movement almost complete Movement complete					NONE: No synkinesis or mass movement MILD: Slight synkinesis MODERATE: Obvious but not debilitating synkinesis SEVERE: Disfiguring synkinesis/ Gross mass movement of several muscles		
normal	0								
narrow	1								
wide	1								
eyelid surgery	1								
Check (naso-labial fold)									
normal	0								
absent	2								
less pronounced	1								
more pronounced	1								
Mouth									
normal	0								
corner dropped	1								
corner pulled up/out	1								
Total <input type="checkbox"/>									
Resting symmetry score	Total X 5								
Patient's name _____									
Dx _____									
Date _____									
		Gross Asymmetry Severe Asymmetry Moderate Asymmetry Mild Asymmetry Normal Symmetry Total <input type="checkbox"/>							
		Voluntary movement score: Total X 4 <input type="checkbox"/>					Synkinesis score: Total <input type="checkbox"/>		
		Vol mov't score <input type="checkbox"/> - Resting symmetry score <input type="checkbox"/> - Synk score <input type="checkbox"/> = Composite score <input type="checkbox"/>							

Figure 49. Sunnybrook Facial Grading System – version originale (Ross, Fradet and Nedzelski, 1996)

Malgré quelques failles psychométriques, le système de notation faciale Sunnybrook Facial Grading Scale de System (SFGS) a été suggéré comme nouvelle norme en matière de gradation des conséquences des lésions du nerf facial (Ross, Fradet and Nedzelski, 1996; Fattah *et al.*, 2015; Hamlet *et al.*, 2018) avec des critères de notation supplémentaires ajoutés pour améliorer sa fiabilité en recherche clinique (Neely *et al.*, 2010). Néanmoins, les évaluations menées par SFGS ont **quatre limitations importantes** : i) il n'y a **aucune évaluation de la motricité**

faciale en spontané ou en conversationnel alors que la principale fonction du visage est de refléter nos émotions ; ii) l'échelle évalue seulement cinq groupes musculaires faciaux, alors que la musculature faciale est constituée d'une vingtaine de muscles par hémiface, en omettant par exemple le platysma ; iii) l'échelle propose une cotation ordinaire à **peu de grades** ce qui limite sa précision et diminue sa sensibilité au changement ; iv) le repos et les mouvements faciaux réalisés ne sont pas systématiquement vidéo-enregistrés, excluant toute vérification rétrospective et suivis visuels avec le patient. Récemment, une étude Delphi s'intéressant aux priorités de recherche consensuelles pour la paralysie faciale a insisté sur la **standardisation des évaluations cliniques** en tant que priorité pour les patients et les professionnels de santé (Hamlet *et al.*, 2018).

3. Echelle de Freyss

Le testing de Freyss utilise un **système de cotation ordinal** en quatre grades de contractilité croissante allant de 0 à 3 (0 : pas de contraction ; 1 : contraction minimale ; 2 : contraction ample mais difficile et sans force ; 3 : mouvement volontaire complet réalisé avec force). **Dix muscles** de la face sont testés : frontalis (relever les sourcils), orbicularis oculi (fermer les yeux), corrugator (froncer les sourcils), procerus (plisser la racine du nez), levator nasolabialis (lever les bords latéraux des narines), orbicularis oris (siffler), zygomaticus minor et levator labii superioris (effectuer un rire sardonique), buccinator (souffler) et mentalis (faire la lippe). Un score variant de 0 à 30 est obtenu et permet d'évaluer la gravité de la symptomatologie : entre 20 et 29, la parésie faciale périphérique (PFP) est légère ; entre 10 et 19, la PFP est modérée ; entre 1 et 9, la PFP est sévère et un score à correspond à une paralysie faciale (parésie totale) (Freyss *et al.*, 1971). Le score de Freyss est simple à utiliser en pratique clinique courante, rapide et reproductible. En revanche, il n'évalue que la composante parétique de la PF lors du mouvement volontaire, exploitable à la phase aiguë comme chronique de la lésion. L'évaluation des spasmes, des contractures et des syncinésies hémifaciales, ainsi que l'évaluation au repos

ou en spontané ne sont pas réalisées. Le muscle platysma n'est pas évalué. Cet outil a été utilisé dans plusieurs études en particulier d'évaluation de procédures chirurgicales anastomotiques (Vacher *et al.*, 1982; Briche *et al.*, 1999; Le Clerc *et al.*, 2013). Il a probablement servi d'ancêtre inconscient lors de l'édification de l'Echelle de Créteil.

4. Echelle e-FACE

L'échelle eFACE est un outil d'évaluation de la motricité faciale utilisant une interface digitale et développée en 2015 (Banks *et al.*, 2015). Elle fournit des graphiques permettant d'illustrer l'évaluation réalisée par le clinicien qui comprend trois domaines : la symétrie de repos (cinq régions sont analysées), la symétrie au mouvement volontaire (sept mouvements) et les syncinésies (quatre territoires sont étudiés). Trois scores composites (statique, dynamique et syncinétique) sont obtenus et un score total est calculé sur une échelle sur 100 points. L'application est disponible sur les smartphones, tablettes et ordinateurs Apple (Apple, Inc., Cupertino, Calif.). Elle présente de meilleurs paramètres psychométriques que le SFGS mais n'est pas aussi répandue et l'équipe fondatrice a en 2017 mené une importante campagne de diffusion auprès de la communauté internationale de spécialistes de nerf facial (Banks *et al.*, 2017) avec une amélioration des paramètres de fiabilité même si certaines valeurs telles que l'évaluation de la fente palpébrale au repos, du sillon naso-génien au repos, de la fermeture oculaire maximale, de l'orientation du sillon naso-génien lors du sourire ou encore des syncinésies platysmales restaient faibles. D'importantes limites liées au support électronique utilisé ont été relevées par les auteurs.

5. Echelle de Créteil

L'Echelle de Créteil a été proposée pour la première fois en 2012 par l'équipe du Professeur Gracies à Créteil (Baude *et al.*, 2012). Elle était initialement constituée d'un seul score d'évaluation de la force motrice au mouvement volontaire d'amplitude maximale de 12 muscles de la face et du cou testés à travers un système de cotation ordinal, allant de 0 à 3 par pas de 0,3

donc 12 grades possibles – lui permettant de pouvoir être considéré comme une variable quantitative d’un point de vue statistique. Un score de force motrice était obtenu en moyennant les scores individuels des 12 muscles, s’étendant également de 0 (aucun mouvement décelable) à 3 (force motrice comparable au côté sain). Une présentation du système de cotation et de la grille d’évaluation est disponible en français dans la Figure 50. On observe que pour trois groupes musculaires (orbicularis oculi, zygomaticus major et orbicularis oris), une cotation adaptée est proposée afin d’optimiser le système de cotation en utilisant les repères anatomiques.

Echelle de Créteil (EC)

1) SCORES DE COTATION DE LA FORCE MOTRICE AU MOUVEMENT VOLONTAIRE D'AMPLITUDE MAXIMALE ET DES SYNCINESIES ASSOCIEES

Force motrice : Douze muscles cervico-faciaux sont testés, en s'aidant du mime par l'examineur. Chaque test doit impliquer trois efforts bilatéraux successifs, chacun d'une durée d'au moins trois secondes, avec une pause d'au moins une seconde entre chaque contraction. Les **syncinésies associées** (nombre et nom(s) du(es) muscle(s) syncinétique(s) ; nom et intensité du muscle le plus syncinétique), à chaque effort volontaire seront cotées selon le même système. Il est demandé au patient d'aller **le plus loin possible** dans le mouvement.

- **Frontal** : « *relevez les sourcils le plus haut possible* »
- **Corrugateur du sourcil** : « *froncez fort les sourcils* »
- **Procérus** : « *ça sent très mauvais* » « *plissez fort entre les deux yeux* »
- **Orbiculaire des yeux** : « *fermez fort les yeux* »
- **Releveur naso-labial** : « *détectez fort une odeur* » « *froncez fort le nez* »
- **Zygomatiques** : « *souriez le plus loin possible en montrant toutes les dents du haut* »
- **Risorius** : « *marquez fort une fossette des deux côtés de la bouche* »
- **Buccinateur** : « *rentrez fort les joues* »
- **Orbiculaire de la bouche** : « *gonflez fort les joues en empêchant l'air de sortir* »
- **Dépresseur de l'angle oral** : « *portez loin les coins de la bouche en bas et en dehors* »
- **Mentonnier** : « *retournez fort la lèvre inférieure* »
- **Platysma** : « *faites saillir fort les muscles du cou* »

Pour chaque muscle, cotation de 0 à 3 - Score total EC = /36 ; score moyen /3

- 0 = absence certaine de contraction musculaire
- 0,5 = frémissement sous-cutané incertain
- 1 = frémissement sous-cutané certain (mouvement visible mais sans déplacement)
- 1,3 = déplacement < 1/3 de l'amplitude attendue
- 1,7 = déplacement entre 1/3 et 2/3 de l'amplitude attendue
- 2 = déplacement > 2/3 de l'amplitude attendue mais loin d'être complet
- 2,3 = mouvement d'amplitude quasi-complète
- 2,7 = mouvement d'amplitude apparemment complète mais petite asymétrie persistante
- 3 = force musculaire normale : aucune différence avec le côté sain

Particularités pour certains muscles :

Orbiculaire des yeux :

- 2,3 = occlusion palpébrale totale mais de force légère ou modérée : **cils bien saillants**
- 2,7 = occlusion palpébrale complète de bonne force mais non identique au côté sain : **cils presque disparus**

Zygomatiques : évaluer la lèvre supérieure seulement

- 1,3 = déplacement découvrant un début d'incisive sans canine
- 1,7 = déplacement découvrant un début de canine
- 2 = déplacement découvrant la canine mais sans prémolaire
- 2,3 = déplacement découvrant partiellement les prémolaires
- 2,7 = déplacement découvrant complètement les prémolaires mais rides asymétriques

Orbiculaire de la bouche :

- 1,3 = début de fermeture des lèvres mais échappement d'air franc
- 1,7 = bonne fermeture des lèvres mais échappement d'air persistant
- 2 = pas d'échappement d'air mais pas de gonflement de joue
- 2,3 = pas d'échappement d'air et gonflement de joue minimale
- 2,7 = pas d'échappement d'air et gonflement franc mais incomplet

2) SCORES D'ASYMETRIE PAR PARESIE, CONTRACTURE ET SPASME AU REPOS

Une **vidéographie de 30 secondes** réalisée de face, patient assis et le visage le plus détendu et au repos possible (clignement autorisé), permet d'évaluer les trois composantes neuromusculaires de la parésie faciale périphérique suivantes :

Parésie et contracture : Douze régions cervico-faciales en lien avec les 12 muscles sous-jacents sont testées. La symétrie est analysée en prenant en compte le degré de faiblesse motrice et/ou de contracture de chaque région par rapport au côté sain controlatéral selon le système de cotation suivant :

Pour chaque muscle, cotation de 0 à 3 - Score total EC = /36 ; score moyen /3. Les demi-points sont acceptés.

- 3 = Symétrie parfaite
- 2 = Asymétrie discrète
- 1 = Asymétrie franche
- 0 = Asymétrie sévère / majeure

Spasmes : Douze régions cervico-faciales en lien avec les 12 muscles sous-jacents sont testées. La symétrie est analysée en prenant en compte le nombre et la localisation des spasmes par rapport au côté sain controlatéral selon le système de cotation suivant :

Pour chaque muscle, cotation de 0 à 3 - Score total EC = /36 ; score moyen /3

- 3 = Pas de spasme
- 2,5 = Entre 1 et 5 spasmes
- 2 = Entre 6 et 10 spasmes
- 1,5 = Entre 11 et 15 spasmes
- 1 = Entre 16 et 20 spasmes
- 0,5 = Entre 21 et 25 spasmes
- 0 = > 25 spasmes

3) SCORES D'ASYMETRIE PAR PARESIE, CONTRACTURE ET SPASME EN CONVERSATION

Une **seconde vidéographie de 30 secondes** réalisée de face, patient assis permet d'enregistrer le patient lors qu'une **conversation ouverte**. Une question est posée au patient juste avant le début de la vidéo. L'examineur tentera de déclencher un sourire spontané. Elle permet d'évaluer **en spontané** les trois mêmes composantes neuromusculaires que la section précédente (section 2) et cotant les scores à l'aide des mêmes systèmes de cotation suscités.

4) GRILLE D'EVALUATION

L'ensemble des scores côtés lors de l'évaluation sont reportés dans la grille d'évaluation de la motricité faciale présentée à la page suivante.

Évaluation Motricité Faciale - Echelle de Créteil										
Muscles	Au repos (30 secondes)					Au mouvement volontaire d'amplitude maximale				
	SCORES D'ASYMETRIE					SCORE DE FORCE MOTRICE		SCORES DE SYNCINESIES		
	Par parésie	Par contracture	Par spasme	Par parésie	Par contracture	Par spasme	Gauche	Droite	Nombre de muscles syncinétiques	Noms des muscles syncinétiques
FRONTALIS										
CORRUGATOR										
PRO CERUS										
ORBICULARIS OCULI										
LEVATOR NASOLABIALIS										
ZYGOMATICUS MAJOR										
RISORIU S										
BUCCINATOR										
ORBICULARIS ORIS										
DEPRESSOR ANGULIS ORIS										
MENTALIS										
PLATYSMA										
SCORES MOYENS										

Figure 50. Instructions et grille d'évaluation de l'Echelle de Créteil
(Baude M et Gracies JM, 2024, non publié)

Dr Marjolaine BAUDE & Pr Jean-Michel GRACIES
Service de Rééducation Neurolocomotrice, CHU Henri Mondor, Créteil - 28/09/2024

Grâce à la pratique clinique et de manière progressive, le système de cotation s'est enrichi à travers la quantification des autres composantes de la PFP (spasmes, contractures et syncinésies évaluées de manière localisée et quantifiée) et à travers une évaluation dans différentes conditions telles que le repos pendant 30 secondes mais aussi la conversation spontanée durant 30 secondes. L'échelle est systématiquement vidéo-enregistrée et archivée dans le dossier informatisé du patient avec son accord.

La procédure de passation de l'échelle est la suivante :

- Enregistrement d'une séquence de 30 secondes de repos permettant d'évaluer les scores subjectifs d'asymétrie par spasmes (fréquence), par contractures et par parésie de manière quantifiée (0 à 3) et localisée (12 régions musculaires).
- Enregistrement d'une séquence de 30 secondes de conversation libre permettant d'évaluer les mêmes scores en spontané.
- Enregistrement de 12 séquences vidéo correspondant à la contraction maximale volontaire de chacun des 12 muscles sélectionnés (11 muscles faciaux et un muscle cervical – le platysma). Pour chaque séquence vidéo, une phase de repos débute et termine l'enregistrement et trois contractions bilatérales d'amplitude maximale de trois secondes séparées d'une phase de repos d'une à deux secondes sont demandées au patient. Une consigne orale standardisée et le mime de l'évaluateur font partie de la procédure. En cas d'apraxie, celle-ci est relevée dans la feuille d'observation. Pour chacun des mouvements maximaux volontaires évalués, le nombre de muscles syncinétiques, leur localisation ainsi que l'intensité de la syncinésie la plus sévère sont quantifiés.

A la suite de l'évaluation qui prend une dizaine de minutes, on obtient les neuf scores suivants (de 0 à 3) : 1) Score de force motrice volontaire ; 2) Nombre de muscles syncinétiques ; 3) Score d'intensité des syncinésies ; 4) Score d'asymétrie par spasme au repos ;

5) Score d'asymétrie par spasme en conversation ; 6) Score d'asymétrie par parésie au repos ;
7) Score d'asymétrie par parésie en conversation ; 8) Score d'asymétrie par contracture au repos
et 9) Score d'asymétrie par contracture en conversation.

L'intérêt d'une évaluation ainsi poussée de la fonction motrice du nerf facial est multiple. Tout d'abord, elle permet de se rapprocher au plus près des différentes composantes cliniques présentes après une lésion du nerf facial et de les quantifier de manière précise et sectorisée. L'évaluation de la force motrice et des syncinésies est présente dans la plupart des échelles existantes, de manière moins systématique pour l'évaluation des syncinésies. Aucune des échelles publiées n'a proposé de quantification des spasmes, de la contracture ni du langage en conversation. Il s'agit également de la seule échelle permettant d'évaluer un nombre aussi important de muscles (n=12) en incluant un muscle peaucier cervical. Cette démarche a ensuite l'avantage de guider le traitement du patient de manière logique, en particulier rééducatif, d'autant plus si le patient s'implique dans un contrat d'autorééducation guidée qui lui demandera chaque jour de passer du temps à sa rééducation : les spasmes et les contractures seront traitées par étirement musculaire, vibrations musculaires et injections de toxine botulique ; les muscles parétiques seront renforcés en séries de contractions d'amplitude maximale ou électrostimulation ; les syncinésies seront traitées par étirement, toxine botulique, ou exercices d'entraînement moteur focalisé anti-syncinésie (entraînement en précision).

Les propriétés de fiabilité de l'Echelle de Créteil n'ont pas encore été étudiées et il s'agit d'un des objectifs de l'étude VISAGE. Pour se faire, les vidéos des patients issus de l'étude VISAGE seront évaluées à deux reprises par quatre évaluateurs de professions différentes (médecin spécialiste en Médecine Physique et de Réadaptation, kinésithérapeutes et orthophonistes).

CHAPITRE II : Présentation de l'étude VISAGE et délimitation du travail de thèse

Baude M, Guihard M, Gault-Colas C, Bénichou L, Coste A, Méningaud JP, Schmitz D, Natella PA, Audureau E, Gracies JM. Guided Self-rehabilitation Contract vs conventional therapy in chronic peripheral facial paresis: VISAGE, a multicenter randomized controlled trial. BMC Neurol. 2023 ;23(1) :148

A. Introduction

A ce jour, il n'existe à notre connaissance aucun essai contrôlé randomisé analysant la technique du renforcement moteur au stade chronique (> 1 an après la lésion) d'une parésie faciale périphérique, quand la symptomatologie du patient est considérée comme stabilisée et permanente (Teixeira, Valbuza and Prado, 2011). Dans d'autres domaines de la neurorééducation, de nombreuses preuves montrent qu'une forte intensité de renforcement ou d'entraînement moteur (à l'opposé de thérapies dites «d'entretien») est associée à l'amélioration de la fonction motrice dans les stades chroniques, grâce à une meilleure stimulation de la plasticité neuronale liée aux changements comportementaux (Kwakkel *et al.*, 1999; Daly and Ruff, 2007; Harada *et al.*, 2009; Meimoun *et al.*, 2015). La réalité et les effets fonctionnels potentiellement puissants de la plasticité neuronale liée aux changements comportementaux – ou aux changements de conditions environnementales – ont été démontrés pour la première fois au début du vingtième siècle par Pavlov, sous le nom trompeur de « réflexes conditionnels », et ses mécanismes synaptiques (sensibilisation synaptique) ont été élucidés plus tard par Kandel (Kandel and Tauc, 1964). La plasticité induite par des changements comportementaux implique des modifications de la sensibilisation synaptique ou du nombre de neurones impliqués dans le nouveau comportement, tels que l'engagement dans un programme intensif de rééducation motrice faciale. Un tel programme pourrait avoir la capacité de placer des cellules corticales, sous-corticales, du tronc cérébral et du système nerveux périphérique en situation de renforcer et de faciliter la commande des muscles faciaux

(Binder, Hirokawa and Windhorst, 2009; Meimoun *et al.*, 2015). La plasticité induite par le changement comportemental peut prendre le relais après la fin de la période de *plasticité induite par la lésion*, qui ne dure généralement que quelques mois après la lésion (Desmurget, Bonnetblanc and Duffau, 2007). Un moyen d'obtenir des quantités suffisantes d'entraînement neuronal pourrait être de motiver et de guider le patient de manière suffisante pour l'amener à pratiquer des techniques d'autorééducation. Il a été confirmé que les programmes d'exercices donnés par le thérapeute pour être effectués au domicile sont appréciés par les patients, non seulement pour la structure qu'ils donnent à la vie quotidienne, mais aussi parce qu'ils représentent en eux-mêmes une source de motivation et d'espoir, particulièrement lorsque ces programmes sont associés à un soutien professionnel sur le long terme (Wiles *et al.*, 2004; Gracies *et al.*, 2019, 2021; Pradines *et al.*, 2019).

Le projet VISAGE, financé par le Ministère de la Santé, est un essai contrôlé randomisé multicentrique français dans lequel 82 patients atteints d'une parésie faciale périphérique unilatérale chronique, quelle qu'en soit la cause, suivent deux programmes de rééducation de six mois – renforcement moteur sur trois muscles faciaux clés par le biais d'un contrat d'autorééducation guidée *versus* une rééducation faciale conventionnelle en libéral – afin de comparer leurs effets sur la récupération de la motricité faciale. Une fois passé le stade de la plasticité du système nerveux induite par la lésion, nous émettons l'hypothèse que la plasticité induite par le changement comportemental sera stimulée par un travail intensif de renforcement moteur dans le cas de la PFP chronique à l'aide d'un contrat d'auto-rééducation guidée.

L'étude VISAGE est financée par l'appel à projet *Projet Hospitalier de Recherche Clinique inter-régional* (PHRC-IR) Ile de France obtenu en 2016, à hauteur de 206 742 euros, dont l'investigateur-coordonnateur est le Dr Marjolaine BAUDE, médecin spécialiste en Médecine Physique et de Réadaptation travaillant dans le Service de Rééducation Neurolocomotrice du CHU Henri Mondor de Créteil.

B. Objectifs

L'étude VISAGE a été conçue pour répondre à deux grands objectifs cliniques :

1) Le premier objectif est d'ordre **thérapeutique** :

- *Question principale* : La stratégie de prise en charge rééducative de la parésie faciale périphérique au stade chronique par contrats d'autorééducation guidée – avec en particulier l'usage de la technique de renforcement moteur de la commande *volontaire* sur les muscles faciaux principaux – est-elle supérieure à la rééducation conventionnelle par kinésithérapie et/ou orthophonie en libéral ?

- *Questions secondaires* : Un patient peut-il encore progresser au stade chronique ? Peut-on quantifier la progression des patients qui poursuivent ou reprennent une rééducation faciale à distance de la lésion à l'aide d'outils cliniques voire biomécaniques ? Quelles sont les techniques de rééducation proposées par les rééducateurs libéraux ? Quel est le rythme de rééducation des patients en libéral au stade chronique ? Quels sont les effets secondaires des patients rééduqués au stade chronique dans les deux groupes de traitement ?

2) Le second objectif est d'ordre **taxonomique** et en lien étroit avec l'**évaluation** :

- *Question principale* : Sommes-nous capables de proposer de nouveaux outils cliniques et biomécaniques permettant de quantifier la fonction motrice faciale au repos mais aussi lors du mouvement volontaire voire automatique et émotionnel des patients présentant une parésie faciale périphérique ?

- *Questions secondaires* : Ces outils sont-ils valides en termes de validité, fiabilité et sensibilité au changement ? Sommes-nous capables de proposer une phénoménologie de la parésie faciale périphérique chronique dichotomisant les différentes formes d'hyperactivité musculaire faciale qui s'associent à la parésie et de les caractériser à travers des outils cliniques mais également biomécaniques ? Ces outils sont-ils enfin suffisamment corrélés entre eux pour permettre d'en extraire des profils types de patients ?

C. Méthodes

1. Design de l'étude

L'étude VISAGE est constituée de **deux phases successives distinctes** (Figure 51) :

1) une **phase** dite « **pré-clinique** » (sur participants sains) ayant pour but de mettre en place un protocole d'analyse tridimensionnel des mouvements faciaux permettant d'obtenir une base de données normatives chez le sujet non parétique facial (sans lésion du nerf facial).

2) une **phase clinique**, thérapeutique, sur des sujets présentant une parésie faciale périphérique de plus de 12 mois (stade chronique), correspondant à un essai contrôlé randomisé en simple insu et deux groupes parallèles de traitement rééducatif (contrats d'autorééducation guidée *versus* rééducation libérale conventionnelle) et dont l'objectif principal est d'évaluer les changements dans la fonction motrice faciale subjective après six mois de rééducation entre les deux groupes. Les objectifs secondaires comprennent l'évaluation des différences dans les changements entre les deux groupes dans : i) la qualité de vie spécifique de la parésie faciale périphérique ; ii) la qualité de vie globale ; iii) les considérations esthétiques ; iv) l'humeur ; v) la fonction motrice faciale objectivée en 3D.

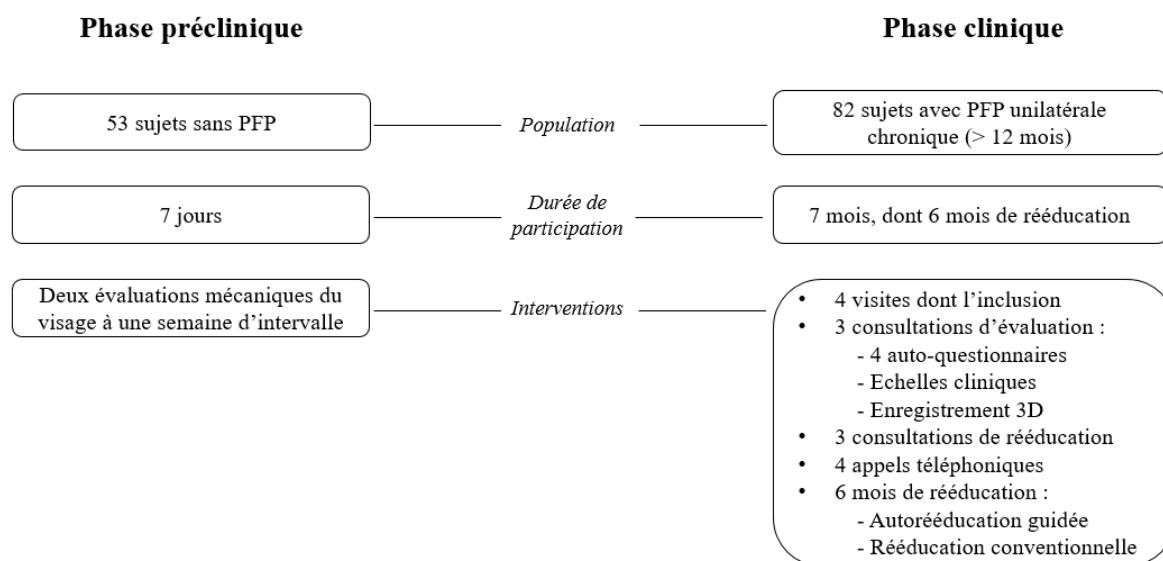


Figure 51. Phases de l'étude VISAGE

2. Conception de la recherche et interventions

a. Phase pré-clinique

La phase pré-clinique de VISAGE correspond à une étude monocentrique sur une cohorte de sujets ne présentant pas de lésion du nerf facial. Elle a été réalisée au sein du Service de Rééducation Neurolocomotrice du CHU Henri Mondor de Créteil en 2021 et a permis la mise en place d'un protocole standardisé d'évaluation tridimensionnelle de dix mouvements faciaux par l'intermédiaire d'un casque portatif muni de quatre caméras (système Cara de VICON, décrit ultérieurement). Cette étape a été nécessaire afin de disposer d'une base de données normatives tridimensionnelles faciales permettant de développer des indices d'asymétrie qui pourraient ensuite être adaptés aux patients présentant une lésion nerveuse faciale.

Pour l'ensemble des participants, l'étude a duré sept jours et a compris deux évaluations tridimensionnelles des mouvements faciaux à l'aide du système Cara de VICON et réalisées à une semaine d'intervalle.

b. Phase clinique

La phase clinique de VISAGE a débuté à la suite de la phase pré-clinique, la validation du protocole d'analyse 3D conditionnant le démarrage de la phase clinique.

Il s'agit d'une étude multicentrique, prospective, contrôlée, randomisée en deux groupes parallèles et en simple aveugle menée auprès de 82 participants atteints de parésie faciale périphérique unilatérale chronique (> 1 an depuis la lésion du nerf facial). L'étude a débuté en 2021 pour une durée d'inclusion anticipée à trois ans. L'étude est actuellement toujours en cours et menée dans quatre centres hospitaliers, incluant des services de chirurgie maxillo-faciale (n=2), d'oto-rhino-laryngologie (n=1) et de neurorééducation (n=1).

Pour tous les participants, la durée totale prévue de la participation à l'étude est de sept mois. Elle débute le jour de l'inclusion (J-30) et se termine à J180. Chaque participant est reçu à quatre reprises par deux investigateurs (CGC, MB) dont un est en aveugle du groupe de traitement

(investigateur évaluateur, MB) : une visite d'inclusion (J-30) puis trois visites d'évaluation et de rééducation fixées à J1, J90 et J180. Quel que soit le groupe de traitement, la rééducation débute dès J2 et est poursuivie jusqu'à la fin de l'étude.

Lors de l'inclusion, l'investigateur en ouvert (CGC) procède à une randomisation informatisée pour attribuer un groupe de traitement au patient : groupe bénéficiant d'une prise en charge par contrat d'autorééducation guidée (CAG) ou groupe rééducation conventionnelle seule (CONV), pendant six mois. Un délai d'un mois entre l'inclusion (J-30) et la première évaluation (J1) a été prévu afin de tenir compte du temps nécessaire pour trouver un thérapeute en ville et garantir le début de la rééducation dès J2 pour les participants du groupe CONV. Dans le groupe CAG, les participants sont libres de poursuivre une éventuelle rééducation libérale préexistante, s'il y en avait une. L'étude se termine pour tous les participants à J180.

1. Groupe avec rééducation conventionnelle en libéral

Dans le groupe de rééducation conventionnelle (CONV), l'évaluateur rééducateur en ouvert de l'étude (CGC) prescrit des séances de kinésithérapie et/ou d'orthophonie à l'inclusion (J-30), pour une durée de six mois commençant le lendemain de la première journée d'évaluation, soit J2. A cette fin, une liste de kinésithérapeutes et d'orthophonistes spécialisés dans la rééducation faciale et exerçant dans l'agglomération parisienne a été constituée en amont de l'étude et proposée à chaque patient du groupe CONV dès la randomisation dans ce groupe de traitement afin de sélectionner un thérapeute libéral exerçant près du domicile du patient. Chaque thérapeute de cette liste avait été informé de l'étude et de ses enjeux et avait en amont accepté de prendre en charge les patients de l'étude VISAGE dans le temps imparti par l'étude. Quel que soit le groupe d'étude, les patients qui suivaient déjà une rééducation en libéral avant l'inclusion dans l'étude étaient libres de poursuivre leurs séances pendant les six mois de l'étude. Ceci a été décidé afin d'éviter d'éventuels effets nocebo, risque bien connus des essais contrôlés randomisés de rééducation et donc volontiers contrecarré (Koog, Lee and Wi, 2014;

Testa and Rossettini, 2016; Pradines *et al.*, 2019). Le traitement de ce groupe contrôle est censé refléter la prise en charge habituelle des patients atteints de parésie faciale périphérique chronique en France. Les rééducateurs amenés à prendre en charge les patients du groupe contrôle étaient tous formés à la rééducation spécifique de la parésie faciale et habitués à traiter cette affection dans leur pratique clinique. Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, il n'existe pas de protocole de rééducation consensuel standardisé et les techniques sont diverses et hétérogènes selon les thérapeutes. Chaque praticien du groupe de contrôle a ainsi la possibilité de choisir la fréquence des séances de rééducation, les techniques utilisées et la durée de chaque séance de rééducation. Ces informations étaient toutefois relevées par les investigateurs de l'étude afin de quantifier mais aussi de qualifier la rééducation des patients du groupe contrôle.

2. Groupe avec Contrat d'autorééducation guidée

Dans le groupe rééduqué par Contrat d'autorééducation guidée (CAG), les patients sont libres de poursuivre leur rééducation libérale préalable s'ils en avaient, comme dans le groupe CONV. En outre, dans le centre d'évaluation, l'investigateur rééducateur de l'étude effectue trois consultations de rééducation à chaque visite (J1, J90 et J180) avec les objectifs suivants pour les participants du groupe CAG :

- *Expliquer au participant les principes du contrat d'autorééducation guidée.* Le CAG est un programme basé sur un contrat moral dans lequel chaque partie, le participant à l'étude et l'investigateur rééducateur, s'engage envers l'autre sur les actions suivantes :

- *Prescrire et enseigner un programme quotidien d'exercices de renforcement des muscles faciaux clés*, adaptés au participant (voir figures 52 et 53) et adapter les techniques en fonction des progrès cliniques. A la consultation J1, l'investigateur rééducateur fournit un manuel au sujet, qui contient le programme prescrit, avec des illustrations des exercices de renforcement moteur. Trois groupes musculaires faciaux ont été sélectionnés en raison de leur

prévalence dans les expressions faciales quotidiennes et donc de leur faible risque d'apraxie de commande dans la population générale (Baude *et al.*, 2018), localisés chacun dans un tiers du visage : **frontalis**, **orbicularis oculi** et **zygomaticus major**. Pour chaque groupe musculaire, le programme d'entraînement consiste en trois séries quotidiennes d'efforts ou de mouvements répétés d'amplitude maximale jusqu'à la fatigue (par exemple, 20 à 40 contractions faciales par série, selon la fatigabilité). Nous avons donc sélectionné ces trois groupes de muscles du visage pour le traitement par renforcement : hausser les sourcils (expressivité), fermer les yeux (protection des yeux) et sourire (communication, expression émotionnelle, interaction avec les autres). En pratique, ces muscles sont faciles à atteindre par la commande volontaire et donc à rééduquer. Chacun est situé sur l'un des trois tiers verticaux de la face : lors de ces efforts, plusieurs branches du nerf facial sont stimulées, du haut vers le bas du visage. Chaque branche du nerf facial innervant plusieurs muscles faciaux, nous avons postulé - et constaté dans la pratique courante - que les participants s'amélioreraient également sur des muscles voisins non directement ciblés par le renforcement.

- *Demander au patient de tenir un registre quantifié d'exercices* et de le rapporter à chaque visite (J90, J180), dans lequel doit figurer le nombre quotidien d'efforts ou de mouvements effectués dans chaque série dans l'intervalle entre deux visites (voir modèle en figure 54). L'investigateur rééducateur insiste sur l'importance de quantifier *via* ce registre écrit la rééducation journalière effectuée, en d'autres termes que les mêmes exercices produits sans tenir de registre quantifié n'auraient probablement pas la même efficacité (Hanel and Martin, 1980; Ackerman and Shapiro, 1984; Noland, 1989; Knight *et al.*, 2002; Lenderking *et al.*, 2008; VanWormer *et al.*, 2009; Dobkin *et al.*, 2010; Nippita *et al.*, 2015; Saw, Main and Gustin, 2015; Abrams *et al.*, 2016; Bertin and Gracies, 2022). En effet, le retour d'information quantifiée, écrit du patient au thérapeute/médecin améliore l'observance du programme d'autorééducation et donc l'efficacité de ce programme (Noland, 1989; Knight *et al.*, 2002; VanWormer *et al.*, 2009;

Nippita *et al.*, 2015; Saw, Main and Gustin, 2015; Abrams *et al.*, 2016). De façon plus importante encore, le registre a été montré procurer un *renforcement positif* au patient, avec une meilleure excitabilité des circuits moteurs et même potentiellement des effets antidépresseurs (Hanel and Martin, 1980; Ackerman and Shapiro, 1984; Lenderking *et al.*, 2008; Sidarta *et al.*, 2016). Indépendamment de l'auto-documentation, le retour d'information *quantitatif* sur la performance du patient a été démontré améliorer l'efficacité de la rééducation pendant la phase subaiguë de l'AVC (Dobkin *et al.*, 2010) ou encore dans la rééducation de troubles psychosomatiques en augmentant ses chances de réussite (Thiel *et al.*, 2021).

- *Vérifier que le patient respecte le programme prescrit* en s'assurant que le registre quantifié d'auto-rééducation est bien tenu. A chaque visite, l'investigateur rééducateur compte le nombre de jours remplis dans le journal et le divise par le nombre de jours écoulés depuis la dernière visite, ce qui définit un taux d'observance du travail d'autorééducation prescrit. En contrepartie, le sujet s'engage à suivre le programme d'autorééducation prescrit, incluant notamment la production du registre quantifié des exercices et *le fait de le ramener à chaque visite*, ce qui est également en soi un bon critère d'observance.

Renforcement moteur Muscle Frontal

Objectifs :

Améliorer la symétrie du front au repos
Améliorer la mobilité du front pendant la conversation

Outil recommandé : un miroir

Position de départ Assis, devant le miroir

Mouvement Relever les **deux** sourcils le plus loin possible **pendant 3 secondes**. Faites une pause de 1 seconde avant de recommencer le mouvement suivant.

Exercice Chaque série de mouvements s'effectue jusqu'à une sensation de fatigue franche obligeant à l'arrêt. La fatigue doit être obtenue en 20-40 répétitions. S'il n'y a toujours pas de sensation de fatigue obligeant à l'arrêt à 40 répétitions, arrêtez-vous.

- Effectuer 3 séries par jour
- Noter sur le registre le nombre de mouvements de relever de sourcils effectués à chaque série.

Position de départ



Mouvement



*Contrat d'Autorééducation Guidée – Renforcement du muscle FRONTAL - Dr Baude
Service de Rééducation Neuralocomotrice du Pr Gracies - Créteil*

**Figure 52A. Fiche d'autorééducation guidée.
Renforcement moteur du muscle frontalis.**

Renforcement moteur Muscle Orbiculaire des paupières

Objectifs :

Améliorer la symétrie et la fermeture de votre œil
au repos et en activité

Outil recommandé : un miroir

Position de départ Assis, devant le miroir

Mouvement Fermer les deux yeux le plus fort possible pendant 3 seconde. Faites une pause de 1 seconde avant de recommencer le mouvement suivant.

Exercice Chaque série de mouvements s'effectue jusqu'à une sensation de fatigue franche obligeant à l'arrêt. La fatigue doit être obtenue en 20-40 répétitions. S'il n'y a toujours pas de sensation de fatigue obligeant à l'arrêt à 40 répétitions, arrêtez-vous.

- Effectuer 3 séries par jour
- Noter sur le registre le nombre de mouvements de fermeture des yeux effectués à chaque série.

Position de départ



Mouvement



*Contrat d'Autorééducation Guidée – Renforcement du muscle ORBICULAIRE DES PAUPIERES - Dr Baude
Service de Rééducation Neurolocomotrice du Pr Gracies - Créteil*

**Figure 52B. Fiche d'autorééducation guidée.
Renforcement moteur du muscle orbicularis oculi.**

Renforcement moteur Muscles Zygomatiques

Objectifs :

Améliorer la symétrie de votre bouche au repos,
pendant la conversation et lors du sourire

Outil recommandé : un miroir

Position de départ Assis, devant le miroir

Mouvement Souriez le plus loin possible sur le côté **pendant 3 secondes**.
Faîtes une pause de 1 seconde avant de recommencer le
mouvement suivant.

Exercice Chaque série de mouvements s'effectue jusqu'à une
sensation de fatigue franche obligeant à l'arrêt. La fatigue
doit être obtenue en 20-40 répétitions. S'il n'y a toujours
pas de sensation de fatigue obligeant à l'arrêt à 40
répétitions, arrêtez-vous.

- Effectuer 3 séries par jour
- Noter sur le registre le nombre de mouvements de
sourire effectués à chaque série.

Position de départ

Mouvement



*Contrat d'Autorééducation Guidée – Renforcement des muscles ZYGOMATIQUES - Dr Baudé
Service de Rééducation Neurolocomotrice du Pr Gracies - Créteil*

Figure 52C. Fiche d'autorééducation guidée.
Renforcement moteur du muscle zygomaticus major.

Ordonnance d'Autorééducation

Nom, prénom : _____ Date : _____

Pour les 3 muscles indiqués ci-dessous, effectuez si possible devant miroir des séries de contractions maximales pendant 3 secondes, avec une très courte pause de moins d'une seconde entre deux contractions successives. Chaque série de contractions s'effectue jusqu'à une sensation de fatigue franche obligeant à l'arrêt. Noter sur le registre le nombre de mouvements effectués à chaque série.


1) Frontalis :

3 séries fatigantes par jour


- Relevez les deux sourcils le plus loin possible pendant 3 secondes,
- Relâchez une seconde,
- Recommencez.

Noter sur le registre le nombre de mouvements effectués à chaque série.

Position de départ



Mouvement




2) Orbicularis oculi :

3 séries fatigantes/jour


- Fermez les deux yeux le plus fort possible pendant 3 secondes,
- Relâchez une seconde,
- Recommencez.

Noter sur le registre le nombre de mouvements effectués à chaque série.

Position de départ



Mouvement




3) Zygomaticus major :

3 séries fatigantes/jour


- Souriez le plus loin possible sur le côté pendant 3 secondes,
- Relâchez une seconde,
- Recommencez.

Noter sur le registre le nombre de mouvements effectués à chaque série.

Position de départ



Mouvement



Tampon et signature :

Figure 53. Ordonnance d'autorééducation guidée du groupe CAG de l'étude VISAGE.

	FRONTALIS <i>Relevez les sourcils le plus haut possible</i>			ORBICULARIS OCULI <i>Fermez les yeux le plus possible</i>			ZYGOMATICUS MAJOR <i>Souriez le plus loin possible sur le côté</i>		
	Nombre d'efforts jusqu' à la fatigue à chaque série								
DATE	Série 1	Série 2	Série 3	Série 1	Série 2	Série 3	Série 1	Série 2	Série 3
J2									
J3									
J4									
J5									
J6									
...									

Tableau 2. Registre d'autorééducation guidée du groupe CAG de l'étude VISAGE.

3. Procédures de la phase clinique de VISAGE

a. Procédure de randomisation

La liste de randomisation a été générée par ordinateur par un statisticien de l'Unité de Recherche Clinique des Hôpitaux Universitaires Henri Mondor (Créteil, France), indépendant de l'étude, et téléchargée dans un formulaire de rapport de cas en ligne (CRF électronique, eCRF-Cleanweb Telemedecine Technologies, France). L'investigateur principal de chaque centre se connecte ainsi à l'eCRF via un navigateur web pour remplir les caractéristiques des participants et les affecter à leur groupe d'étude en ligne. Un numéro d'étude unique est attribué à chaque participant dans un ordre séquentiel (format R00X). La randomisation est faite à J-30, et chaque participant est assigné à l'un des deux groupes de traitement : groupe CONV (rééducation conventionnelle) ou groupe CAG (contrat d'autorééducation guidée). Un courriel de confirmation est alors envoyé à l'investigateur du centre de coordination qui n'aura pas été mis en aveugle (CGC). Comme les visites d'évaluation ne sont effectuées que dans un seul des quatre centres d'inclusion (le CHU Henri Mondor est le seul à posséder le système Cara), la randomisation n'est pas stratifiée par centre mais en fonction du score initial de symétrie volontaire de l'échelle Sunnybrook Facial Grading Scale (allant de 5 à 25) réalisé à J-30. Pour assurer la comparabilité des patients par rapport à leur niveau de fonction motrice (sévérité) à l'inclusion, deux fourchettes de scores moteurs ont été sélectionnées : [5-15] et [16-25]. L'aveugle sera respecté jusqu'à ce que la base de données soit gelée.

b. Cadre et recrutement de l'étude

La phase clinique de VISAGE implique quatre centres franciliens : le service de Rééducation Neurolocomotrice et le service de Chirurgie Maxillo-faciale et Plastique des Hôpitaux Universitaires Henri Mondor de Créteil, le service de Chirurgie Maxillo-faciale et de Stomatologie de l'hôpital Saint-Joseph à Paris, et le service d'ORL, de Stomatologie et de Chirurgie Cervico-Faciale du Centre Hospitalier Intercommunal à Créteil. Chacun de ces

centres admet plus de 20 nouveaux cas par an de patients présentant une parésie faciale périphérique et devrait recruter plus de 20 participants à l'étude.

c. Périodes et rythme d'inclusion de l'étude

Les inclusions de la phase clinique ont commencé en mars 2021 et sont toujours en cours. La période d'inclusion initiale avait été fixée à 24 mois. La figure 54 illustre le rythme des inclusions au 8 novembre 2024. Une première extension de six mois de la période d'inclusion a été obtenue en juin 2024 prolongeant les inclusions au 8 décembre 2024. Une dernière extension de 8 mois a été demandée en septembre 2024 afin de poursuivre les inclusions.

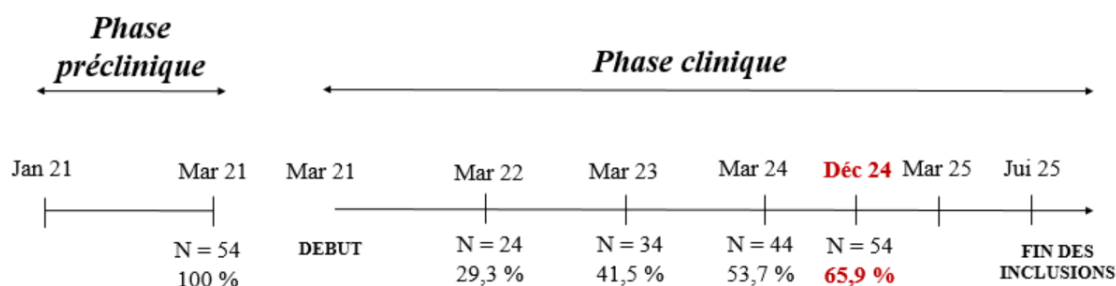


Figure 54. Rythme des inclusions de l'étude VISAGE.

4. Populations et critères de sélection

a. Phase pré-clinique

Les patients éligibles étaient des patients majeurs exempts de parésie faciale périphérique pris en charge dans le service de Rééducation Neurolocomotrice du CHU Henri Mondor de Créteil. Ils devaient répondre aux **critères d'inclusion** suivant : 1) être majeur ; 2) être exempt de parésie faciale périphérique ; 3) être d'accord pour se raser (hommes) et/ou ne pas se maquiller (femmes) le jour des évaluations 3D ; 4) ne pas avoir d'antécédent d'interventions chirurgicales ou esthétiques au niveau du visage ; 5) avoir signé un consentement éclairé ; 6) être affilié à un régime de sécurité sociale. Les **critères de non-inclusion** étaient les suivants :

1) être sous tutelle ou curatelle ; 2) avoir un antécédent de parésie faciale ; 3) avoir un antécédent de chirurgie faciale ; 4) être impliqué dans un autre protocole de recherche concernant l'esthétique du visage ou la parésie faciale périphérique, d'après l'avis de l'investigateur principal.

b. Phase clinique

Les patients éligibles doivent avoir reçu un diagnostic de maladie chronique stable, c'est-à-dire survenue d'une parésie faciale périphérique unilatérale depuis au moins un an avant l'inclusion quelle que soit sa cause.

Les patients peuvent en effet être recrutés au bout d'un an après l'apparition de la maladie pour les raisons suivantes : il n'y a pas de consensus sur la transition de la maladie vers la forme chronique, mentionnée de 6 mois à deux ans selon les rapports (Cooper, Lui and Nduka, 2017; de Sanctis Pecora and Shitara, 2021) ; il est souvent considéré que la majeure partie de la récupération neurologique se produit au cours de la première année suivant l'apparition de la paralysie même s'il n'y a pas de preuve scientifique à ce jour. De même, on considère que plus la parésie faciale est éloignée, moins la rééducation sera efficace et les patients se voient généralement proposer de commencer des injections de toxine botulique à partir d'un an après l'apparition de la parésie et, une fois qu'elles ont commencé, il est rare que le patient accepte de se soumettre à une rééducation conventionnelle. Dans Beurskens et al. 2006, il a également été considéré que les patients entre 9 et 12 mois étaient dans le stade chronique de la pathologie (Beurskens and Heymans, 2006).

Pour participer à l'étude, les sujets doivent répondre à tous les autres critères d'inclusion et à aucun des critères d'exclusion suivants :

- **Critères d'inclusion dans l'étude** : 1) présenter une parésie faciale périphérique unilatérale chronique, *i.e.* depuis plus d'un an, quelle qu'en soit l'étiologie ; 2) être majeur ; 3) être pris en charge en ambulatoire ; 4) avoir une motivation suffisante pour

participer à un programme de rééducation faciale pendant six mois, d'après l'avis de l'investigateur ; 4) être d'accord pour se raser la barbe (hommes) ou ne pas se maquiller (femmes) pour ne pas entraver les évaluations le matin des 4 visites de l'étude ; 5) avoir signé un consentement éclairé ; 6) être affilié à un régime de sécurité sociale.

- **Critères d'exclusion dans l'étude** : 1) avoir une parésie faciale périphérique d'origine tumorale en cours d'évolution ; 2) avoir un antécédent d'injection de toxine botulique dans les muscles faciaux dans les six mois précédant l'inclusion ou injection de toxine botulique dans les muscles faciaux programmée pendant l'étude ; 3) avoir un antécédent de chirurgie faciale dans les deux ans précédant l'inclusion ou programmée pendant l'étude ; 4) avoir un antécédent de chirurgie de réanimation du sourire nécessitant une rééducation spécifique (anastomose V-VII ou XII-VII ou transfert musculaire) ; 5) avoir un antécédent de traitement non chirurgical à visée esthétique au niveau du visage (acide hyaluronique / lipofilling/laser/fils tenseurs) dans les deux ans précédant l'inclusion ou programmés pendant l'étude ; 6) avoir des parésies faciales périphériques récidivantes ; 7) être impliqué dans un autre protocole de recherche interventionnelle concernant l'esthétique du visage ou la parésie faciale périphérique, d'après l'avis de l'investigateur principal ; 8) avoir une pathologie intercurrente entravant la réalisation du programme de rééducation pendant l'étude ; 9) avoir un trouble cognitif, mental ou psychique empêchant la réalisation du programme de rééducation ou la possibilité de se rendre de façon autonome aux consultations de suivi et aux sessions d'évaluation, d'après l'avis de l'investigateur ; 10) être sous tutelle ou curatelle.

5. Visites d'évaluation et de rééducation (J1, J90, J180) de la phase clinique

Les évaluations cliniques, les enregistrements vidéo et les analyses 3D des sujets inclus dans la phase clinique sont réalisés dans un seul centre investigateur : le service de Rééducation

Neurolocomotrice des Hôpitaux Universitaires Henri Mondor, Créteil, France (centre d'évaluation étant le seul des centres à posséder le système Cara).

Les visites de dépistage ont lieu lors des consultations régulières dans chaque centre. Les patients répondant aux critères de sélection sont invités à participer au protocole. Une note d'information de l'étude est fournie aux participants potentiels à l'étude qui disposent d'un délai de réflexion d'au moins deux semaines pour décider de leur participation. Le consentement éclairé est signé et recueilli à la visite d'inclusion. La randomisation est effectuée le jour de l'inclusion (J-30) par l'investigateur principal de chaque centre, entre le groupe de rééducation conventionnelle (CONV) et le groupe contrat d'autorééducation guidée (CAG) (voir procédure de randomisation ci-dessus). Chaque participant est donc assigné aléatoirement à l'un des deux groupes et recevra son programme de rééducation en fonction du bras randomisé, pour une durée de six mois. Afin de minimiser un éventuel effet nocebo pour le groupe traité de manière conventionnelle, l'investigateur de l'étude ne divulguera pas les détails du contrat d'autorééducation guidée aux participants ni aux rééducateurs des patients. La rééducation faciale débutera le lendemain de la première évaluation, soit à J2. En pratique, deux médecins MPR, un médecin évaluateur en aveugle (MB) et un médecin neurorééducateur en ouvert du groupe de traitement (CGC), rencontrent séparément chaque participant à J1, J90 et J180, pour une visite d'évaluation en aveugle et une visite de rééducation en ouvert.

Lors de chaque visite d'évaluation :

- L'investigateur évaluateur en aveugle fait passer les échelles cliniques, les auto-questionnaires et l'analyse faciale en 3D (sauf à J90) ;
- L'investigateur rééducateur en ouvert organise et suit la rééducation. Après avoir reçu le résultat de la randomisation à J-30, il : 1) informe le participant de la nature de son bras de randomisation ; 2) enseigne le CAG pour les participants randomisés dans le groupe CAG ; 3) trouve un rééducateur libéral par le biais d'une liste dédiée, pour les

participants randomisés dans le groupe CONV ; 4) remet au participant un carnet de rééducation en fonction du bras ; 5) fixe la date de la première visite (J1).

Le tableau 3 présente le calendrier de l'étude et les actions menées.

	J-30	J1	J30	J60	J90	J120	J150	J180
Note d'information	X							
Recueil du consentement signé	X							
Vérification critères de sélection	X							
Randomisation	X							
Examen clinique	X	X			X			X
Apprentissage et contrôle programme de rééducation*		X			X			
Echelle de Sunnybrook	X	X			X			X
Echelle de Créteil		X			X			X
FaCE		X			X			X
FACE-Q		X			X			X
HADS		X			X			X
SF-12		X						X
Analyse cinématique 3D		X						X
Recueil effets indésirables					X			X
Appels téléphoniques			X	X		X	X	
Examen du registre*					X			X

Tableau 3. Calendrier de l'étude et actions menées. * pour le groupe CAG

6. Critères d'évaluation de la phase clinique

a. Critère d'évaluation principal

Pour évaluer la fonction motrice au-delà d'un an après une lésion du nerf facial, le **principal critère d'évaluation** de l'étude VISAGE est le score composite du *Sunnybrook Facial Grading System*. Cette échelle, créée par Ross *et al.* en 1996, évalue la symétrie par rapport au côté normal pour chaque tiers du visage en évaluant la symétrie au repos et la symétrie des mouvements volontaires sur une échelle en cinq degrés pendant cinq mouvements faciaux et les syncinésies associées. Un score composite est ensuite calculé, allant de 0 (paralysie totale) à 100 (normal) (Ross, Fradet and Nedzelski, 1996). La version française du SFGS a été récemment validée (Waubant, Franco-Vidal and Ribadeau Dumas, 2022). Le choix de ne pas

utiliser les échelles d'évaluation dérivées de House-Brackmann (House and Brackmann, 1985; Vrabcic *et al.*, 2009) est en accord avec le fait que ces échelles ne sont plus recommandées dans la recherche (Kanerva, Poussa and Pitkäranta, 2006; Fattah *et al.*, 2015; Paolucci *et al.*, 2020) et qu'elles ne sont pas suffisamment précises pour analyser les différentes composantes neuromusculaires de la parésie faciale périphérique chronique.

b. Critères d'évaluation secondaires

Les **critères d'évaluation secondaires** de la phase clinique de VISAGE sont les suivants :

1. *Qualité de vie spécifique*, en lien avec la parésie faciale périphérique (PFP), évaluée par le **Facial Clinimetric Evaluation** (FaCE), un auto-questionnaire validé en français (Barry *et al.*, 2019). L'échelle FaCE étudie la qualité de vie spécifique perçue par les patients atteints de PFP à travers 15 questions couvrant six domaines (Kahn *et al.*, 2001). Le score total et les sous scores varient de 0 à 100. Plus les scores sont élevés, meilleure est la qualité de vie.
2. *Qualité de vie globale perçue*, évaluée par le **Short Form version 12** (SF-12) : il s'agit d'un auto-questionnaire comprenant 12 items évaluant la qualité de vie perçue. Le système de notation est ordinal. Deux scores sont calculés, un score composite physique (*Physical Component Summary* ou PCS, sur 26) et mental (*Mental Component Summary* ou MCS sur 30) (Ware, Kosinski and Keller, 1996) ; le SF-12 a été validé en français en 1998 (Gandek *et al.*, 1998). Plus les scores sont élevés, meilleure est la qualité de vie.
3. *Auto-évaluation esthétique* recueillie à l'aide du **FACE-Q** ; il s'agit d'un auto-questionnaire de dix questions qui interroge le patient sur l'esthétique perçue de son visage (Klassen *et al.*, 2010; Pusic *et al.*, 2013). Le système de notation est ordinal de 1 (« très insatisfait ») à 4 (« très satisfait »). L'échelle FACE-Q a été validée en 2022 (Gama *et al.*, 2020). S'étalonnant entre 10 et 40, plus le score est élevé, meilleure l'auto-évaluation esthétique du visage est ressentie.
4. *Niveaux d'anxiété et de dépression* à l'aide de l'échelle **Hospital Anxiety and Depression Scale** (HADS) (Bjelland *et al.*, 2002) ; cet auto-questionnaire comprend 14 items notés de 0 à

3. Sept items sont liés à l'anxiété et sept autres aux caractéristiques dépressives, ce qui permet d'obtenir deux scores finaux, HADS-A et HADS-S, chaque allant de 0 à 21. Les scores de 7 ou moins indiquent une absence de symptômes, ceux de 8 à 10 suggèrent une symptomatologie douteuse et ceux de 11 et plus attestent d'une symptomatologie anxieuse et/ou dépressive certaine. L'échelle a été validée en français dans diverses populations de patients (Lépine *et al.*, 1985).

5. *Évaluation de l'observance et de la quantité de l'autorééducation* dans le groupe CAG, à travers le taux de remplissage du registre quantifié sur six mois.

6. *Évaluation de la quantité et des techniques de rééducation conventionnelle* dans les deux groupes, grâce aux données collectées sur la fréquence moyenne et les techniques utilisées sur une période de six mois.

7. *Quantification subjective de la motricité faciale par l'Echelle de Créteil*. L'Echelle de Créteil (EC) a été développée par Gracies et Baude à partir de 2012 (Baude *et al.*, 2012) afin d'évaluer les 12 groupes de muscles faciaux suivants : frontalis, corrugator, procerus, orbicularis oculi, levator nasolabialis, zygomaticus major, risorius, buccinator, orbicularis oris, depressor anguli oris, mentalis et platysma. Pour chacun de ces 12 groupes musculaires, l'échelle quantifie cinq composantes fondamentales de la lésion du nerf facial, au repos (30 secondes), lors d'une conversation spontanée (30 secondes) et lors d'efforts volontaires maximaux sur chacun des 12 groupes musculaires, générant **9 scores au total** décrits ci-dessous :

1) La force motrice des 12 groupes de muscles faciaux est évaluée par un système de notation à 9 niveaux allant de 0 (pas de contraction) à 3 (contraction normale), donnant un **score moyen de force motrice volontaire maximale** ;

2) La localisation et le nombre de muscles syncinétiques ainsi que l'intensité des syncinésies involontaires générées lors d'un effort volontaire maximal dirigé vers

chacun des 12 groupes musculaires faciaux sont évalués, donnant un **score moyen de nombre de muscles syncinétiques** et un **score moyen d'intensité des syncinésies** ;

3) La localisation et la fréquence des spasmes pendant une période de repos de 30 secondes et pendant une conversation spontanée de 30 secondes, sont évaluées par un système de notation ordinaire à 7 niveaux, donnant un **score moyen de spasmes au repos** et un **score moyen de spasmes en conversationnel** (leur moyenne donnant un *score moyen de spasmes*).

4) Un *score moyen de symétrie lié à la parésie*, quantifiant la symétrie au repos et pendant la conversation en recherchant les manques de tonus (repos) ou contraction (conversation) de chaque groupe musculaire donnant un **score moyen de symétrie lié à la parésie au repos** et un **score moyen en conversationnel** ;

5) Un *score de symétrie lié à la contracture*, quantifiant la symétrie au repos et pendant la conversation à la recherche d'une hyperactivité dans chaque groupe musculaire, donnant un **score moyen de symétrie lié à la parésie au repos** et un **score moyen en conversationnel**.

8. *Quantification objective de la fonction motrice faciale en 3D* grâce à l'analyse des mouvements faciaux en 3D dans un casque portable par le biais du **système Cara™**. Les rapports d'asymétrie et l'analyse de Procuste est effectuée au repos (pendant une période de 30 secondes), au cours de douze mouvements maximaux et lors d'un sourire spontané (Guihard, Gracies and Baude, 2022). La quantification des syncinésies hémifaciales lors des mouvements volontaires, des contractures hémifaciales détectées au repos mais également des spasmes hémifaciaux essentiellement décelables eux aussi au repos sera réalisée à travers l'utilisation et l'application de différences outils tels que des indices d'asymétrie. Les syncinésies (qualité, fréquence et sévérité) seront évaluées lors de chaque mouvement volontaire maximal (12 mouvements au total) et lors d'un sourire spontané ; les spasmes seront détectés et quantifiés

pendant une période de repos de 30 secondes, tout comme la contracture dont la quantification reposera essentiellement sur la comparaison de la déformation de volumes tridimensionnels faciaux entre les deux hémifaces.

7. Gestion des données

Toutes les informations requises par le protocole sont intégrées dans l'eCRF (*electronic Case Reporting Form*) dédié à l'étude VISAGE. Les données sont collectées au fur et à mesure de leur obtention. Toute donnée manquante sera codée. Chaque site a accès à l'eCRF via un système de collecte de données en ligne. Chaque investigateur est responsable de l'exactitude, de la qualité et de la pertinence les données saisies. Une trace de chaque changement est sauvegardée. Le fichier informatique utilisé pour cette recherche est mis en œuvre conformément à la loi française (Loi Informatique et Libertés modifiée relative à la protection des données) et européenne (Règlement général sur la protection des données – GRPD). Le promoteur a obtenu l'autorisation de la CNIL (Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés) avant de mettre en œuvre tout traitement de données nécessaires à la réalisation de la recherche. Si un sujet cesse de participer ou retire son consentement, les données collectées jusqu'à la date de cessation seront analysées. Si un sujet est perdu pour le suivi, l'investigateur doit mettre tous les moyens en œuvre pour reprendre contact avec le patient. Les sujets qui ont cessé prématurément de participer à la recherche ne seront pas remplacés.

8. Contrôle des données

Un associé de recherche clinique (ARC) désigné par le promoteur est responsable du traitement correct des données, du bon déroulement de l'étude, de la collecte, de la documentation et de l'enregistrement des données, et de la communication de toutes les données manuscrites, conformément à la réglementation en vigueur et de rapporter toutes les données manuscrites, conformément aux procédures opératoires normalisées appliquées au sein de la DRCI (Département de Recherche Clinique et d'Innovation) de l'Assistance Publique-Hôpitaux

de Paris et conformément aux Bonnes Pratiques Cliniques ainsi qu'aux exigences légales et réglementaires. Un contrôle de qualité informatisé est en place pour la détection des données manquantes et la cohérence de la chronologie des données. En cas de remplissage incorrect de l'e-CRF, l'investigateur est invité à le corriger.

9. Avis éthique et enregistrement de l'essai

L'étude VISAGE a été conçue conformément à la déclaration d'Helsinki. Le protocole de l'étude, les lettres d'information et les formulaires de consentement éclairé des phases préclinique et clinique ont été approuvés par le Comité de Protection de Personnes Est-III (Nancy, France) le 3 octobre 2018. L'étude VISAGE est enregistrée dans la base de données ClinicalTrials.gov (NCT04074018).

10. Nombre de sujets nécessaires

a. Phase pré-clinique

Le nombre de patients analysables exempts de parésie faciale périphérique nécessaires a été fixé à 50 sujets (données de la littérature sur les études de validité de système d'analyse du mouvement), **soit 53 patients éligibles** en considérant que 5% de patients auraient des données non analysables (n=3).

b. Phase clinique

Le nombre de sujets requis a été déterminé à **82 patients éligibles**, d'après les données préliminaires de la littérature : à notre connaissance, le seul essai contrôlé randomisé sur la rééducation aux stades subaigus/chroniques de la parésie faciale périphérique (participants recrutés à partir de 9 mois après l'apparition de la parésie) utilisant le SFGS a inclus 50 participants, dont seulement 24 ont bénéficié de la rééducation (liste d'attente sans rééducation dans l'autre groupe) (Beurskens and Heymans, 2006). Contrairement à ce protocole de Beurskens, les participants du groupe de contrôle de la présente étude bénéficieront d'une intervention (kinésithérapie et/ou orthophonie), qui sera associée à un potentiel d'amélioration

de l'état clinique. Nous émettons donc l'hypothèse d'une amélioration mineure de + 10 points du score composite de l'échelle FGS de Sunnybrook dans ce groupe. Sur la base de cette hypothèse et pour démontrer une amélioration de + 20 points (avec un écart-type allant jusqu'à 13) pour le groupe expérimental, en considérant un risque alpha de 5% (test bilatéral) et une puissance statistique de 90%, nous inclurons 41 patients par groupe pour 36 analysés (en supposant une perte de suivi de 10%). En ce qui concerne les objectifs secondaires, il convient de noter que cette taille d'échantillon sera comparable à celle d'autres études de fiabilité et de validité d'échelles cliniques, concernant par exemple l'échelle FaCE (n = 67 à 122 patients) (Kanerva, Poussa and Pitkäranta, 2006; Cooper, Lui and Nduka, 2017; Paolucci *et al.*, 2020; de Sanctis Pecora and Shitara, 2021; Guihard, Gracies and Baude, 2022) et plus importante que celle de l'étude initiale de validation du SFGS (n = 19) (Ross, Fradet and Nedzelski, 1996). En ce qui concerne la fiabilité des paramètres tels que les coefficients de corrélation intra-classe (ICC) et les valeurs d'ICC attendues pour l'échelle FaCE (ICC) et pour des valeurs d'ICC qui devraient être > 70 %, la taille de l'échantillon suggérée permettra d'estimer la fiabilité des tests, la taille d'échantillon suggérée permettra d'estimer les ICC avec une précision de $\pm 15\%$ pour deux mesures et de $\pm 10\%$ pour trois mesures et plus (Zou, 2012). Des stratégies sont mises en place avec les spécialistes ORL, les orthophonistes et les kinésithérapeutes de la région parisienne (présence sur les réseaux sociaux, participation à des enseignements de la part de l'investigateur principal) pour atteindre d'obtenir un nombre suffisant de participants pour aboutir à la taille souhaitée de l'étude.

11. Description des méthodes statistiques

Une analyse statistique descriptive sera réalisée pour évaluer les groupes de randomisation en termes de caractéristiques démographiques, cliniques et cinématiques initiales, notamment cause de la PFP, délai écoulé depuis la lésion, côté de la parésie, traitements médicamenteux antérieurs et comorbidités. Les données quantitatives seront décrites à l'aide de moyennes (\pm

SD) ou de médianes (avec IQR), en fonction de l'âge et du sexe, en fonction de la normalité des distributions, et les données qualitatives seront rapportées sous forme de nombres ou de pourcentages. Les changements dans le score composite de Sunnybrook entre J1 et J180 seront évalués par le test *t* de Student. Aucune analyse intermédiaire n'est prévue. L'analyse du critère de jugement primaire sera réalisée en intention de traiter (ITT). L'analyse comparative des valeurs quantitatives à J90 et J180 - y compris les critères primaires et secondaires - sera réalisée à l'aide de tests *t* de Student pour échantillons indépendants ou avec des tests non paramétriques de Mann-Whitney, en fonction des conditions. Les changements quantitatifs entre l'inclusion et chaque visite d'évaluation (J90-J1, J180-J1) seront comparés en tenant compte des données de base en cas de différences entre les groupes malgré la randomisation. Les changements au sein des groupes seront testés à l'aide de la méthode de Student pour les données appariées ou par des tests de Wilcoxon pour données appariées ou des tests de somme de rangs de Wilcoxon, selon les conditions. Des modèles de régression linéaire multiple seront testés afin d'identifier des prédicteurs indépendants associés à l'évolution des paramètres quantitatifs au fil du temps, y compris l'analyse longitudinale des effets aléatoires (modèles mixtes).

L'analyse comparative des paramètres binaires sera effectuée par des tests du chi 2 ou des tests exacts de Fisher, selon les conditions. L'analyse multivariable sera réalisée par des modèles de régression logistique. Les études de fiabilité intra et inter évaluateurs utiliseront les coefficients de corrélation intra-classe, et les coefficients kappa de Cohen et de Fleiss. Les coefficients de Spearman ou de Pearson seront calculés entre les scores des différentes échelles, en fonction des conditions. Les analyses complémentaires sur le critère de jugement primaire et sur les critères de jugement secondaires seront effectuées dans les populations en ITT et per protocole (PP) afin de décrire les patients exclus de la population PP et d'évaluer la robustesse des résultats. Toutes les données manquantes ou invalides seront systématiquement vérifiées dans les dossiers des patients. En plus de l'analyse réalisée sur les cas complets sans données

manquantes pour le résultat primaire, une analyse de sensibilité sera réalisée en utilisant différentes méthodes de remplacement des données manquantes, y compris la méthode LOCF (Last Observation Carry Forward), l'hypothèse la plus défavorable et l'imputation multiple par équations chaînées (MICE). Les participants qui mettent fin prématurément à l'étude ne seront pas remplacés. Toutes les analyses seront effectuées avec le logiciel Stata v14.1 (StataCorp, College Station, TX, USA).

D. Discussion

A notre connaissance, cette étude sera la première étude contrôlée évaluant une technique de renforcement de la motricité faciale sur trois muscles clés par le biais de la stratégie des contrats d'autorééducation guidée dans le traitement de la parésie faciale chronique. L'étude représente également une implication peu commune d'une équipe de neuroéducation, classiquement impliquée dans les troubles moteurs centraux, dans le domaine de la parésie faciale périphérique. Un certain nombre d'arguments plaident en faveur de la plausibilité que le renforcement moteur puisse aider les patients à : (i) retrouver une meilleure animation émotionnelle du visage et (ii) réduire l'hyperactivité des muscles faciaux.

Pourquoi un renforcement de la motricité faciale dans la parésie faciale chronique ?

L'objectif d'un programme de renforcement moteur pour la parésie est de permettre une meilleure *exécution périphérique* – grâce à la restauration de la fonction du nerf facial – de la commande émotionnelle aux muscles faciaux. L'importante étude de Beurskens et Heymans 2006, a montré que la ré-intensification du travail moteur permettait d'obtenir des améliorations dans une population souffrant de parésie faciale chronique (Beurskens and Heymans, 2006).

En ce qui concerne la transmission périphérique de la commande motrice, le phénomène de plasticité des synapses périphériques en fonction de l'activité a été démontré par les travaux de Klein et Kandel (Klein and Kandel, 1978). Quant à la conduction le long des axones périphériques, il y existe également un phénomène de plasticité qui répond de manière aiguë à

une activité intense le long du nerf périphérique (Vagg *et al.*, 1998). Des études objectivent aussi une remyélinisation chronique des neurones périphériques induite par l'entraînement et dépendante de l'activité de ces neurones (Vagg *et al.*, 1998; Volk *et al.*, 2015; Kato and Wake, 2019). Ces dernières études soutiennent donc l'hypothèse selon laquelle l'implication du nerf facial dans un travail chronique répété pourrait améliorer la conduction le long de ses axones par un processus de remyélinisation et améliorer ainsi la commande émotionnelle.

En ce qui concerne l'hyperactivité musculaire et l'excitabilité des motoneurones périphériques, un certain nombre d'études montrent que l'augmentation de l'activation musculaire descendante par l'entraînement moteur augmente la *dépression post-activation* à long terme, ce qui doit contribuer à réduire en fait l'hyperactivité des motoneurones (Trimble, Kukulka and Behrman, 1998; Obata *et al.*, 2022). Au passage, l'inverse est également vrai, car la réduction de l'activation descendante cause une hyperexcitabilité du motoneurone périphérique en subaigu (Lundbye-Jensen and Nielsen, 2008a, 2008b; Seynnes *et al.*, 2008). Il est donc peu probable que les programmes de renforcement moteur puissent augmenter l'excitabilité des motoneurones faciaux ; il est en fait possible d'émettre l'hypothèse que cette technique de rééducation pourrait réduire l'excitabilité motoneuronale et donc l'hyperactivité des muscles faciaux (syncinésies, spasmes et contractures hémifaciales).

Caractéristiques des deux groupes de traitement rééducatif

Plusieurs différences peuvent être anticipées entre les deux traitements de rééducation. Ni la qualité ni la quantité de la rééducation n'ont été imposées aux thérapeutes impliqués dans le groupe de contrôle, afin de refléter au mieux la vie réelle. Il est donc probable que la fréquence, les techniques et la durée des séances de rééducation seront très hétérogènes dans le groupe contrôle. Nous avons prévu de recueillir ces paramètres de rééducation à J90 et J180 afin d'estimer le travail effectué dans ce groupe témoin. Techniquement, dans les techniques de rééducation utilisées en pratique courante, les efforts de renforcement moteur sont rarement

recommandés et utilisés, en particulier à forte intensité, en raison de la crainte ou de la croyance de pouvoir ainsi déclencher ou aggraver une hyperactivité musculaire. En conséquence, la quantité de travail de rééducation classiquement effectuée évite généralement l'intensité et peut donc être insuffisante pour exploiter la plasticité du système nerveux induite par les changements comportementaux.

D'un point de vue psychologique, la responsabilisation et l'implication du patient dans son programme de rééducation permettant d'atteindre des niveaux d'intensité de travail plus élevés constituent l'essence de la stratégie du contrat d'autorééducation guidée. Le patient a la responsabilité active d'accomplir le travail quotidien prescrit et de le notifier dans le registre écrit quantifié, ce qui contraste fortement avec l'attente souvent trop passive des séances de rééducation libérale de la pratique courante. Dans l'ensemble, cette étude devrait permettre d'accroître le niveau de connaissance sur les effets du renforcement de la motricité faciale par le biais de contrats d'autorééducation guidée dans les stades chroniques. Elle améliorera également le niveau des connaissances sur la motricité faciale au repos et lors de contractions faciales volontaires et émotionnelles. La validation d'une nouvelle échelle clinique précise (Echelle de Créteil) et d'un système portable d'analyse 3D des mouvements faciaux permettra de mieux quantifier la PFP. Enfin, l'utilisation du questionnaire FACE-Q interrogeant sur l'auto-appréciation esthétique de visage pourrait se révéler être un outil pertinent d'évaluation de la parésie faciale périphérique.

E. Délimitation du travail de thèse

Le travail rapporté dans cette thèse concerne en premier lieu la présentation des **résultats de la phase pré-clinique** de VISAGE. Il s'est agi de la mise en place d'un protocole standardisé et fiable d'analyse des mouvements faciaux à la fois au repos et lors de dix mouvements faciaux bilatéraux d'amplitude maximale permettant l'acquisition d'une base de données normatives

3D à la fois au repos et au mouvement et le développement de différents indices de symétrie faciale.

La seconde partie de ce travail s'est concentrée sur le premier jour d'évaluation (J1) de la phase clinique présentant une parésie faciale périphérique unilatérale. L'évaluation des questionnaires et des échelles cliniques a permis d'étudier la **validité de l'Echelle de Créteil** par rapport à l'échelle de référence (Sunnybrook Facial Grading System). L'Echelle de Créteil a pour objectif de dissocier et de quantifier les différentes composantes neuro-musculaires de la parésie faciale périphérique chronique hyperactive afin d'être au plus proche de la clinique mais également de réussir à quantifier l'effets de différentes interventions (programmes de rééducation, injections d'agents bloquant, d'agents comblants, techniques de chirurgies faciales). La **quantification biomécanique des différentes composantes de la PFP** n'a pas pu être réalisée pour le rendu de ce manuscrit et sera proposée ultérieurement.

CHAPITRE III : Base de données normatives tridimensionnelles faciales via un système de casque portatif chez le sujet sans lésion du nerf facial

Guihard M, Gracies JM, Baude M. Three-Dimensional Quantification of Facial Morphology and Movements Using a Wearable Helmet. Biomed Res Int. 2022;2022 :2774713

A. Introduction

La parésie faciale périphérique est une pathologie qui peut avoir d'importantes répercussions fonctionnelles, esthétiques et émotionnelles pouvant conduire à l'isolement social et à la survenue de troubles anxiodépressifs chez les patients (Owusu, Stewart and Boahene, 2018). L'évaluation fine des mouvements faciaux reste encore un défi car elle implique celle d'un nombre important de groupes musculaires ayant la particularité d'être peu épais, de petite taille et souvent difficiles à distinguer les uns des autres cliniquement du fait d'une intrication entre eux et d'une course de mouvement (Cattaneo and Pavesi, 2014; Sekikawa *et al.*, 2019). De plus, chaque visage étant unique en termes de dimensions, de proportions et même de degré de symétrie, aucun protocole d'analyse standardisé et valide n'a été établi à ce jour.

Parmi les différentes causes de parésie faciale périphérique, la parésie faciale périphérique idiopathique, dite de Bell, est la plus fréquente et touche les patients d'âge moyen, quel que soit leur sexe (Peitersen, 2002; Finsterer, 2008). Quelle que soit son étiologie, elle se traduit par une atteinte motrice en rapport avec une lésion du nerf facial, depuis son origine nucléaire jusqu'à ses terminaisons situées au niveau des jonctions neuromusculaires cervico-faciales. Si la lésion concerne le nerf en amont de sa division intra-parotidienne en rameaux puis branches terminales, les muscles parétiques voire plégiques sont situés sur l'ensemble de l'hémiface et de l'hémi-cou du côté lésionnel. En pratique clinique courante, le degré d'atteinte des muscles peauciers est évalué principalement à l'aide d'échelles de gradation clinique, qui sont par définition dépendantes de l'évaluation qui les utilise donc subjectives (Coulson *et al.*, 2005;

Fattah *et al.*, 2014). Au stade aigu de la pathologie, les examens complémentaires biologiques, d'imagerie et électroneurophysiologiques permettent de confirmer le diagnostic tout en apportant au patient des éléments pronostiques quant à sa récupération motrice faciale et en particulier sur le risque de voir apparaître des signes d'hyperactivité faciale à moyen et long termes qui coexistent généralement avec la persistance d'une faiblesse motrice (Grosheva, Wittekindt and Guntinas-Lichius, 2008; Mancini *et al.*, 2014; Urban *et al.*, 2020). Le traitement initial repose sur l'administration rapide de traitements oraux voire intraveineux, la prescription d'une rééducation faciale adaptée et parfois d'une procédure chirurgicale. Au stade chronique, la rééducation est le plus souvent arrêtée faute de progression, et le patient entre souvent dans un schéma d'injections de toxine botulique régulières avant pour but de symétriser son visage et/ou de diminuer les différentes formes d'hyperactivité musculaires faciales (syncinésies, contractures et spasmes hémifaciaux) (Cooper, Lui and Nduka, 2017). Les techniques chirurgicales sont variées et parfois indiquées pour améliorer la symptomatologie et le bien-être des patients (Hontanilla and Marre, 2013; Bao *et al.*, 2019), tandis que le traitement rééducatif vise davantage à améliorer le contrôle moteur des muscles cervico-faciaux. Après une parésie faciale périphérique et passé le stade aigu, la récupération motrice inhérente à la rééducation peut s'avérer réelle mais lente, ce qui nécessite des outils de quantification précis afin de détecter les progrès (Coulson, Crosson and Gilleard, 2000). Il est probable que la combinaison de techniques de quantification objective des mouvements faciaux validées et d'échelles cliniques de motricité faciale puisse améliorer l'objectivité et la fiabilité de l'évaluation du visage parétique (Zhao *et al.*, 2020).

Les outils de quantification objective de la motricité faciale sont basés sur des mesures de mouvements spécifiques pouvant être obtenus en deux dimensions (Linstrom, 2002; Baude, Hutin and Gracies, 2015) ou en trois dimensions (Hontanilla and Aubá, 2008; Jorge Jr. *et al.*, 2012; Tzou *et al.*, 2012; Vimercati *et al.*, 2012; Feng *et al.*, 2014; Trotman, Faraway and

Hadlock, 2020), sur l'analyse des formes comme pour les indices de topographie (Yuen *et al.*, 1997), utilisant des procédures stéréophotogrammétriques (Cassi *et al.*, 2019) ou le traitement des maillages 3D (Liao, Jin and Zeng, 2012). Il est désormais établi que l'analyse bidimensionnelle n'est pas suffisante pour mesurer les mouvements du visage, car les mesures bidimensionnelles ignorent les déplacements dans l'axe antéro-postérieur qui sont en particulier retrouvés dans l'hémiface inférieure (Coulson, Croxson and Gilleard, 2000). En 1999, Frey et al, ont conçu un dispositif bidimensionnel équipé de deux miroirs et d'une grille d'étalonnage pour calculer la troisième dimension (Frey *et al.*, 1999). Ce dispositif a été commercialisé et utilisé dans le cadre d'une grande étude internationale portant sur 241 patients atteints de parésie faciale périphérique, rapportée par Tzou et al. En 2012 (Tzou *et al.*, 2012). Le principe de la capture tridimensionnelle du mouvement au niveau du visage est basé sur la détection et le suivi de marqueurs collés sur la surface cutanée et enregistrés à l'aide de plusieurs caméras placées autour de la tête. Pendant longtemps, l'analyse tridimensionnelle a été limitée à la recherche clinique car les conditions expérimentales n'étaient pas réalistes pour une utilisation plus large en pratique clinique courante (Sarhan, 2017). En outre, les mouvements de la tête pendant les enregistrements compromettaient la fiabilité des données. Il est en effet essentiel de réussir à définir un cadre de référence qui soit indépendant des mouvements de la tête et du cou. Dans des travaux récents, Ben Mansour et al. (Ben Mansour *et al.*, 2014) ont comparé trois systèmes de références anatomiques composés pour deux d'entre eux d'une structure rigide supportant des marqueurs réfléchissants collés et fixés entre le maxillaire et la mandibule bouche fermée, dans la région de l'oreille, et pour le dernier constitué d'un bandeau péricrânien. Le dispositif situé entre les deux maxillaires s'est avéré être le plus satisfaisant des trois. Vimercati et al (Vimercati *et al.*, 2012) ainsi que Feng et al (Feng *et al.*, 2014) ont proposé un support rigide fixé sur la tête avec des marqueurs réfléchissants. Trotman et al. Ont proposé une rotation par

Procruste afin de faire correspondre les séquences de chaque sujet à un modèle standardisé afin de contrecarrer les mouvements de la tête (Trotman, Faraway and Hadlock, 2020).

Avec l'essor de la reconnaissance faciale biométrique et le développement d'avatars personnalisés dans les jeux vidéo, les avancées technologiques ont donné naissance à de nouveaux outils. Dans ce travail, nous avons utilisé le dispositif Cara™ de VICON (Vicon Oxford, UK), un casque instrumenté de quatre caméras permettant de filmer le visage voire le cou et de suivre des marqueurs faciaux en 3D, indépendamment d'éventuels mouvements de la tête et du cou. Outre le fait qu'il s'agissait de la technologie la plus récente spécifiquement conçue pour l'analyse des mouvements faciaux, cet outil offrait une flexibilité adaptée à la réalisation de mesures cliniques dans le cadre de la recherche clinique.

En plus de disposer d'un outil d'analyse biomécanique des mouvements faciaux, un protocole expérimental précis a dû être préparé afin de permettre l'analyse de la fonction motrice faciale. Le premier défi a consisté à sélectionner le type de marqueur à utiliser et à créer un modèle géométrique standardisé indiquant la position et le nombre de marqueurs faciaux utilisés. La plupart des études précédentes ont utilisé des marqueurs adhésifs et réfléchissants de différents diamètres, de 3 mm (Vimercati *et al.*, 2012; Trotman, Faraway and Hadlock, 2020) à 9 mm (Jorge Jr. *et al.*, 2012). Tzou *et al.* ont trouvé que le faible contraste et les ombres des plis du visage interféraient parfois avec le processus de suivi (Tzou *et al.*, 2012). Ces auteurs ont testé des marqueurs actifs et ont signalé la difficulté de les fixer sur la peau. Dans leurs perspectives, Vimercati *et al.* ont proposé d'utiliser un stylo à encre réfléchissante (Vimercati *et al.*, 2012) afin de faciliter le positionnement des marqueurs, permettre l'utilisation de marqueurs plus petits et réduire le temps de préparation. Dans ce travail, les marqueurs faciaux étaient dessinés sous la forme de points de 2 mm de diamètre à l'aide d'un stylo de maquillage standard peu onéreux (stylo à maquillage de type *khôl*), en utilisant deux couleurs différentes

(blanc ou noir) en fonction de la pigmentation de la peau afin d'optimiser le contraste et ainsi le repérage et suivi des marqueurs faciaux.

La localisation des marqueurs est essentielle afin de quantifier la symétrie du visage au repos, lors du mouvement ou encore pour individualiser et suivre la contraction des muscles faciaux. L'analyse des mouvements faciaux implique l'analyse théorique de plus de 20 groupes musculaires par hémiface, qui se chevauchent pour la plupart d'entre eux et ce dans un faible volume. Il n'existe pas de points faciaux parfaitement immobiles (Coulson, Croxson and Gilleard, 1999), même si certains points anatomiques spécifiques sont couramment étudiés (nasion, commissures buccales, base des ailes du nez, front) (Frey *et al.*, 1994; Coulson, Croxson and Gilleard, 2000). Leur emplacement est généralement étudié pour décrire la structure des tissus mous du visage à des fins de reconstruction chirurgicale (Ferrario *et al.*, 1993) ou à des fins de discrimination des mouvements du visage (Dagnes *et al.*, 2019). Notre objectif diffère ici, puisque nous nous concentrons sur l'évaluation de potentiels changements dans le contrôle neuromusculaire du visage chez les patients atteints de parésie faciale périphérique. Les marqueurs faciaux doivent ainsi être situés à l'endroit qui bougera le plus pendant le recrutement maximal des fibres musculaires dans la zone cutanée en regard des groupes musculaires cibles étudiés. Bandini *et al.* ont récemment développé des algorithmes de détection automatique des marqueurs et ont mis en évidence un biais corrélé à la sévérité de l'atteinte faciale (Bandini *et al.*, 2021). Nous avons opté pour une technique de positionnement précise des marqueurs faciaux basée sur l'inspection minutieuse d'un médecin sénior expérimenté (MB). Vingt-huit points ont été retenus pour permettre de développer un modèle géométrique d'analyse des mouvements du visage. L'enregistrement de séquences de repos et de séquences de contractions musculaires volontaires d'amplitude maximale ont été utilisées afin de calculer les amplitudes maximales des mouvements produits par 10 groupes musculaires faciaux.

La symétrie faciale est considérée comme intimement liée à l'attrait esthétique (Liao, Jin and Zeng, 2012). Par conséquent, de nombreuses études sur les muscles faciaux ont utilisées des techniques de superposition des deux hémifaces et d'analyse des formes à l'aide du traitement d'images (Mosmuller *et al.*, 2016; Cassi *et al.*, 2019; Harastani *et al.*, 2020) ou en calculant la distance moyenne des paires de marqueurs avec le pourcentage de coïncidence (Djordjevic *et al.*, 2013; Xue *et al.*, 2020). L'analyse de Procruste a dupliqué les repères originaux dans une version miroir se reflétant dans le plan sagittal (Trotman *et al.*, 2018) ou le plan de symétrie maximale (Taylor *et al.*, 2014; Khambay *et al.*, 2019) ou un plan arbitraire en dehors du visage (Cevidane *et al.*, 2011; Cassi *et al.*, 2019). Cette technique du miroir ne correspond pas à notre objectif car l'hémiface non affectée du patient parétique facial est influencée par les mouvements de l'hémiface affectée, qu'il s'agisse de mouvements volontaires ou spontanés (VanSwearingen, Cohn and Bajaj-Luthra, 1999; Trotman, Faraway and Hadlock, 2020). Les différentes formes d'hyperactivité musculaire telles que l'hyperactivation de l'hémiface saine visible au stade aigu d'une parésie faciale périphérique ou encore les syncinésies qui surviennent au stade plus chronique, affectent la symétrie (Bajaj-Luthra *et al.*, 1998).

Dans ce travail, nous avons proposé d'utiliser un indice d'asymétrie classique et un indice de Procruste. À notre connaissance, il s'agissait de la première tentative de quantification du mouvement 3D des principaux groupes musculaires faciaux. Il a permis de fournir une base de données normatives des mouvements 3D du visage avec laquelle les données d'une cohorte de patients présentant une lésion du nerf facial pourront être ultérieurement comparées. Cette phase sur sujets non parétiques faciaux était définie comme la phase préclinique du projet hospitalier de recherche clinique VISAGE (NCT04074018).

B. Méthodes

1. Protocole expérimental

L'analyse biomécanique des mouvements du visage a porté sur 10 groupes musculaires faciaux clés innervés par le nerf facial dont les tâches bilatérales correspondantes ont été définies en amont. Les groupes musculaires choisis étaient inclus dans l'Echelle de Créteil (Baude *et al.*, 2012, 2023). Le risorius, régulièrement inconstant chez le sujet sain, et le platysma dont l'enregistrement aurait nécessité le changement de position des caméras du casque Cara™ à chaque évaluation, n'ont pas été retenus.

Dix enregistrements étaient réalisés à chaque évaluation. Chaque séquence enregistrait l'activation d'un groupe musculaire cible correspondant à une tâche précise et à une consigne orale protocolisée. Chaque contraction musculaire était réalisée de façon bilatérale et avec une amplitude maximale de mouvement. Trois contractions volontaires d'amplitude maximale d'une durée de trois secondes chacune, séparées par des périodes de repos de cinq secondes, ont été enregistrées pour chacune des dix tâches (Coulson, Croxson and Gilleard, 2000; Vimercati *et al.*, 2012). Le tableau 4 présente les groupes musculaires cibles et la description des tâches dans l'ordre réalisé par le clinicien.

Le système Cara™, initialement conçu pour les studios de cinéma et de jeux vidéo, est un casque-caméra instrumenté pesant 1,2 kg, doté de sangles de fixation confortables et d'un dispositif contrôlable de quatre lumières embarquées pour ajuster les contrastes des marqueurs en fonction de la pigmentation de la peau (voir Figure 55).

Cinquante-trois participants (26 hommes ; âge 43 ± 14 ans) sans lésion ni antécédent de lésion du nerf facial ni de trouble d'origine neurologique ont participé à l'étude en réalisant deux évaluations 3D à une semaine d'intervalle ($n = 53$ participants, $n' = 106$ évaluations). Un évaluateur expérimenté a dessiné manuellement 27 marqueurs de 2 mm de diamètre à l'aide d'un crayon à maquillage. Une procédure standardisée de pose des marqueurs a été définie et

suivie pour identifier et positionner l'emplacement optimal de chaque marqueur en fonction du recrutement maximal des fibres musculaires cibles et de la morphologie du visage qui diffère d'un sujet à l'autre. Certains marqueurs avaient une position fixe par rapport à une structure anatomique (exemple des marqueurs en regard des commissures buccales) et d'autres marqueurs correspondaient à un rapport fixe entre deux points dont la distance pouvait varier entre deux patients, mais était toujours identique pour un même patient. Une fois les marqueurs dessinés sur le sujet, cinq photographies (face, trois-quarts droit et gauche et profils droit et gauche) étaient réalisées et archivées avec le modèle géométrique personnalisé dans le dossier comme supports pour la seconde évaluation. La figure 56 présente la position anatomique de chaque marqueur. Le tableau 5 illustre la position anatomique de chaque marqueur en lien avec la figure 56. La figure 57 présente le modèle géométrique d'un patient de l'étude.

Muscle cible	Description de la tâche attendue	Consignes orales	Marqueurs d'intérêt
Frontalis	Relever des sourcils	"Relevez le plus haut les sourcils"	F3, F4
Corrugator	Froncement des sourcils	"Froncez le plus loin possible les sourcils"	S1, S2
Procerus	Froncement de la racine du nez	"Ca sent très mauvais"	S1, S2
Orbicularis oculi	Fermeture forte des yeux	"Fermez fort les yeux"	Y1, Y2
Levator nasolabialis	Plissement du nez / détection d'une odeur forte	"Déterminez une odeur / froncez le nez / grognez"	N1, N2
Zygomaticus major	Large sourire bouche ouverte	"Souriez loin sur le côté"	B1,B2
Buccinator	Aspiration des joues	"Rentrez fort les joues"	J1, J2
Orbicularis oris	Gonflement des joues	"Gonflez fort les joues en empêchant l'air de sortir"	J1, J2
Depressor anguli oris	Commissures labiales vers le bas et l'extérieur	"Amenez le coin des lèvres vers le bas et l'extérieur"	B1, B2
Mentalis	Retournement de la lèvre inférieure	"Retournez le plus loin possible la lèvre inférieure"	M1, M2

Tableau 4. Muscles faciaux étudiés, tâches et marqueurs d'intérêt correspondant

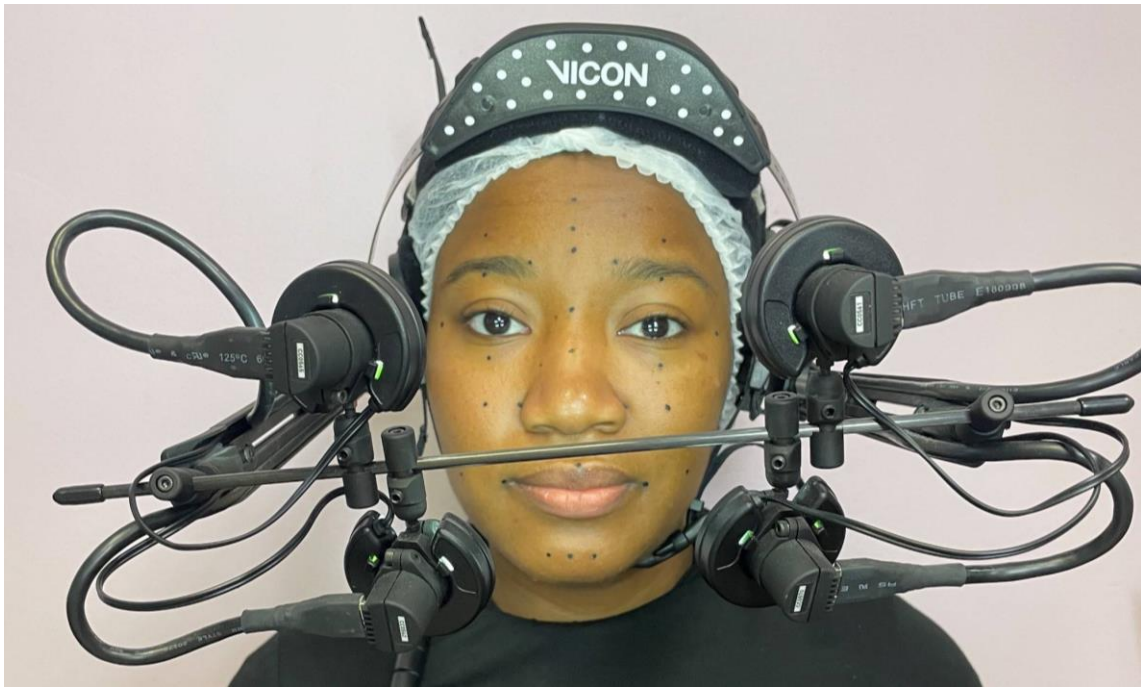


Figure 55. Sujet de la phase clinique de VISAGE équipé avec le casque Cara™(VICON).
Chaque caméra enregistre un cadran de la face. Les marqueurs situés sur le casque représentent le cadre de référence. Participante ayant donné son accord pour diffusion.

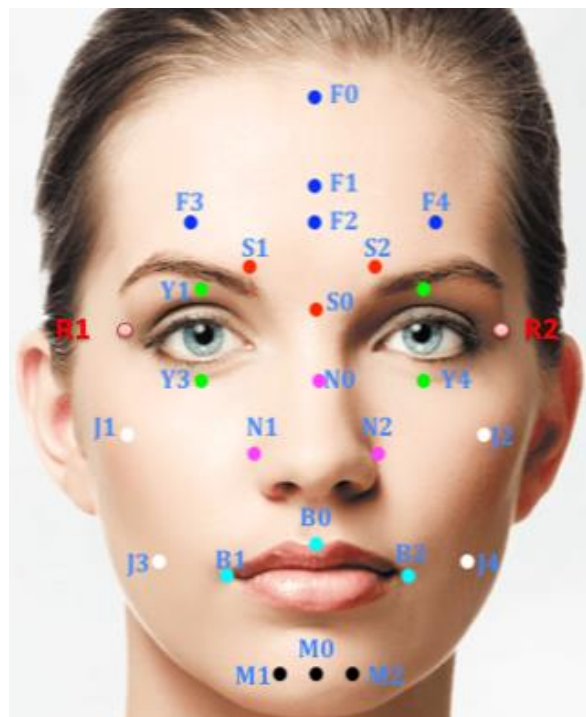


Figure 56. Modèle géométrique d'analyse des mouvements faciaux de l'étude VISAGE.
Visualisation des 27 marqueurs d'intérêt.



Figure 57. Photographie des marqueurs faciaux d'une patiente de la phase clinique de VISAGE.
Participante ayant donné son accord pour diffusion.

Marqueurs latéraux				Marqueurs centraux	
F3	Région frontale droite	F4	Région frontale gauche	F0	Ligné médiane - haut du front
S1	Coin supéro-interne du sourcil droit	S2	Coin supéro-interne du sourcil gauche	F1	Ligne médiane - moitié du front
Y1	Région orbiculaire externe supérieure droite	Y2	Région orbiculaire externe supérieure gauche	F2	Ligne médiane - bas du front
Y3	Région orbiculaire externe inférieure droite	Y4	Région orbiculaire externe inférieure gauche	S0	Ligne médiane - racine du nez
N1	Région périnasale droite	N2	Région périnasale gauche	N0	Ligne médiane - nasion
J1	Région jugale supérieure droite	J2	Région jugale supérieure gauche	B0	Centre du philtrum
J3	Région jugale inférieure droite	J4	Région jugale inférieure gauche	M0	Centre du menton
B1	Commissure labiale droite	B2	Commissure labiale gauche		
M1	Région mentonnière droite	M2	Région mentonnière gauche		

Tableau 5. Position et identification des marqueurs faciaux de l'étude.

Les sujets ont d'abord été entraînés à effectuer les 10 tâches devant un miroir pour obtenir un retour visuel. Ils ont ensuite été assis confortablement sur une chaise et le casque instrumenté a été placé sur leur tête et fixé à l'aide de trois sangles réglables (au niveau du vertex, en regard de l'occiput et en dessous du gnathion). L'intensité lumineuse des caméras a été réglée de

manière à obtenir des images claires de toutes les caméras et un contraste optimal entre les marqueurs et la peau du sujet (7/10), tout en évitant l'inconfort du sujet. En cas d'antécédent de migraine ou de maladie migraineuse, l'intensité lumineuse était réglée dans les valeurs basses (3/10).

2. Logiciels Cara™ de VICON

Le système Vicon Cara™ comprend deux logiciels : Caralive™ enregistre les captures en direct à l'aide de quatre caméras rétroéclairées, et Carapost™ suit tous les marqueurs et fournit leurs coordonnées dans un cadre de référence orthonormé dépendant du casque. Une étape de configuration consistait à la détection des marqueurs (taille, seuil de luminosité) et à vérifier leur suivi le long de la capture. La fréquence d'acquisition était de 50 Hz. Un plan de référence anatomique a été défini à partir de 3 points : 2 points situés à 2cm en latéral de chaque canthus externes (R1, R2) et un marqueur placé en regard du nasion (N0). L'origine du système de coordonnées était le centroïde des trois points. L'axe X était la ligne reliant R1 à R2. L'axe Y était la ligne perpendiculaire à l'axe X qui traversait l'origine du système de coordonnées dans le plan de référence. L'axe Z était la ligne perpendiculaire au plan de référence qui traversait l'origine du système de coordonnées. Toutes les coordonnées ont été converties en format texte.

3. Traitement des données

Un logiciel spécifique a été développé à l'aide de MATLAB par un spécialiste en analyse du signal (MG). Le développement de modules d'automatisation à différentes étapes du traitement des mouvements est décrit dans la Figure 58.

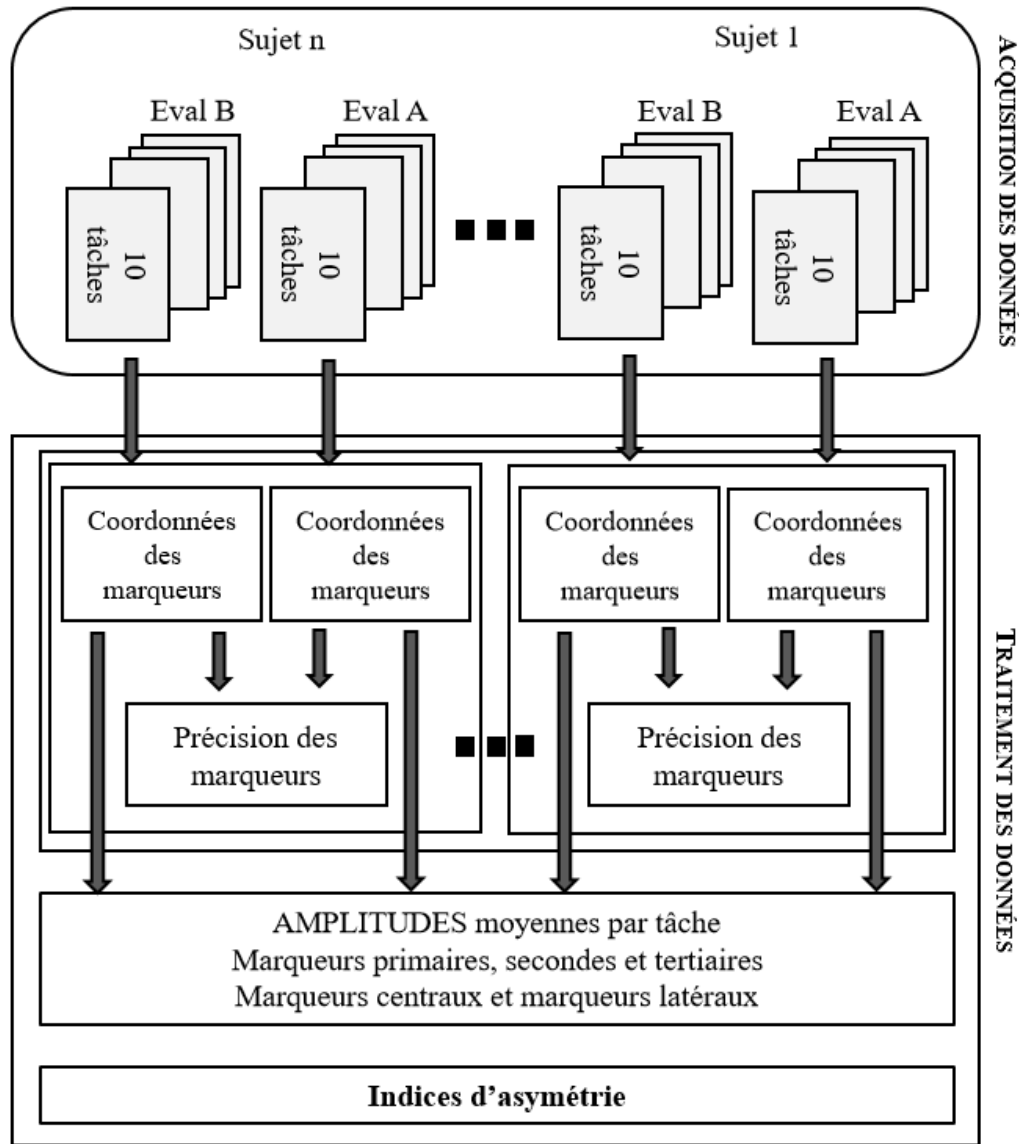


Figure 58. Architecture du traitement des données.

Le mouvement étant enregistré dans des cadres de référence mobiles, la première étape a consisté à définir un cadre de référence commun d'une évaluation à l'autre pour le même participant. Un changement du cadre initial proposé par le logiciel Carapost™ a été effectué. L'origine a été placée sur le marqueur N0, qui est le plus central, le moins mobile, et le plus facile à positionner (Frey *et al.*, 1994; Coulson, Croxson and Gilleard, 2000; Linstrom, 2002). L'axe X est resté inchangé (ligne reliant R1, N0 et R2), et l'axe Y a été positionné le long de la ligne N0-F0 pour définir le plan sagittal comme le plan (N0, y, z).

La deuxième étape a consisté à localiser le mouvement maximal sur les trois contractions à l'aide des marqueurs de référence pour chaque tâche et du repos optimal. En effet, il est apparu qu'après une contraction maximale, les marqueurs revenaient rarement à leur position initiale, rendant difficile la relaxation complète du groupe musculaire étudié. Certains enregistrements montraient un repos optimal au début, d'autres entre les contractions. Pour chaque enregistrement, une procédure d'automatisation a été développée pour calculer la moyenne du mouvement maximal et du repos optimal sur une période stable. Des vérifications visuelles et automatiques ont été effectuées pour détecter les valeurs aberrantes. Un vecteur de mouvement par marqueur a ensuite été calculé depuis la position de repos jusqu'à la position de mouvement maximal pour chaque tâche comme dans (1) où $\text{Mark}_{\text{Rest}i}$ et $\text{Mark}_{\text{Cont}i}$ représentent les coordonnées du marqueur i , respectivement, au repos et au maximum de la contraction.

$$\overrightarrow{\Delta\text{Mark}_i} = \overrightarrow{\text{Mark}_{\text{Cont}i} - \text{Mark}_{\text{Rest}i}} \quad (1)$$

Ce processus a été appliqué aux 10 tâches des 106 évaluations pour obtenir la moyenne et l'écart-type de toutes les coordonnées sphériques 3D. A partir de la gamme de valeurs modules obtenues, des marqueurs pertinents ont été déterminés et classés en trois niveaux, comme indiqué dans (2), où $\text{Mark}_{\text{prim}}^t$, $\text{Mark}_{\text{second}}^t$, et $\text{Mark}_{\text{tert}}^t$ représentent l'ensemble des marqueurs primaires, secondaires, et tertiaires pour une tâche t donnée.

$$\begin{aligned} \text{Mark}_i^t \in \text{Mark}_{\text{prim}}^t &\Leftrightarrow \frac{3}{4} M_{\text{max}}^t \leq \left\| \overrightarrow{\Delta\text{Mark}_i^t} \right\|, \\ \text{Mark}_i^t \in \text{Mark}_{\text{second}}^t &\Leftrightarrow \frac{1}{2} M_{\text{max}}^t \leq \left\| \overrightarrow{\Delta\text{Mark}_i^t} \right\| < \frac{3}{4} M_{\text{max}}^t, \\ \text{Mark}_i^t \in \text{Mark}_{\text{tert}}^t &\Leftrightarrow \frac{1}{4} M_{\text{max}}^t \leq \left\| \overrightarrow{\Delta\text{Mark}_i^t} \right\| < \frac{1}{2} M_{\text{max}}^t \\ \text{with } M_{\text{max}}^t &= \max_{i=1 \text{ to } 24} \left\| \overrightarrow{\Delta\text{Mark}_i^t} \right\|. \end{aligned} \quad (2)$$

La dernière étape a consisté à quantifier l'asymétrie faciale. Les paires de marqueurs ont été identifiées à partir de l'analyse précédente, définissant le degré de symétrie primaire, secondaire

et tertiaire par rapport à leur niveau pour chaque tâche. Deux indices d'asymétrie ont été calculés, l'un pour la position de repos, dénommé $IdAsym_{Rest}$ (3) et l'autre pour la position de contraction volontaire maximale appelé $IdAsym_{Cont}$ (4) où C représente le marqueur central associé aux paires de marqueurs, R le côté dominant/sain et NR l'autre côté.

$$IdAsym_{Rest} = \frac{\left\| \overrightarrow{Mark_C Mark_R} \right\| - \left\| \overrightarrow{Mark_C Mark_{NR}} \right\|}{\left\| \overrightarrow{Mark_C Mark_R} \right\| + \left\| \overrightarrow{Mark_C Mark_{NR}} \right\|} * 100 (\%),$$

(3)

$$IdAsym_{Cont} = \frac{\left\| \overrightarrow{\Delta Mark_R} \right\| - \left\| \overrightarrow{\Delta Mark_{NR}} \right\|}{\left\| \overrightarrow{\Delta Mark_R} \right\| + \left\| \overrightarrow{\Delta Mark_{NR}} \right\|} * 100 (\%).$$

(4)

Ces indices ont été calculés pour toutes les évaluations. La moyenne et l'écart-type ont fourni une gamme de valeurs pour une population de patients sans lésion du nerf facial, à partir de laquelle les indices d'asymétrie des patients atteints de parésie faciale pourront être comparés ultérieurement. Cependant, ces indices peuvent ne pas être suffisants pour évaluer les progrès de la récupération des mouvements du visage. En effet, une parésie faciale périphérique unilatérale peut entraîner, au stade chronique mais aussi au stade aigu, une déformation dans laquelle les marqueurs centraux ne se situent plus sur l'axe Y, et le mouvement des paires de marqueurs du côté parétique devient inversé par rapport à l'axe Y aux mouvements normaux attendus. Certains patients présentent une flaccidité de l'hémiface atteinte avec une hyperactivation du visage, le plus souvent au stade aigu, et au stade chronique, la majorité des patients développent des réactions d'hyperactivité musculaire telles que les contractures ou les syncinésies qui perturbent la ligne de symétrie théorique médiane du visage en « attirant » l'hémiface vers le côté parétique. Un autre objectif important était en effet de développer des indices pouvant être adaptés et transférés chez les patients atteints de parésie faciale périphérique. Nous avons proposé un nouvel indice d'asymétrie appelé *IdPro*, basé sur l'analyse dite de Procruste (Bookstein, 1997) à l'aide des marqueurs centraux, primaires,

secondaires et tertiaires de chaque tâche, le pourcentage de déformation de forme (volume en 3D) entre le côté sain et le côté parétique, appelée indice de Procruste, quantifiant et reflétant leur degré d'asymétrie.

C. Résultats

1. Précision du positionnement des marqueurs

Le tableau 6 montre les différences test-retest de modules en millimètres quant au positionnement des marqueurs entre deux évaluations réalisées à une semaine d'intervalle pour chaque marqueur et chaque sujet. Les diamètres des marqueurs sont estimés à 2 mm Deux marqueurs ont été supprimés pour le calcul de la moyenne (0,16 %).

Marqueurs centraux		Marqueurs droits		Marqueurs gauches	
F0	1,63 ± 1,48	F1	2,51 ± 3,16	F2	2,38 ± 3,26
S0	1,05 ± 0,47	F3	3,38 ± 1,39	F4	2,67 ± 1,24
B0	2,25 ± 1,19	S1	2,08 ± 1,10	S2	2,04 ± 1,36
M0	3,49 ± 1,83	N1	2,48 ± 1,12	N2	2,39 ± 1, 13
		Y1	2,71 ± 1,22	Y2	2,31 ± 1,07
		Y3	2,25 ± 0,94	Y4	2,41 ± 1,18
		J1	3,30 ± 1,07	J2	2,79 ± 1,43
		J3	3,66 ± 1,83	J4	3,90 ± 2,10
		B1	2,94 ± 1 21	B2	3,20 ± 1,84
		M1	3,50 ± 1,73	M2	3,64 ± 1,80

Tableau 6. Précision du positionnement des marqueurs entre deux évaluations à une semaine d'intervalle. Moyenne ± écart-types des modules (mm), n=53.

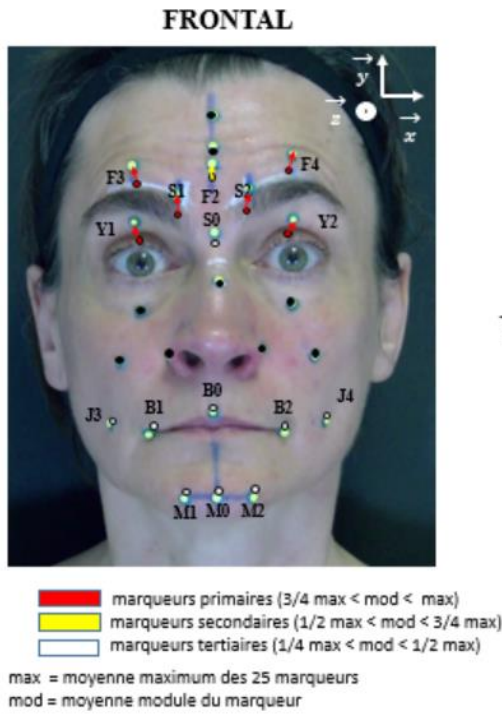
2. Amplitude de mouvement des marqueurs

Pour chaque tâche, une analyse vidéo a posteriori a été réalisée pour détecter les mouvements qui n'auraient pas été bien exécutés. 0,6 % des tâches (6 tâches sur 1006) ont été supprimées parce que le participant était incapable de suivre les instructions (apraxie faciale). Cela concernait principalement la tâche de contraction du muscle depressor anguli oris (DAO), qui figure parmi les muscles faciaux les plus apraxiques chez le sujet sain (Baude *et al.*, 2018). Des syncinésies physiologiques d'autres muscles faciaux ont été observées pendant les tâches

demandées, entraînant le déplacement de marqueurs non primaires. L'emplacement et l'intensité des syncinésies variaient en fonction de la tâche, la plus évidente étant lors de l'activation du corrugator avec la face inférieure tendue (3% de marqueurs supprimés) et pour la tâche du depressor anguli oris entraînant une syncinésie du corrugator (6% de marqueurs supprimés). L'élévation du sourcil correspondant au frontalis était la tâche qui était la mieux réalisée (0,05 % de marqueurs supprimés). La figure 59 représente les résultats de la tâche pour chacun des dix mouvements étudiés. Elle montre le déplacement des marqueurs dans le cadre de référence choisi. Les tableaux 7 à 9 présentent la base de données construite pour chaque tâche en fonction de la partie du visage concernée (partie supérieure, partie moyenne, et partie inférieure). La moyenne et l'écart-type sont donnés pour les 106 évaluations pour tenir compte de la variation intra-sujet d'une évaluation à l'autre, avec une moyenne de 7% pour toutes les tâches.

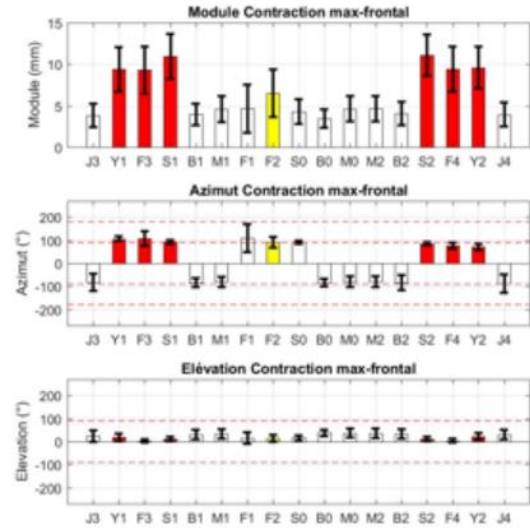
La durée totale de consultation d'évaluation 3D est estimée à 45 minutes, dont 15 minutes de mise en place des marqueurs et 20 minutes d'enregistrement des mouvements.

A.

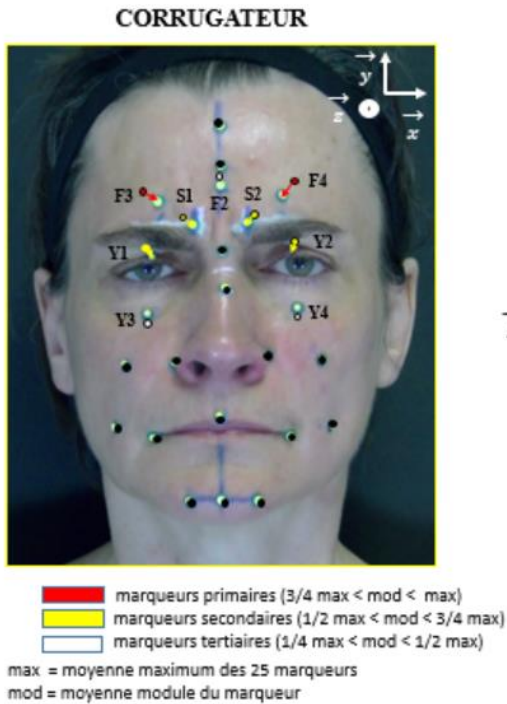


Moyennes et écarts-types 68 évaluations

$$\text{Module} = |\overline{OM}| = \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + z_M^2}$$

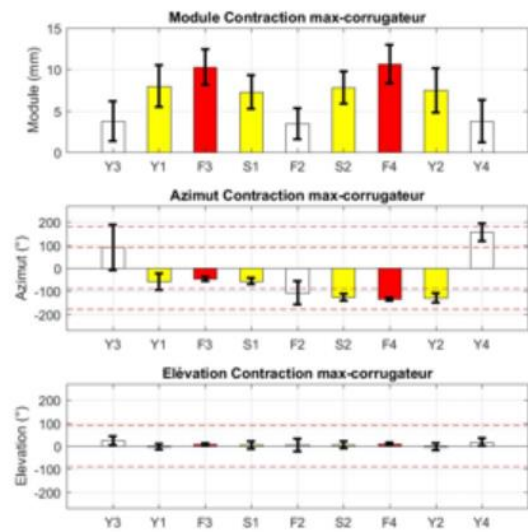


B.



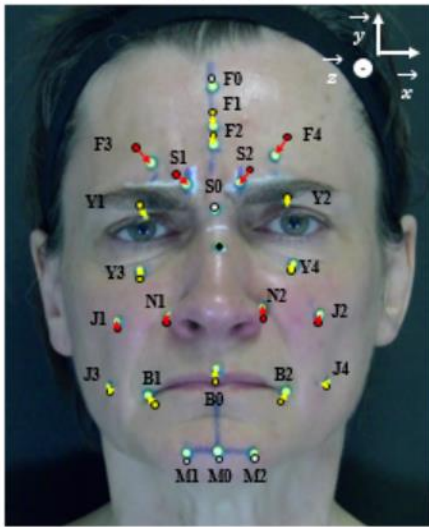
Moyennes et écarts-types 68 évaluations

$$\text{Module} = |\overline{OM}| = \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + z_M^2}$$



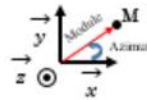
C.

PRO CERUS

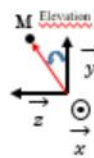


■ marqueurs primaires (3/4 max < mod < max)
■ marqueurs secondaires (1/2 max < mod < 3/4 max)
 marqueurs tertiaires (1/4 max < mod < 1/2 max)
 max = moyenne maximum des 25 marqueurs
 mod = moyenne module du marqueur

Plan frontal

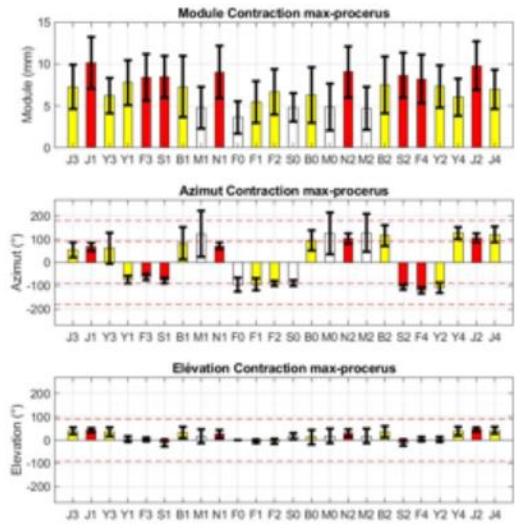


Plan sagittal



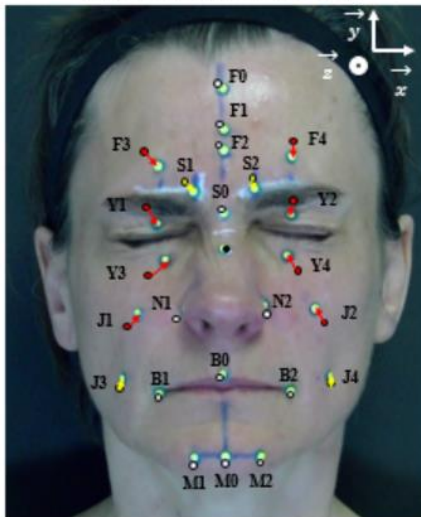
Moyennes et écarts-types 68 évaluations

$$\text{Module} = |OM| = \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + z_M^2}$$



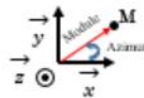
D.

ORBICULARIS OCULI

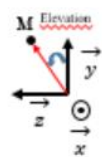


■ marqueurs primaires (3/4 max < mod < max)
■ marqueurs secondaires (1/2 max < mod < 3/4 max)
 marqueurs tertiaires (1/4 max < mod < 1/2 max)
 max = moyenne maximum des 25 marqueurs
 mod = moyenne module du marqueur

Plan frontal

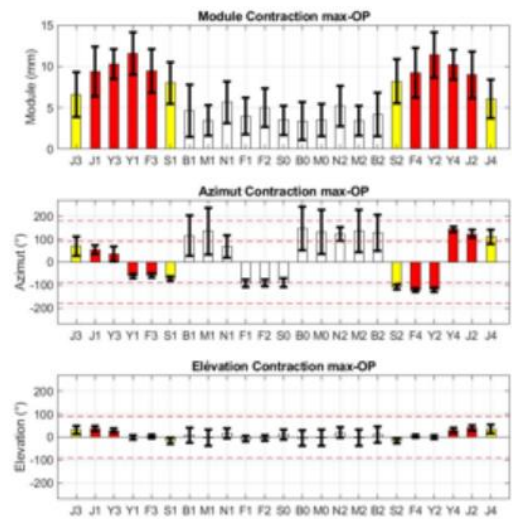


Plan sagittal



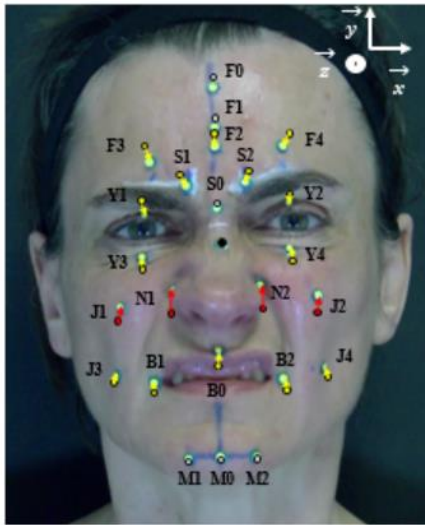
Moyennes et écarts-types 68 évaluations

$$\text{Module} = |OM| = \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + z_M^2}$$



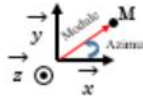
E.

RELEVEUR NASO-LABIAL

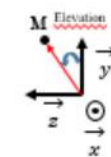


■ marqueurs primaires (3/4 max < mod < max)
■ marqueurs secondaires (1/2 max < mod < 3/4 max)
■ marqueurs tertiaires (1/4 max < mod < 1/2 max)
 max = moyenne maximum des 25 marqueurs
 mod = moyenne module du marqueur

Plan frontal

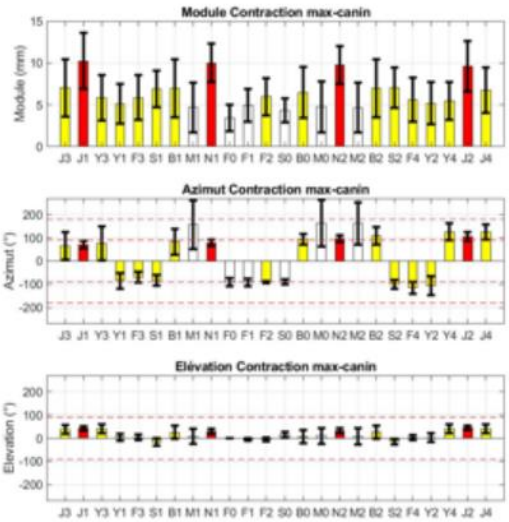


Plan sagittal



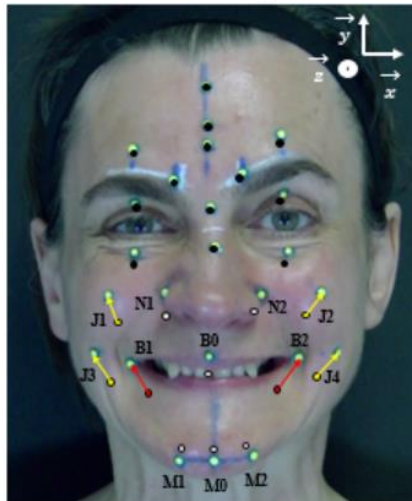
Moyennes et écarts-types 68 évaluations

$$\text{Module} = |\overline{OM}| = \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + z_M^2}$$



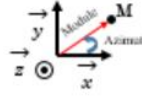
F.

ZYGOMATIQUES

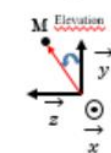


■ marqueurs primaires (3/4 max < mod < max)
■ marqueurs secondaires (1/2 max < mod < 3/4 max)
■ marqueurs tertiaires (1/4 max < mod < 1/2 max)
 max = moyenne maximum des 25 marqueurs
 mod = moyenne module du marqueur

Plan frontal

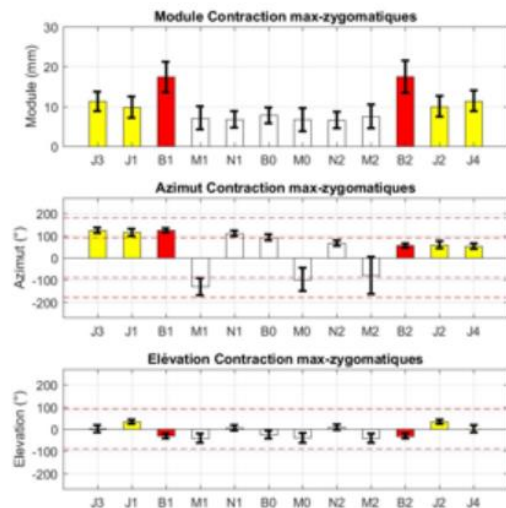


Plan sagittal



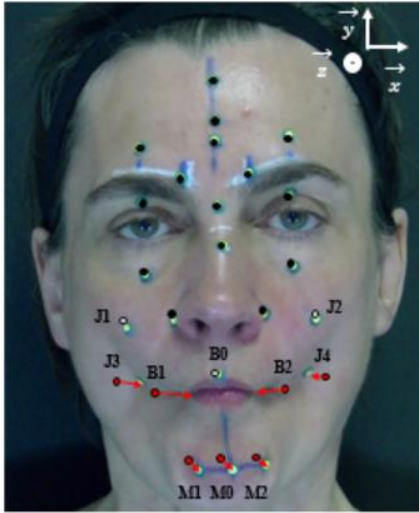
Moyennes et écarts-types 68 évaluations

$$\text{Module} = |\overline{OM}| = \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + z_M^2}$$



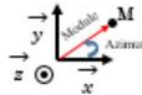
G.

BUCCINATEUR

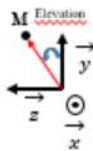


- marqueurs primaires ($3/4 \text{ max} < \text{mod} < \text{max}$)
 - marqueurs secondaires ($1/2 \text{ max} < \text{mod} < 3/4 \text{ max}$)
 - marqueurs tertiaires ($1/4 \text{ max} < \text{mod} < 1/2 \text{ max}$)
- max = moyenne maximum des 25 marqueurs
mod = moyenne module du marqueur

Plan frontal

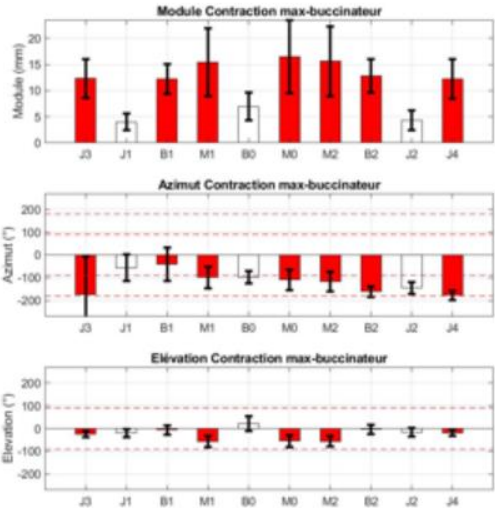


Plan sagittal



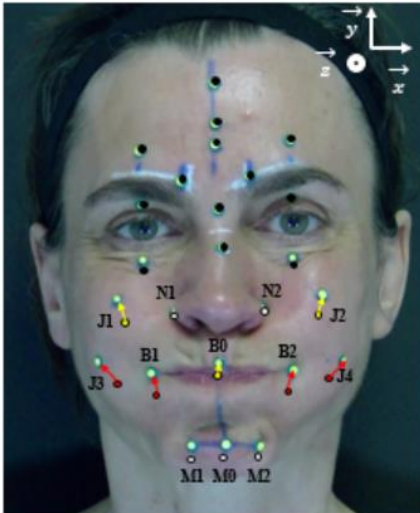
Moyennes et écarts-types 68 évaluations

$$\text{Module} = |OM| = \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + z_M^2}$$



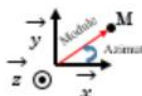
H.

ORBICULARIS ORIS



- marqueurs primaires ($3/4 \text{ max} < \text{mod} < \text{max}$)
 - marqueurs secondaires ($1/2 \text{ max} < \text{mod} < 3/4 \text{ max}$)
 - marqueurs tertiaires ($1/4 \text{ max} < \text{mod} < 1/2 \text{ max}$)
- max = moyenne maximum des 25 marqueurs
mod = moyenne module du marqueur

Plan frontal

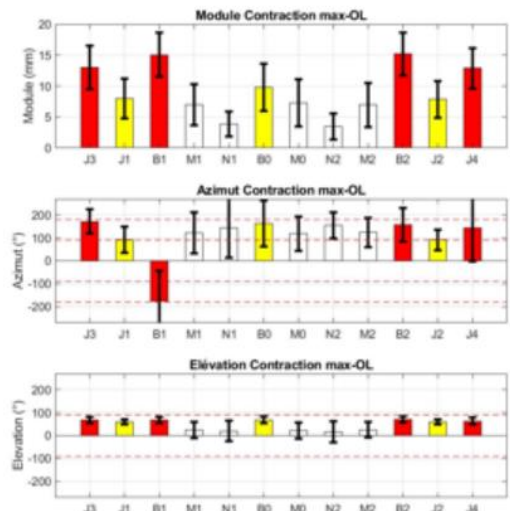


Plan sagittal

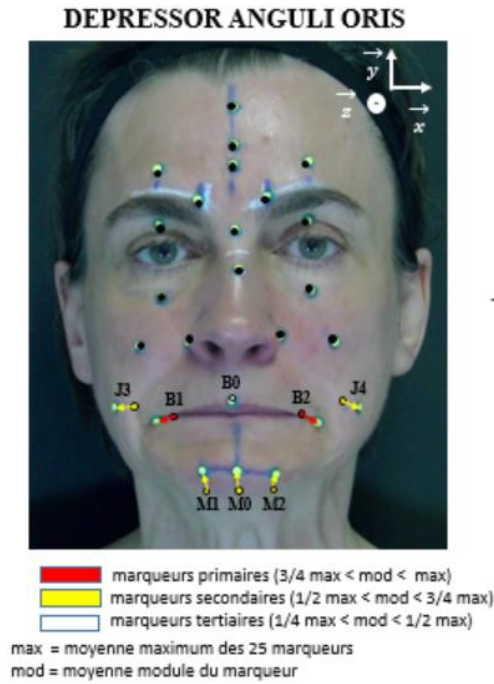


Moyennes et écarts-types 68 évaluations

$$\text{Module} = |OM| = \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + z_M^2}$$

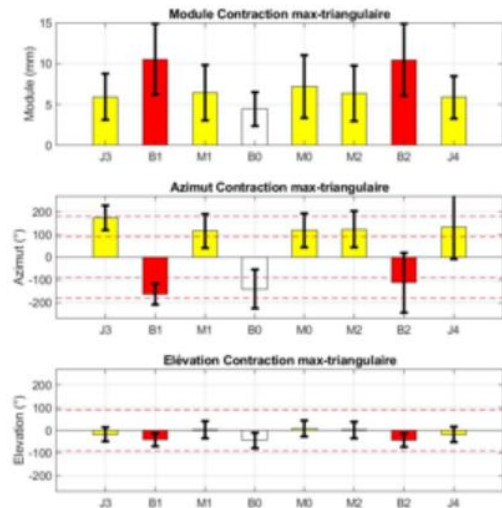


I.

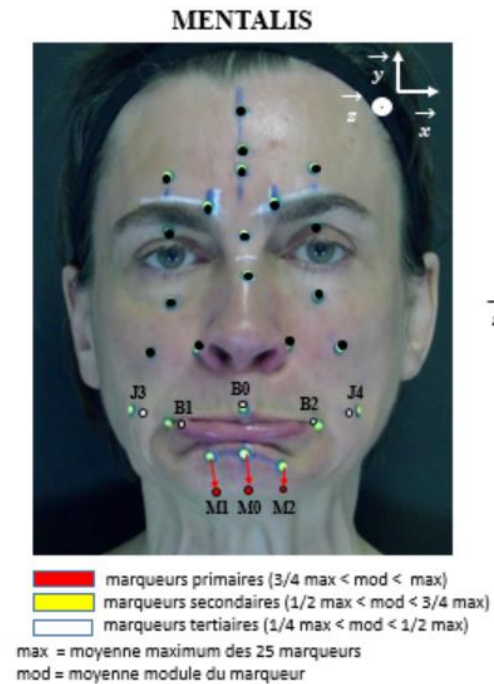


Moyennes et écarts-types 68 évaluations

$$\text{Module} = |\overline{OM}| = \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + z_M^2}$$



J.



Moyennes et écarts-types 68 évaluations

$$\text{Module} = |\overline{OM}| = \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + z_M^2}$$

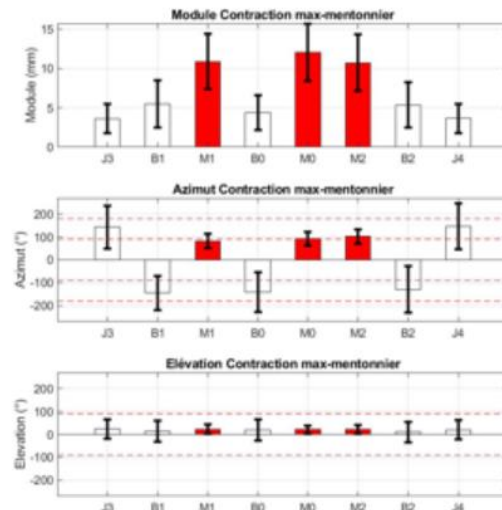


Figure 59. Analyse des mouvements des 10 muscles de l'étude. A. Frontalis, B. Corrugator, C. Procerus, D. Orbicularis oculi, E. Levator nasolabialis, F. Zygomaticus major, G. Buccinator, H. Orbicularis oris, I. Depressor anguli oris, J. Mentalis. Les barplots représentent la moyenne \pm écart-types des modules (mm), azimut ($^{\circ}$) et élévation ($^{\circ}$) pour les marqueurs primaires (rouge) secondaires (jaune) et tertiaires (blanc) déterminés tels que dans les équations (2) en coordonnées sphériques, $n'=106$.

Frontalis			Corrugator		
Marqueurs primaires	Marqueurs secondaires	Marqueurs tertiaires	Marqueurs primaires	Marqueurs secondaires	Marqueurs tertiaires
F3 8,60 ± 2,71	F2 6,15 ± 2,53	F1 4,19 ± 2,47	F3 9,73 ± 2,16	Y3 3,45 ± 2,20	
F4 8,73 ± 2,65		S0 4,32 ± 1,72	F4 9,68 ± 2,61	Y4 3,43 ± 2,28	
S1 10,25 ± 2,74		B0 3,53 ± 1,11	S1 7,10 ± 1,83	F2 6,15 ± 2,53	
S2 10,40 ± 2,54		M0 4,72 ± 1,58	S2 7,36 ± 2,05		
Y1 9,22 ± 2,54		B1 4,13 ± 1,32	Y1 7,96 ± 2,39		
Y2 9,45 ± 2,59		B2 4,14 ± 1,38	Y2 7,37 ± 2,56		
		M1 4,68 ± 1,58			
		M2 4,73 ± 1,59			
		J3 4,01 ± 1,39			
		J4 3,96 ± 1,46			

Orbicularis oculi		
Marqueurs primaires	Marqueurs secondaires	Marqueurs tertiaires
F3 9,45 ± 2,66	S1 8,01 ± 2,53	F1 3,98 ± 2,21
F4 9,22 ± 3,01	S2 8,20 ± 2,66	F2 5,03 ± 2,35
J1 9,39 ± 2,99	J3 6,61 ± 2,71	S0 3,47 ± 1,76
J2 8,98 ± 2,80	J4 6,06 ± 2,32	B0 3,36 ± 2,30
Y1 11,57 ± 2,55		M0 3,52 ± 1,94
Y2 11,40 ± 2,77		N1 5,67 ± 2,52
Y3 10,30 ± 1,83		N2 5,21 ± 2,47
Y3 10,22 ± 1,83		B1 4,65 ± 3,18
		B2 4,19 ± 2,65
		M1 3,44 ± 1,85
		M2 3,42 ± 1,78

Tableau 7. Base de données normatives 3D de la partie supérieure de la face.
Présentation de la moyenne ±écart-types des modules en mm, n'=106.

Procerus			Levator nasolabialis		
Marqueurs primaires	Marqueurs secondaires	Marqueurs tertiaires	Marqueurs primaires	Marqueurs secondaires	Marqueurs tertiaires
F3 8,43 ± 2,79	F1 5,46 ± 2,47	F0 3,62 ± 1,92	N1 10,01 ± 2,31	F2 5,97 ± 2,24	F0 3,45 ± 1,59
F4 8,19 ± 2,91	F2 6,66 ± 2,70	S0 4,81 ± 1,70	N2 9,74 ± 2,26	B0 6,47 ± 3,06	F1 4,94 ± 1,96
S1 8,49 ± 2,52	B0 6,28 ± 3,31	M0 4,84 ± 2,77	J1 10,24 ± 3,36	F3 5,88 ± 2,66	S0 4,34 ± 1,41
S2 8,66 ± 2,68	B1 7,30 ± 3,65	M1 4,75 ± 2,48	J2 9,60 ± 3,01	F4 5,63 ± 2,62	N1 4,75 ± 3,03
N1 9,04 ± 3,12	B2 7,50 ± 3,41	M2 4,70 ± 2,59		S1 6,90 ± 2,19	N1 4,68 ± 2,99
N2 9,05 ± 3,05	J3 7,26 ± 2,63			S2 7,05 ± 2,43	N1 4,64 ± 2,97
J1 10,14 ± 3,12	J4 7,00 ± 2,34			B1 7,00 ± 3,47	Y1 5,12 ± 2,39
J2 9,80 ± 2,94	Y1 7,78 ± 2,66			B2 6,99 ± 3,46	Y2 5,19 ± 2,53
	Y2 7,32 ± 2,53			J3 7,01 ± 3,41	
	Y3 6,23 ± 2,12			J4 6,73 ± 2,73	
	Y4 6,05 ± 2,22			Y3 5,84 ± 2,70	
				Y4 5,47 ± 2,27	

Tableau 8. Base de données normatives 3D de la partie moyenne de la face.
Présentation de la moyenne ±écart-types des modules en mm, n'=106.

Zygomatikus						Buccinator					
Marqueurs primaires		Marqueurs secondaires		Marqueurs tertiaires		Marqueurs primaires		Marqueurs secondaires		Marqueurs tertiaires	
B1	17,53 ± 4,17	J1	9,91 ± 2,79	B0	7,89 ± 2,11	M0	16,53 ± 6,99			B0	6,95 ± 2,68
B2	17,64 ± 4,39	J3	11,43 ± 2,59	M0	6,35 ± 2,99	B1	12,24 ± 2,88			J1	4,00 ± 1,61
		J2	10,15 ± 2,91	N1	6,74 ± 2,21	B2	12,80 ± 3,18			J2	4,31 ± 1,91
		J4	11,56 ± 2,73	N2	6,67 ± 2,26	M1	15,42 ± 6,47				
				M1	6,62 ± 2,90	M2	15,61 ± 6,69				
				M2	6,88 ± 2,91	J3	12,31 ± 3,75				
				Y3	5,01 ± 1,89	J4	12,22 ± 3,78				
				Y4	5,01 ± 1,86						

Orbicularis oris						Depressor anguli oris					
Marqueurs primaires		Marqueurs secondaires		Marqueurs tertiaires		Marqueurs primaires		Marqueurs secondaires		Marqueurs tertiaires	
B1	15,05 ± 3,60	B0	9,80 ± 3,78	M0	7,28 ± 3,79	B1	10,54 ± 4,34	M0	7,18 ± 3,84	B0	4,46 ± 2,06
B2	15,19 ± 3,45	J1	7,99 ± 3,22	N1	3,83 ± 2,02	B2	10,46 ± 4,42	J3	5,95 ± 2,80		
J3	13,02 ± 3,54	J2	7,85 ± 2,97	N2	3,45 ± 2,09			J4	5,90 ± 2,59		
J4	12,90 ± 3,28			M1	6,98 ± 3,35			M1	6,43 ± 3,39		
				M2	6,96 ± 3,55			M2	6,39 ± 3,38		

Mentalis					
Marqueurs primaires		Marqueurs secondaires		Marqueurs tertiaires	
M0	12,05 ± 3,64			B0	4,38 ± 2,20
M1	10,86 ± 3,49			B1	5,49 ± 2,97
M2	10,69 ± 3,60			B2	5,34 ± 2,89
				J3	3,62 ± 1,85
				J4	3,65 ± 1,86

Tableau 9. Base de données normatives 3D de la partie inférieure de la face.
Présentation de la moyenne ±écart-types des modules en mm, n'=106.

3. Indices d'asymétrie

La figure 60 représente les indices d'asymétrie calculés au repos à partir des équations (3) à (4) pour chaque paire de marqueurs. Les marqueurs centraux associés aux paires de marqueurs F, S, B et M sont respectivement F0, S0, B0 et M0, et N0 pour tous les autres. La figure 61 présente les indices d'asymétrie calculés à partir des équations (3) à (4) au repos et à la contraction maximale pour les marqueurs d'intérêt de chaque tâche (voir tableau 3). Dans la figure 62, les indices de Procruste au repos et à la contraction maximale sont décrits pour chaque tâche. Les marqueurs primaires, secondaires et tertiaires, latéraux et centraux, ont été collectés et la distance de Procruste a été calculée pour correspondre à l'ensemble des marqueurs des côtés dominant et non dominant. L'indice de Procruste au repos qui prend en compte l'ensemble des marqueurs de chaque côté de la face est de $2,47 \pm 1,16$ %. La figure 63 illustre un exemple

de distance de Procruste pour une patiente présentant une parésie faciale périphérique gauche (à trois ans d'évolution) pendant la tâche du sourire (muscle zygomaticus).

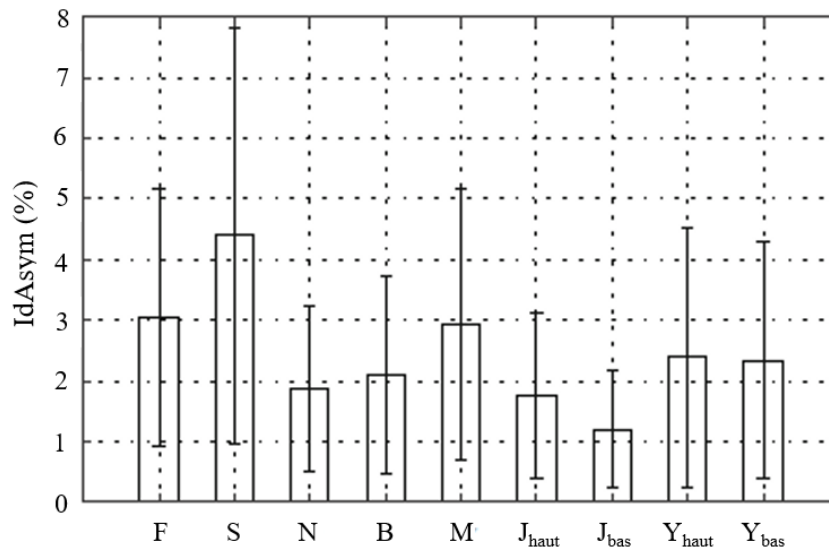


Figure 60. Indices d'asymétrie au repos pour chaque paire de marqueurs (voir Tableau 4).
Données présentées sous la forme moyenne \pm écart-type (%), $n'=106$

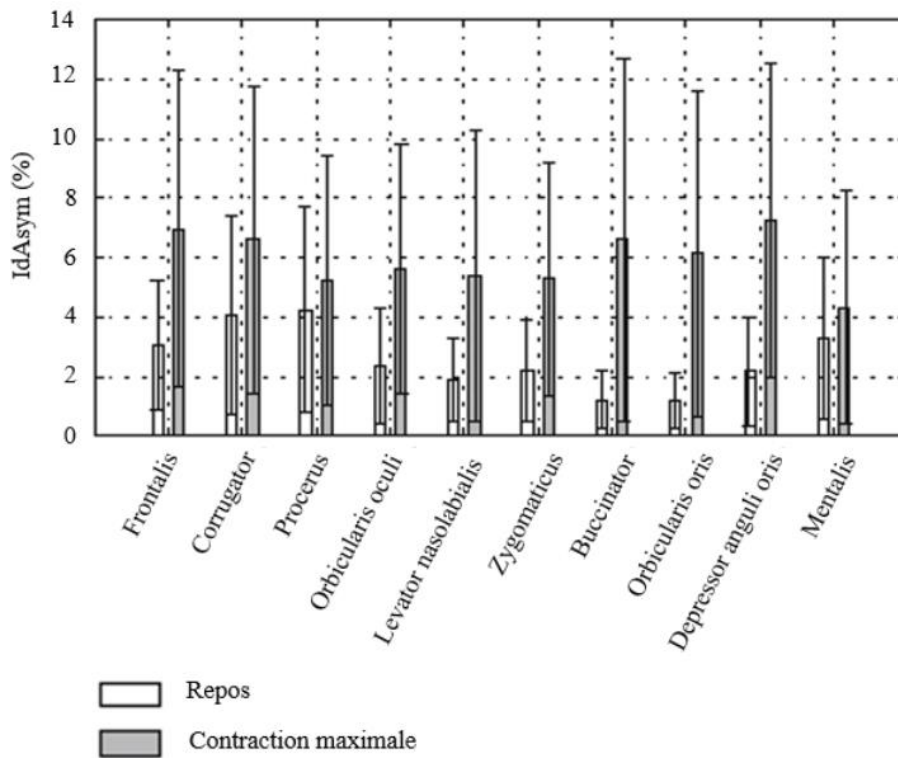


Figure 61. Indices d'asymétrie au repos et en contraction maximale pour chaque tâche.

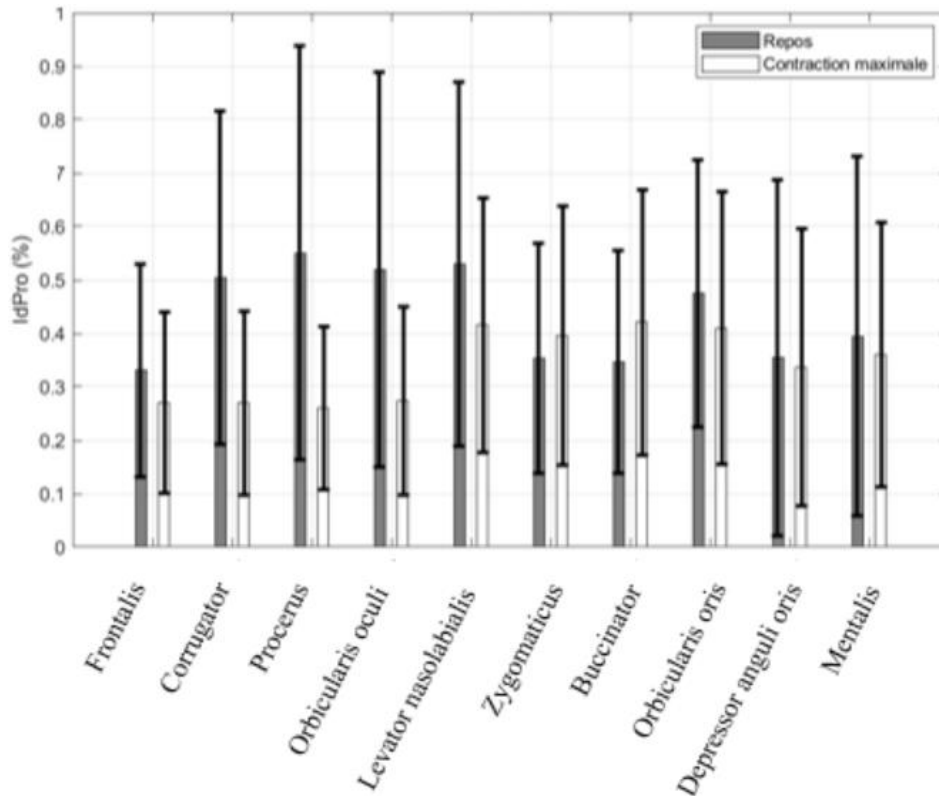


Figure 62. Indices de Procruste au repos et en contraction maximale pour chaque tâche.
Données présentées avec la moyenne \pm écart-type (mm) $n'=106$

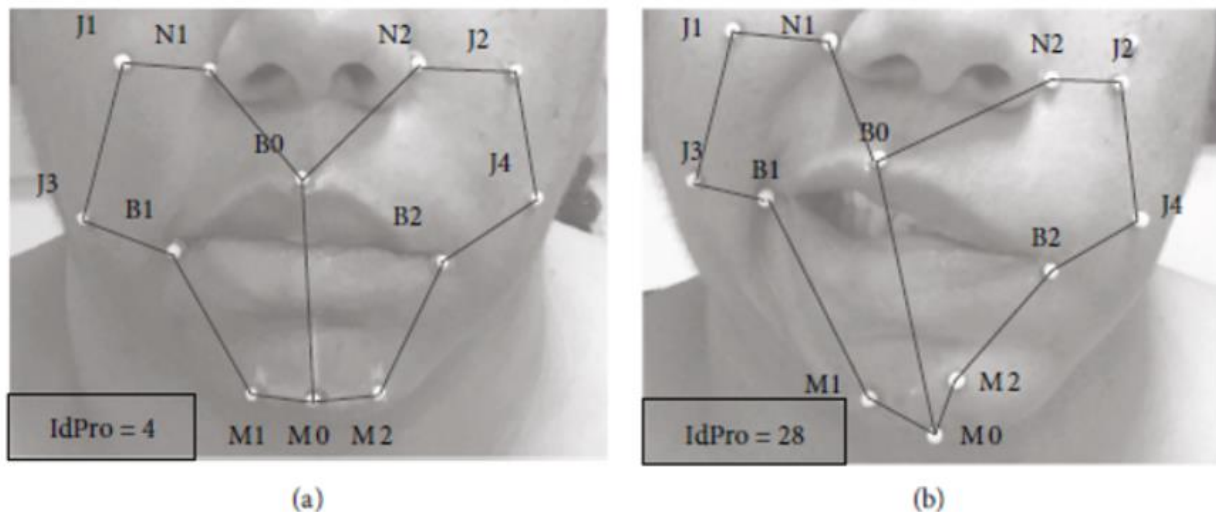


Figure 63. Exemple d'indices de Procruste (%) chez une patiente présentant une parésie faciale périphérique gauche. (a) au repos ; (b) au sourire d'amplitude maximale.

D. Discussion

1. Analyse de l'amplitude de mouvement

Ce travail fournit une base de données de 10 déplacements musculaires du repos à la contraction volontaire maximale en termes d'amplitude de mouvement et d'orientation. Les amplitudes de mouvement de toutes les paires de marqueurs pour chaque tâche (voir tableaux 7-9) sont cohérentes avec les observations cliniques (Zhao *et al.*, 2020). Les écarts-types sont liés à la diversité des performances de mouvement entre les participants. La figure 59 donne un exemple de la façon dont ces données seront utilisées en clinique. Elle montre l'identité et l'intensité de l'implication des marqueurs en fonction du mouvement volontaire maximal considéré – selon les équations (2) – dans une population exempte de PF. Les marqueurs centraux sont impliqués de multiples façons. M0 et B0 sont les plus mobiles pour les tâches de la face inférieure. Pour la face médiane, les tâches liées au procerus et au levator nasolabialis impliquent le déplacement de la tête. Ces tâches reflètent la mobilité globale du visage. Il convient de noter que les tâches de la partie supérieure du visage impliquent des syncinésies des muscles faciaux inférieurs, tandis que les tâches inférieures sont exécutées sans trop de syncinésies des muscles supérieurs du visage. Cela suggère qu'il est « plus facile » d'effectuer les tâches de la partie inférieure du visage car c'est la partie la plus mobile et la plus active de la face : un maximum de 17,6 mm d'amplitude de mouvement pour les marqueurs B pour le sourire (muscle zygomaticus) et de 8,6 mm pour les marqueurs F dans la tâche du relever de sourcil (muscles frontalis). Gonfler et rentrer les joues impliquent tous les muscles faciaux inférieurs et entraînent les déplacements 3D les plus importants. Rentrer les joues (buccinateur) est difficile à réaliser sans pincer les lèvres, ce qui nous a conduit à utiliser les marqueurs mentonniers (M) à devenir les principaux marqueurs pour cette tâche, contrairement à la tâche de gonflement de joues (orbicularis oris). Peu de données numériques issues de la littérature nous ont permis de réaliser une comparaison. Certaines études présentent des données dans le

plan frontal uniquement (Linstrom, 2002; Jorge Jr. *et al.*, 2012; Vimercati *et al.*, 2012) ou pour des caractéristiques vectorielles spécifiques (Hontanilla and Aubá, 2008) ou séparément pour chaque participant (Frey *et al.*, 1994; Jorge Jr. *et al.*, 2012) ou des résultats après mise à l'échelle de chaque visage de chaque à une taille moyenne de visage (Trotman, Faraway and Hadlock, 2020). Coulson *et al.* Présentent les amplitudes de mouvement des principaux marqueurs pour les zygomaticus, frontalis, levator nasolabialis et les tâches de l'orbicularis oculi (Coulson, Croxson and Gilleard, 2000). Leur ordre de grandeur pour la moyenne est globalement inférieur à nos résultats (de 2 mm pour la tâche du levator nasolabialis à 4 mm pour la tâche du zygomaticus). Cela peut être dû aux différents types et tailles de marqueurs (7 mm contre 2 mm) et à la précision du positionnement. Quoi qu'il en soit, les écarts-types de toutes les données comparables sont similaires (de 2,5 à 4,2 mm) pour un nombre similaire de participants (42 contre 53). Les mêmes observations peuvent être faites avec l'étude de Sforza *et al.* A partir de leurs amplitudes de mouvement rapportées pour les tâches du sourire (zygomaticus) et de fermetures oculaires (orbicularis oculi) (Sforza *et al.*, 2010). Dans une certaine mesure, l'appareil conçu par Frey *et al.* donne des résultats similaires avec le calcul de la troisième dimension à partir de deux analyses 2D (Giovanoli *et al.*, 2003). Le présent travail va plus loin que les études précédentes, car il présente la mobilité du visage par le biais d'une analyse 3D de 10 groupes musculaires faciaux. En plus des marqueurs d'intérêt, tous les mouvements faciaux associés ont été étudiés.

2. Analyse de la symétrie

La symétrie du visage a été quantifiée par le biais d'indices d'asymétrie tels qu'ils sont utilisés dans les échelles cliniques (Coulson *et al.*, 2005). La figure 60 montre les paires de marqueurs d'asymétrie au repos. Le visage au repos est généralement symétrique et les écarts-types reflètent les différences entre les participants. Les valeurs les plus élevées ont été trouvées pour les paires de marqueurs pour lesquels N0 n'était pas la référence centrale ($F : 3,0 \pm 2,1\%$,

S : $4,4 \pm 3,4\%$, M : $2,9 \pm 2,3\%$). Pour les tâches de mouvement volontaire, les indices ont présenté l'asymétrie pour les paires de marqueurs d'intérêt dans la figure 61. Les indices d'asymétrie *IdAsym* à la contraction maximale sont deux fois plus élevés qu'au repos ($5,9 \pm 0,8\%$ contre $2,6 \pm 0,9\%$). Ceci reflète l'asymétrie naturelle présente lors des contractions faciales humaines physiologiques. Les différences entre les indices d'asymétrie au repos et à la contraction varient de 1 % pour les tâches des procerus et mentalis, à 5 % pour les tâches des depressor anguli oris, buccinator et orbicularis oris. Les mouvements de la joue impliquent une grande mobilité 3D des tissus mous et la tâche du depressor anguli oris est la plus difficile à réaliser. Les écart-types sont représentatifs de l'hétérogénéité de la population. Notre définition des indices d'asymétrie est similaire à celle proposée par Sforza et al (Sforza *et al.*, 2010) bien que ces auteurs aient proposé une valeur moyenne pour un groupe de marqueurs pour chaque tâche. Pour la tâche du zygomaticus, la valeur moyenne était de 5,57%, similaire à nos résultats (5,12%).

Au vu de ces résultats, un seuil *IdAsym* de 10% semble être un indicateur de symétrie faciale anormale. Ainsi, ces indices proposent des valeurs objectives sur l'asymétrie localisée, pouvant être comparées aux échelles cliniques.

Les traditionnelles techniques en miroir ne sont pas adaptées à notre objectif final ; chez le patient PFP, l'hémiface saine est influencée par les mouvements de l'hémiface parétique, qu'il s'agisse de mouvements volontaires ou spontanés (VanSwearingen, Cohn and Bajaj-Luthra, 1999; Trotman, Faraway and Hadlock, 2020). Les réactions d'hyperactivité musculaire que sont les syncinésies, les spasmes (Bajaj-Luthra *et al.*, 1998) ou encore la contracture faciale, ainsi que la composante parétique de la PFP, nécessitent le développement d'indices d'asymétrie adaptés et spécifiques. Nous proposons un indice Procruste calculé au repos ainsi pour chaque tâche. Cette méthode est bien géométrique (Bookstein, 1997) et a été développée pour l'évaluation de la symétrie bilatérale (Mardia, Bookstein and Moreton, 2000) en comparant la

configuration originale avec une configuration miroir. Des travaux antérieurs ont proposé un indice d'asymétrie axé sur le bas du visage (Hood *et al.*, 2003; Khambay *et al.*, 2019) ou sur l'ensemble du visage (Trotman, Faraway and Hadlock, 2020). Nous proposons un indice de Procuste IdPro sans aucune projection d'un côté à l'autre, mais en comparant des formes spécifiques en 3D, prenant en compte le mouvement des marqueurs positionnés sur la ligne dite médiane du visage. La figure 62 présente des données pour chaque tâche en tenant compte de tous les marqueurs primaires, secondaires et tertiaires de chaque côté. Toutes les valeurs moyennes sont comprises entre 1,61 et 4,65 mm. La différence entre le repos et la contraction maximale de cet indice est deux fois moindre que celle de l'indice local précédent (26% contre 56%) avec une SD similaire. L'indice IdPro est plus représentatif de l'asymétrie faciale car il compare des volumes, alors que l'indice IdAsym compare des modules vectoriels. Au vu de ces résultats, le seuil IdPro de 6 % semble être un indicateur de symétrie faciale anormale. La syncinésie faciale peut également être quantifiée par une étude de Procruste analogue à celle proposée sur les échelles de cliniques (Coulson *et al.*, 2005).

Enfin, la figure 63 illustre la pertinence de cet indice pour définir un sourire dit pathologique. L'indice IdPro au repos (4%) est en accord avec la valeur moyenne de la figure 62 ($0,03 \pm 0,02$), et en contraction, cet indice est 8,7 fois plus élevé ($0,28$ contre $0,03 \pm 0,02$ mm). Ceci est en accord avec la littérature montrant une plus grande asymétrie en contraction maximale qu'au repos chez les patients atteints de parésie faciale (Trotman *et al.*, 2018).

3. Protocole d'évaluation

L'objectif de mesurer les mouvements du visage a donné lieu à la définition de 10 tâches, chacune d'entre elles se concentrant sur l'activation d'un muscle facial reflétant la fonction du nerf facial. Dans la littérature, le nombre de marqueurs varie de quelques points répartis sur des points anatomiques (Frey *et al.*, 1994; Coulson, Croxson and Gilleard, 1999; Jorge Jr. *et al.*, 2012; Vimercati *et al.*, 2012) à un nombre élevé de points ($n = 64$ (Trotman *et al.*, 2018), $n =$

109 (Dagnes *et al.*, 2018). Nous avons choisi 27 marqueurs (points dessinés) – sept centraux et 20 latéraux, afin de couvrir l'ensemble des zones observées en clinique sans compliquer excessivement le protocole expérimental. La taille, le type et l'emplacement des marqueurs ont été choisis sur la base de plus de 10 ans d'expérience clinique de la part d'un médecin expert en parésie faciale (MB), en accord avec les mouvements étudiés. L'emplacement des marqueurs latéraux a été déterminé à partir de l'observation clinique des zones les plus mobiles et de la morphologie du visage. Le fait de dessiner les points faciaux directement sur la peau a réduit le temps de préparation et a probablement permis d'obtenir une meilleure précision que la méthode 3D sphérique et a minimisé l'erreur de suivi, bien que cette comparaison n'ait pas été faite formellement.

Le casque Cara™ de VICON a été développé pour le suivi des mouvements du visage en vue de la conception de jeux vidéo. À notre connaissance, aucune application médicale n'a été développée à ce jour. Cet outil permet des évaluations multiples dans le même environnement, et sa portabilité apporte une nouvelle flexibilité pour permettre d'autres études de mesures cliniques. Le cadre de référence se trouve sur le casque, à l'abri des mouvements de la tête. De plus, le positionnement exact du casque ne pose pas de problème, puisque le repère est recalculé à chaque fois et que nous cherchons à quantifier l'amplitude de mouvement d'une évaluation à l'autre.

Dans la littérature, les tâches effectuées ont été sélectionnées pour démontrer la précision de l'outil de mesure (Vimercati *et al.*, 2012) ou pour se concentrer sur des mouvements spécifiques, principalement pour évaluer les effets des procédures chirurgicales. Les mouvements faciaux les plus étudiées sont en général le sourire, le haussement de sourcils et la fermeture des yeux (Hontanilla and Aubá, 2008; Baude, Hutin and Gracies, 2015; Trotman *et al.*, 2018). À notre connaissance, aucune étude n'a encore analysé les tâches des muscles buccinator et orbicularis oris dans les fonctions des joues et de la bouche. Les tâches des

procerus, mentalis et depressor anguli oris sont également rarement explorées. Ce protocole est donc plus complet que la plupart des publications antérieures dans le domaine.

Une mise à l'échelle de la taille moyenne du visage a parfois été réalisée dans la littérature pour éliminer l'effet des différences de dimensions du visage, en utilisant soit un rapport moyen entre la hauteur et la largeur du visage (Sforza *et al.*, 2010) soit une moyenne de la distance de Procruste du visage (Trotman, Faraway and Hadlock, 2020). Nous n'avons pas adopté une telle mise à l'échelle, car les mouvements induits par la contraction musculaire sont en corrélation non seulement avec dimensions musculaires mais aussi avec l'activation musculaire (Melzer, Herrmann-Frank and Lüttgau, 1995). A priori, aucune relation entre les dimensions du visage et l'amplitude de mouvement ne peut être établie, et la mise à l'échelle peut en plus ajouter des erreurs de traitement. Nous avons choisi de traiter les différences morphologiques du visage en travaillant sur un nombre suffisant de sujets pour couvrir une large population d'adultes d'âge moyen. Les écarts-types retrouvés semblent être plus importants qu'avec une mise à l'échelle mais ils sont peut-être plus représentatifs de la variété des amplitudes de mouvements des muscles faciaux.

L'échantillon de sujets exempts de PFP a été sélectionné de manière à être équilibré entre les hommes et les femmes (26 hommes, $n = 53$) et d'âge moyen (43 ± 14) afin d'être comparable à la population de patients PFP. Des études antérieures ont montré que l'âge avait un impact sur les mouvements faciaux et que les hommes avaient une mobilité faciale plus importante que les femmes (Giovanoli *et al.*, 2003; Sforza *et al.*, 2010). Un autre défi a été la définition d'indices pertinents capables de quantifier la PFP dans le contexte clinique. Certains auteurs ont proposé des distances, des angles ou des amplitudes de mouvement spécifiques en fonction d'une zone spécifique du visage : la bouche (Vimercati *et al.*, 2012) et le bas ou le haut du visage (Hontanilla and Aubá, 2008; Tzou *et al.*, 2012). D'autres ont proposé l'excursion du marqueur de tous les marqueurs étudiés (Coulson, Croxson and Gilleard, 2000; Giovanoli *et*

al., 2003). La symétrie a été le plus souvent quantifiée selon le principe du miroir d'un côté à l'autre (Djordjevic *et al.*, 2013; Xue *et al.*, 2020). Nos résultats déterminent les principaux marqueurs impliqués dans chaque mouvement, classés selon leur degré de mouvement (voir tableaux 7-9). Le module et les arguments donnent l'amplitude et l'orientation de chaque vecteur (voir figure 59). Cette direction du mouvement est essentielle pour les patients atteints de PFP ; l'hémiface non affectée peut être influencée par les mouvements de l'hémiface affectée dans les deux sens, qu'il s'agisse de mouvements volontaires ou spontanés (VanSwearingen, Cohn and Bajaj-Luthra, 1999; Trotman, Faraway and Hadlock, 2020). En ce qui concerne les indices d'asymétrie, nous proposons des indices de Procruste liés à chaque tâche. Enfin, nous proposons deux seuils de référence d'une asymétrie faciale anormale.

E. Limites et forces de l'étude

1. Tolérance du protocole et faisabilité

La première préoccupation était d'évaluer la cohérence du protocole d'évaluation avec l'évaluation de patients PFP en milieu clinique. Le casque a été bien accepté par nos participants (1,2 kg). Seul l'un d'entre eux, ayant des antécédents de migraines, a signalé de légers maux de tête dus à l'intensité lumineuse, qui a pu être ajustée en conséquence lors de l'évaluation retest. La deuxième préoccupation concernait la précision du positionnement des marqueurs. Le tableau 5 présente la moyenne des modules d'erreur 3D entre les évaluations A et B. L'erreur totale moyenne est de $2,65 \pm 0,60$ mm. Quatre facteurs clés peuvent être impliqués : la forme et la taille du marqueur (\emptyset 2 mm), le réajustement du cadre de référence, la minutie de l'évaluateur et les propriétés de la peau. Les deux premiers sont intrinsèques au processus, le troisième dépend du degré d'expérience de l'évaluateur, et le dernier des caractéristiques du visage du sujet. Le même ordre de grandeur a été observé pour les paires de marqueurs dans une étude précédente (Vimercati *et al.*, 2012). Les erreurs de positionnement d'une évaluation à l'autre sont plus importantes pour les marqueurs situés sur les tissus mous (B, M) ou loin des

repères anatomiques (J) que pour les marqueurs faciles à vérifier (F, S, N, Y). Vimercati *et al.* rapportent les mêmes conclusions pour les marqueurs situés à l'apex de l'os de la joue et à l'articulation mandibulaire (Vimercati *et al.*, 2012). Dans la littérature, les erreurs ont été exprimées par une corrélation intra-classe statistique (Vimercati *et al.*, 2012), par l'identification de distances et d'angles spécifiques (Hontanilla and Aubá, 2008; Feng *et al.*, 2014) ou par le pourcentage d'erreur de position de chaque marqueur dans le plan frontal (Hontanilla and Aubá, 2008). Ces protocoles expérimentaux ont permis de retirer tous les marqueurs et ont enregistré les mouvements dans un intervalle de temps de quelques minutes et sans enlever le support rigide sur lequel était supporté le cadre de référence (Hontanilla and Aubá, 2008; Vimercati *et al.*, 2012; Feng *et al.*, 2014). Cela semble peu pratique en clinique, car le patient revient souvent plusieurs mois après la visite précédente. Le processus doit être reproductible d'un examen à l'autre. À notre connaissance, aucune étude ne fait état d'erreurs de positionnement absolu en 3D avec l'ensemble du processus répliqué à une semaine d'intervalle.

2. Limites

Les limites de notre étude sont liées à la complexité du visage. L'unicité de chaque visage nécessite un positionnement spécifique des marqueurs par un expert. Une autre limite est le temps nécessaire à l'analyse des données, qui a été estimé à environ une heure au total, en plus des 45 minutes de temps clinique avec le patient.

Enfin, notre population testée pourrait être élargie en nombre et diversité (incluant les populations hispaniques) afin de prendre en compte les différences ethniques (Tzou *et al.*, 2005).

3. Perspectives

Des travaux futurs compléteront cette base de données en fournissant des indices de syncinésies et en évaluant les mouvements faciaux spontanés en mesurant les vitesses de

contraction (Hontanilla and Aubá, 2008; Trotman, Faraway and Hadlock, 2020) et les mouvements non volontaires induits par l'émotion. Ce protocole est actuellement étudié chez des patients atteints de PFP (phase clinique du projet VISAGE financé par un PHRC, n = 82) dans le but de quantifier l'effet de deux programmes de rééducation faciale de patients atteints de PFP au stade chronique. Nous réaliserons une étude de corrélation entre les résultats 3D et les échelles d'évaluation cliniques. Enfin, l'émergence des caméras 3D facilitera la mise en place d'appareils plus faciles à mettre en œuvre au cours de la prochaine décennie. Des comparaisons futures pourraient être faites avec nos résultats (Pan, Yu and Zhang, 2018).

F. Conclusions

Un outil objectif et fiable permettant de quantifier les mouvements faciaux utilisable dans le cadre clinique fait actuellement défaut. Les précédents outils 3D étaient difficiles à utiliser pour des raisons de temps d'expérimentation et de traitement des données. Nous avons utilisé un casque instrumenté portable spécialement conçu pour suivre les mouvements du visage et avons proposé un protocole permettant d'évaluer 10 mouvements faciaux avec des indices d'asymétrie associés. À notre connaissance, ce travail fournit la base de données la plus complète réalisée sur les mouvements faciaux du patient non parétique facial que ce soit au repos ou au mouvement volontaire d'amplitude maximale. Les mesures de l'asymétrie locale par paires de marqueurs et de l'asymétrie globale utilisant des indices de Procruste complètent l'étude de la mobilité faciale. En comparant les enregistrements des patients PFP à cette base de données normative, le protocole proposé permettra de quantifier la sévérité des troubles de la PFP, de dissocier les différentes composantes neuro-musculaires et d'évaluer les options thérapeutiques tels que les programmes de rééducation faciale, les injections de toxine botulique cervico-faciales ou les techniques de chirurgie faciale.

CHAPITRE IV : Corrélations entre l’Echelle de Créteil, le SFGS et des échelles de qualité de vie chez le patient parétique facial au stade chronique

Baude M, Guihard M, Gault-Colas C, Pradines M, Natella PA, Audureau E, Gracies JM. Validity of the Créteil Scale to rate chronic peripheral facial paresis – Comparison with the Sunnybrook Facial Grading Scale. In preparation.

A. Introduction

La parésie faciale périphérique (PFP), liée à l’atteinte du contingent moteur du nerf facial, peut résulter de causes très diverses (idiopathiques, virales, tumorales, interventionnelles, otologiques, traumatiques, immunologiques ou encore systémiques) (Hohman and Hadlock, 2014). Au stade aigu, l’asymétrie faciale a un impact important sur la qualité de vie des patients mais également sur leurs niveaux d’anxiété et de dépression ainsi que sur leurs interactions sociales (VanSwearingen *et al.*, 1998; Fu, Bundy and Sadiq, 2011; Ng and Ngo, 2013; Lee *et al.*, 2019; Saadi *et al.*, 2019).

Parmi les patients atteints de PFP idiopathique, 85% récupèrent leur fonction motrice faciale à six mois (Adour *et al.*, 1978; Peitersen, 2002; Sullivan *et al.*, 2007; Hohman and Hadlock, 2014). Pour les 15% restants, la récupération peut s’avérer plus longue et moins complète, le patient entrant dans les stades subaigu (4-12 mois) et chronique (>12-24 mois du début des symptômes)(Salles *et al.*, 2015). Pour la grande majorité des patients, le stade chronique s’accompagne au niveau de l’hémiface parétique de l’émergence progressive de **trois formes d’hyperactivités musculaires faciales**, la contracture, les spasmes et les syncinésies, pouvant refléter une hyperexcitabilité des motoneurones faciaux ou une cicatrisation anormale (Salles *et al.*, 2015; Van Veen *et al.*, 2019).

Nous définissons donc ici *quatre composantes neuromusculaires distinctes* de la PFP chronique :

- La **parésie** est la conséquence immédiate de la lésion du nerf facial. Elle peut être observée

au repos ou pendant une conversation, sous la forme d'une absence d'activation musculaire automatique/émotionnelle (tonus musculaire facial), ou lors d'une commande motrice délibérée et volontaire. Étant donné que la voie finale (motoneurone du noyau du VII) est commune aux deux, on peut émettre l'hypothèse d'une relation étroite entre les accès émotionnel et volontaire aux motoneurones faciaux, mais cela n'a pas été démontré à ce jour, probablement en raison du manque de méthodes cliniques ou de techniques suffisamment précises.

A la suite de l'hypoactivation des muscles faciaux, trois autres phénomènes d'hyperactivité *involontaire* des muscles faciaux du côté affecté apparaissent plusieurs semaines après la lésion, qui peuvent être détectés au repos, durant une commande automatique/émotionnelle (conversation) ou une commande volontaire :

- La **contracture hémifaciale** est une contraction tonique permanente d'un ou de plusieurs muscles faciaux, qui peut tromper le clinicien en inversant partiellement l'hypotonie faciale initiale (par exemple, en passant d'un œil excessivement ouvert par parésie de l'orbiculaire de l'œil au stade aigu à une fissure palpébrale rétrécie au stade chronique).
- La **syncinésie hémifaciale** est une coactivation excessive d'un ou plusieurs muscles faciaux, lors d'une commande émotionnelle ou volontaire destinée à un autre groupe musculaire. Il s'agit d'une forme particulièrement gênante d'hyperactivité pour laquelle on peut soupçonner un lien élevé avec la qualité de vie perçue liée à la PFP (Van Veen *et al.*, 2019).
- Les **spasmes hémifaciaux** sont des contractions brèves et localisées (<100 ms) d'un ou de plusieurs muscles faciaux, au repos ou pendant une conversation.

De nombreuses études ont cherché une corrélation entre gravité clinique de la PFP et qualité de vie, avec des résultats souvent discordants, suggérant que la qualité de vie n'était que partiellement expliquée par la fonction motrice faciale (Tavares-Brito *et al.*, 2019; Van Veen *et*

al., 2019; Bruins *et al.*, 2021; Bylund *et al.*, 2021; Díaz-Aristizabal *et al.*, 2021; Fujiwara *et al.*, 2022). Cependant, les outils cliniques utilisés dans ces études et actuellement disponibles ne permettent pas de distinguer les quantifications de la parésie sur commande volontaire et sur commande émotionnelle, ni les trois composantes d'hyperactivité au repos et pendant la conversation. Nous avons conçu une échelle visant ces objectifs, appelée l'*Echelle de Créteil*.

L'objectif principal de cette étude était d'explorer la validité concourante de l'Echelle de Créteil dans la parésie faciale chronique par rapport au Sunnybrook Facial Grading System (échelle de référence actuelle), ainsi que ses corrélations avec des scores de qualité de vie perçue globale et spécifique de la parésie faciale, des scores d'anxiété et de dépression ainsi qu'un score d'auto-appréciation esthétique du visage. Nous émettons l'hypothèse que parmi les quatre phénomènes cliniques susmentionnés présents au stade chronique de la PFP, la *parésie faciale* et la *syncinésie* pourraient avoir les impacts les plus importants sur la qualité de vie (Salles *et al.*, 2015; Tavares-Brito *et al.*, 2019; Van Veen *et al.*, 2019; Bruins *et al.*, 2021; Bylund *et al.*, 2021; Díaz-Aristizabal *et al.*, 2021; Fujiwara *et al.*, 2022).

B. Méthodes

1. Conception de l'étude

La présente étude fait partie de VISAGE, un essai multidisciplinaire impliquant quatre centres français (Médecine Physique et de Réadaptation, n=1, Chirurgie Maxillo-Faciale et Plastique, n=2 ; Stomatologie et Chirurgie de la Tête et du Cou, n=1) conçu comme une étude en simple aveugle, prospective, contrôlée et randomisée permettant de comparer la stratégie des contrats d' autorééducation guidée à la rééducation conventionnelle dans la parésie faciale chronique (> 1 an depuis la lésion du nerf facial). Le protocole de l'étude a été publié précédemment (Baude *et al.*, 2023). Les participants à cette étude sont les 46 premiers sujets inclus dans l'essai qui ont effectué leur première visite d'évaluation (J1) entre le 1^{er} mars 2021 et le 31 mars 2024. Les évaluations cliniques ont été réalisées par un évaluateur (MB) en aveugle

du groupe de randomisation.

2. Critères de sélection

Les patients éligibles devaient satisfaire aux des critères d'inclusion suivants : a) diagnostic de parésie faciale périphérique chronique stable – *i.e.* depuis plus d'un an après l'apparition des symptômes – quelle qu'en soit la cause ; b) âge de 18 ans ou plus ; c) motivation suffisante pour participer à un programme de rééducation faciale de six mois, selon l'avis de l'investigateur ; d) signature du consentement ; e) bénéficiaire du régime de sécurité sociale français.

Les critères d'exclusion étaient les suivants : a) tumeur évolutive comme cause de la parésie faciale périphérique ; b) parésie faciale récurrente ; c) injections de toxine botulique dans le visage moins de six mois avant l'inclusion dans l'étude ou prévues pendant la période d'étude ; d) chirurgie faciale moins de deux ans avant l'inclusion dans l'étude ou prévue pendant la période d'étude ; e) anastomose V-VII ou XII-VII ou transfert musculaire avant l'inclusion à l'étude ou prévue pendant la période d'étude ; f) traitements esthétiques non chirurgicaux - acide hyaluronique/ lipofilling/ laser/ fil tenseur - moins de deux ans avant l'inclusion à l'étude ou prévus pendant la période d'étude ; g) participation à un autre protocole de recherche interventionnelle sur le visage, qu'il soit esthétique, rééducatif ou chirurgical ; h) trouble intercurrent susceptible de compromettre la capacité à participer au programme de rééducation ; i) trouble cognitif ou psychologique empêchant la participation au programme de rééducation ou aux évaluations de suivi, selon l'avis de l'investigateur ; j) patient sous protection juridique.

3. Critères de jugement

Les critères de jugement étaient recueillis sur deux visites initiales (J-30 et J1). Les données suivantes ont été recueillies à la visite d'inclusion : sexe, date de naissance, poids, taille, latéralité, côté et cause de la PFP, présence et types d'hyperactivité musculaire faciale. Le reste des données a été recueilli lors de la première journée d'évaluation (J1) par le médecin

évaluateur de l'étude qui était en aveugle du groupe de randomisation du patient. Il comportait deux parties :

- **Questionnaires** : Les patients devaient remplir quatre auto-questionnaires concernant les symptômes présents au cours de la dernière semaine précédant la visite d'évaluation, en présence de l'investigateur qui pouvait répondre à toute question. Les questionnaires suivants étaient remplis dans cet ordre : 1) Facial Clinimetric Evaluation ; 2) FACE-Q ; 3) Short-Form 12 et 4) Hamilton Anxiety and Depression Scale (Baude *et al.*, 2023).

- **Echelles d'évaluation de la motricité faciale** :

- 1) le *Sunnybrook Facial Grading System* (SFGS) (Ross, Fradet and Nedzelski, 1996) (voir Figure 49 dans le chapitre I.D) comprend une évaluation de la symétrie faciale au repos et au cours de cinq mouvements faciaux volontaires. Le système de cotation SFGS utilisé était celui publié par Neely et al. qui proposait des critères de cotation supplémentaires pour les études de recherche clinique (Neely et al., 2010) ;

- 2) l'*Echelle de Créteil* (voir Figure 50 dans le chapitre I.D) est systématiquement enregistrée. Elle consiste pour sa première partie à observer le visage pendant 30 secondes au repos, puis pendant 30 secondes au cours d'une conversation, afin d'évaluer, dans chacune des deux conditions et pour 12 muscles faciaux prédéfinis : l'asymétrie liée à la contracture, l'asymétrie liée à la parésie automatique/émotionnelle et la fréquence des spasmes. Dans la deuxième partie de l'échelle, un effort volontaire maximal est demandé au participant sur chacun des 12 muscles prédéfinis afin d'évaluer la parésie sur effort volontaire ainsi que la présence et la sévérité de la syncinésie concomitante à chacun de ces 12 efforts maximaux au sein des 11 autres muscles. Les scores dérivés de l'Echelle de Créteil sont ordinaux allant de 0 à 3, 3 représentant la normalité :

a. *Score de force motrice volontaire* (parésie lors d'une commande volontaire) de

12 muscles faciaux évalués à l'aide d'un système de notation à 9 niveaux allant de 0 (pas de contraction) à 3 (normal) ;

b. **Nombre de muscles syncinétiques** générés lors de chaque effort volontaire maximal ;

c. **Score d'intensité de la syncinésie** dans chaque muscle au cours de chaque effort volontaire maximal, allant de 0 à 3 ;

d. **Fréquence des spasmes** involontaires pendant la période de repos de 30 secondes et celle de conversation de 30 secondes, ordinalement codée de 0 à 3 ;

e. **Scores d'asymétrie liée à la parésie, au repos et pendant la conversation** (parésie pendant la commande automatique/émotionnelle), quantifiant l'asymétrie liée à l'absence visible de contraction musculaire, allant de 0 à 3 ; un **score global d'asymétrie liée à la parésie** a été obtenu en faisant la moyenne des scores au repos et pendant la conversation.

f. **Scores d'asymétrie liée à la contracture, au repos et pendant la conversation**, quantifiant l'asymétrie de 0 à 3. Un **score global d'asymétrie liée à la contracture** est obtenu en faisant la moyenne des scores au repos et pendant la conversation.

À l'exception du score de force motrice (échelle ordinale à 9 degrés), tous les autres scores de 0 à 3 sont évalués sur une échelle à 7 degrés de 0 à 3 par paliers de 0,5. L'enregistrement vidéo des tests de l'Echelle de Créteil est systématiquement réalisé à l'aide d'une caméra placée sur trépied, sur la table d'examen entre l'investigateur et le patient. Bien qu'un tel enregistrement vidéo ne soit pas requis dans le SFGS, les deux échelles ont été vidéo-enregistrées dans cette étude pour des vérifications ultérieures.

4. Avis éthique et accord de participation

Cette étude est menée conformément à la Déclaration d'Helsinki. Le protocole de l'étude, la lettre d'information aux patients et le formulaire de consentement éclairé ont été approuvés par

le Comité de Protection des Personnes Est III le 1er octobre 2019. Avant l'inclusion du premier participant, cette étude a été enregistrée dans le registre des essais cliniques (www.clinicaltrials.gov) sous l'identifiant NCT04074018.

5. Analyses statistiques

Une analyse statistique descriptive a été réalisée pour évaluer les sujets en termes de caractéristiques démographiques et cliniques, y compris des informations telles que cause de la PFP, délai depuis la lésion, côté de la parésie, traitements médicamenteux antérieurs et comorbidités. Les données quantitatives ont été décrites à l'aide de la moyenne (\pm écart-type) ou de la médiane (intervalle interquartile), en fonction de la normalité des distributions, et les données qualitatives ont été rapportées sous forme de nombres ou de pourcentages.

Les coefficients de corrélation et les valeurs *p* correspondantes ont été calculés pour évaluer les associations entre les scores des questionnaires et les échelles d'évaluation de la motricité faciale. Des coefficients de Pearson ont été utilisés pour la plupart des variables, à l'exception des corrélations impliquant le score d'asymétrie liée aux spasmes au repos, en conversation et global, les sous-scores de mouvement facial, de confort oculaire et de fonction orale de la FaCE, le score de symétrie de repos du SFGS et le score de dépression de l'HADS, pour lesquels des coefficients de Spearman ont été utilisés en raison d'une déviation à la normalité et/ ou d'une cotation ordinale. Pour prendre en compte la multiplicité des tests, les valeurs *p* ont été corrigées à l'aide de la méthode de Benjamini-Hochberg (Ghosh, 2019). Pour signaler des tendances potentielles, des explorations de corrélations *sans* correction pour les tests multiples sont également disponibles. A des fins d'illustration, une matrice et une visualisation en réseau ont été construites à partir des coefficients de corrélation et des diagrammes de dispersion ont été réalisés afin d'illustrer la force et la forme des associations.

Des comparaisons entre sous-groupes ont été effectuées à l'aide de tests *t* à deux échantillons de Welch selon la cause de la PFP (idiopathique ou non), la durée des symptômes (< ou > 2

ans), le sexe et l'âge (< vs. > 50 ans). Pour l'analyse en fonction de la cause de la PFP, un *biplot de Gabriel* a été représenté, permettant de projeter les participants le long des axes des composantes principales de l'analyse des composantes principales en fonction de leurs caractéristiques individuelles (Gabriel and Odoroff, 1990). La coloration des participants en fonction de la cause de la PFP (idiopathique vs. non idiopathique), a permis une analyse visuelle rapide des principales différences entre les sous-groupes.

Les données manquantes ou invalides ont été systématiquement vérifiées dans les dossiers des participants. Toutes les analyses ont été réalisées sur cas complets sans nécessité d'imputation des données manquantes. Une p-value < 0,05 a été considérée comme significative. Les analyses ont été réalisées avec les logiciels R 4.0.2 (R Foundation, Vienna, Austria and *pca2d* packages) pour la visualisation et Stata v16 (StataCorp, College Station, TX, USA) pour les statistiques descriptives et comparatives.

6. Nombre de sujets nécessaires

Le nombre de sujets nécessaires pour la partie essai contrôlé randomisé de VISAGE a été fixé à 82, comme cela est justifié dans le protocole (Baude *et al.*, 2023). Pour cette investigation descriptive des données initiales, le nombre de sujets a été basé sur le nombre de patients inclus dont les données étaient disponibles au moment de l'analyse (n=46), ce qui représente une taille d'échantillon en adéquation avec les dernières études publiées dans ce domaine (Bruins *et al.*, 2021).

C. Résultats

1. Caractéristiques des participants

L'échantillon correspondait aux 46 premiers patients inclus dans la phase clinique de l'étude VISAGE. Les données démographiques à l'inclusion (J-30) sont présentées dans le tableau 10. Les participants étaient à distance de la phase aiguë et présentaient tous des signes d'hyperactivité musculaire du côté parétique : syncinésies faciales (100 %), contractures faciales

(85 % ; plus fréquentes dans l'échantillon idiopathique que dans l'échantillon non idiopathique) et spasmes faciaux dans 63 % des cas. Le score composite du SFGS reflétait une sévérité moyenne modérée de la PFP sur cet échantillon.

Nombre	46
Femmes (%)	34 (73,9)
Age (années)	49,9 ±14,9
Ancienneté de la parésie faciale (années)	4,4 ± 6,1
Droitiers (%)	44 (95,7)
Cause de la parésie faciale périphérique	
Idiopathique	31 (67,4)
Infectieuse documentée	5 (10,9)
Immunologique	5 (10,9)
Chirurgicale	3 (6,5)
Traumatique	2 (4,3)
Côté de la parésie faciale, gauche (%)	25 (54,3)
Signes d'hyperactivité musculaire	
Spasmes	29 (63,0)
Contractures	39 (84,8)
Syncinésies	46 (100)

Tableau 10. Caractéristiques démographiques de la population de l'étude

2. Auto-questionnaires et SFGS

Ces données, mesurées à J1, sont présentées dans le tableau 1. L'échantillon d'étude présentait une altération de la qualité de vie liée à la PFP, mesurée par le questionnaire FaCE dans chacune de ses sous-catégories, les sous-catégories les moins altérées étant la fonction orale et la fonction sociale. L'auto-appréciation esthétique du visage (FACE-Q) était également altérée. Le SF-12 montrait un retentissement de la PFP sur le bien-être mental et physique. Les niveaux d'anxiété et de dépression étaient anormalement élevés sur le HADS.

Facial Clinimetric Evaluation	52,1 ±13,1
Mouvement facial	40,9 ±18,0
Confort facial	41,5 ±21,5
Fonction orale	70,4 ±22,3
Confort oculaire	54,3 ±34,6
Contrôle lacrymal	55,4 ±32,0
Fonction sociale	62,2 ±21,1
FACE-Q	21,0 ±5,4
Short-Form 12	
Score de composante physique	17,5 ±2,1
Score de composante mentale	21,1 ±2,6
Hamilton Anxiety and Depression Scale	
Score d'anxiété	7,0 ±2,8
Score de dépression	5,0 ±2,9
Echelle de Créteil	
Score de force motrice	1,77 ±0,29
Nombre de muscles syncinétiques par mouvement	3,79 ±1,11
Score d'intensité des syncinésies	1,61 ±0,24
Scores subjectifs d'asymétrie au repos par :	
Parésie	2,64 ±0,20
Contracture	2,59 ±0,26
Spasmes	2,80 ±0,24
Scores subjectifs d'asymétrie en conversation par :	
Parésie	2,33 ±0,27
Contracture	2,34 ±0,28
Spasmes	2,99 ±0,04
Sunnybrook Facial Grading System	
Score composite	39,1 ±13,7
Score de symétrie de repos	13,7 ±2,5
Score de symétrie au mouvement volontaire	61,6 ±12,0
Score de syncinésies	8,8 ±2,9

Tableau 11. Données des questionnaires et des échelles de la population de l'étude

3. Données de l'Echelle de Créteil

Les scores de l'Echelle de Créteil objectivaient une parésie modérée sur commande volontaire ($1,77 \pm 0,29$ /3), un nombre important de muscles syncinétiques ($3,8 \pm 1,1$ par effort) et une intensité relativement élevée de la syncinésie. L'asymétrie de repos était aggravée en conversation, à la fois pour la parésie (sur commande émotionnelle/ automatique) et pour la contracture. En revanche, les spasmes présents au repos avaient quasiment disparu en conversation.

4. Corrélations entre échelles cliniques et auto-questionnaires

Les corrélations entre les variables sont affichées sous la forme d'une *matrice* de corrélation (Figure 64) et d'un *réseau* de corrélation (Figure 65), qui fournissent une représentation visuelle des relations détectées après corrections des p pour la multiplicité des tests. Des diagrammes bivariés sont disponibles dans la figure 66 pour illustrer les corrélations les plus pertinentes de l'étude.

a. Corrélations entre l'Echelle de Créteil et les scores du SFGS

Le score de force motrice de l'Echelle de Créteil (commande volontaire) était fortement corrélé avec les scores composite et de symétrie au mouvement volontaire du SFGS ($r=0,77$; $p<10^{-7}$ et $r=0,79$; $p<10^{-8}$; Figure 66A). L'altération de la symétrie (scores d'asymétrie) liée à parésie sur l'Echelle de Créteil (commande automatique/émotionnelle) était également fortement corrélée aux scores composite et de symétrie au mouvement volontaire du SFGS ($r=0,71$, $p<10^{-6}$ et $r=0,78$, $p<10^{-8}$). Le nombre moyen par effort de muscles syncinétiques sur l'Echelle de Créteil était fortement corrélé avec le score de syncinésies du SFGS ($r=0,72$; $p<10^{-6}$). Le score de symétrie de repos du SFGS n'était corrélé à aucun autre score du SFGS ou de l'Echelle de Créteil.

b. Corrélations au sein de l'Echelle de Créteil

Le score de force motrice de l'Echelle de Créteil (commande volontaire) était corrélé à l'altération de la symétrie liée à la parésie (scores d'asymétrie sur commande automatique/émotionnelle) ($r=0,63$, $p<10^{-4}$) ainsi qu'aux altérations de symétrie liées à la parésie au repos ($r=0,50$, $p<0,004$) et en conversation ($r=0,62$, 10^{-4} ; Figures 66B et 67C). Le nombre moyen de muscles syncinétiques par effort sur l'Echelle de Créteil était corrélé au score de force motrice ($r=-0,38$, $p=0,04$; Figure 66D), ainsi qu'aux scores d'intensité de la syncinésie ($r=0,53$, $p=0,002$), au score global d'asymétrie liée à la contracture ($r=-0,42$, $p=0,024$) et au score d'asymétrie liée à l'hyperactivité globale (contracture et spasme combinés ; $r=-0,4$,

$p=0,041$). Les scores d'asymétrie liée à la parésie (au repos et en conversation) étaient fortement corrélés entre eux, de même que les scores d'asymétrie liée à la contracture dans ces deux conditions. La fréquence des spasmes, au repos ou en conversation, n'était corrélée à aucun autre score.

c. Corrélations entre l'Echelle de Créteil et les auto-questionnaires.

Le score de force motrice de l'Echelle de Créteil (commande volontaire) était corrélé avec le score total FaCE ($r=0,38$; $p=0,049$) et avec son sous-score de mouvement facial ($r=0,48$; $p=0,008$; Figure 66E) ainsi qu'avec le score physique PCS de qualité de vie globale au SF-12 ($r=-0,38$; $p=0,049$; Figure 66F). Le score global d'asymétrie liée à la parésie sur l'Echelle de Créteil (commande automatique/émotionnelle) était corrélé avec le score total de la FaCE ($r=0,48$; $p=0,006$) et avec ses sous-scores de mouvement facial et de contrôle lacrymal ($r=0,58$; $p<10^{-3}$; $r=0,42$; $p=0,024$).

d. Corrélations entre le SFGS et les auto-questionnaires

Les scores composite et de symétrie au mouvement volontaire du SFGS étaient corrélés au score total du questionnaire FaCE ($r=0,42$; $p=0,023$ et $r=0,46$; $p=0,009$) et à ses sous-scores de mouvement facial ($r=0,51$; $p=0,003$ et $r=0,56$; $p=0,001$) et de contrôle lacrymal ($r=0,40$; $p=0,031$ et $r=0,38$; $p=0,048$). Les scores de symétrie au repos et de syncinésies du SFGS n'étaient corrélés à aucun autre questionnaire de l'étude.

e. Analyse par sous-groupe

Les participants atteints de PFP idiopathique avaient un nombre de muscles syncinétiques plus élevé ($p=0,005$), un score d'asymétrie liée à la contracture en conversation plus sévère ($p=0,030$), un score de syncinésie du SFGS plus élevé ($p=0,030$) et un niveau d'anxiété plus élevé ($p=0,047$), que ceux ayant d'autres causes (Tableau 12). Les patients souffrant d'une PFP plus chronique (> 2 ans *vs.* ≤ 2 ans) avaient des scores SF12-MCS plus élevés ($p=0,022$), et des scores global et conversationnel d'asymétrie liée à la parésie plus altérés ($p=0,043$ et $p=0,049$)

(Tableau 13). Les femmes avaient une moins bonne appréciation esthétique de leur visage ($p=0,014$), un score SF12-MCS plus faible ($p=0,049$) et un score d'asymétrie lié à la contracture plus sévère lors de la conversation ($p=0,043$) (Tableau 14). Il n'y avait pas de différence en fonction de l'âge (Tableau 15).

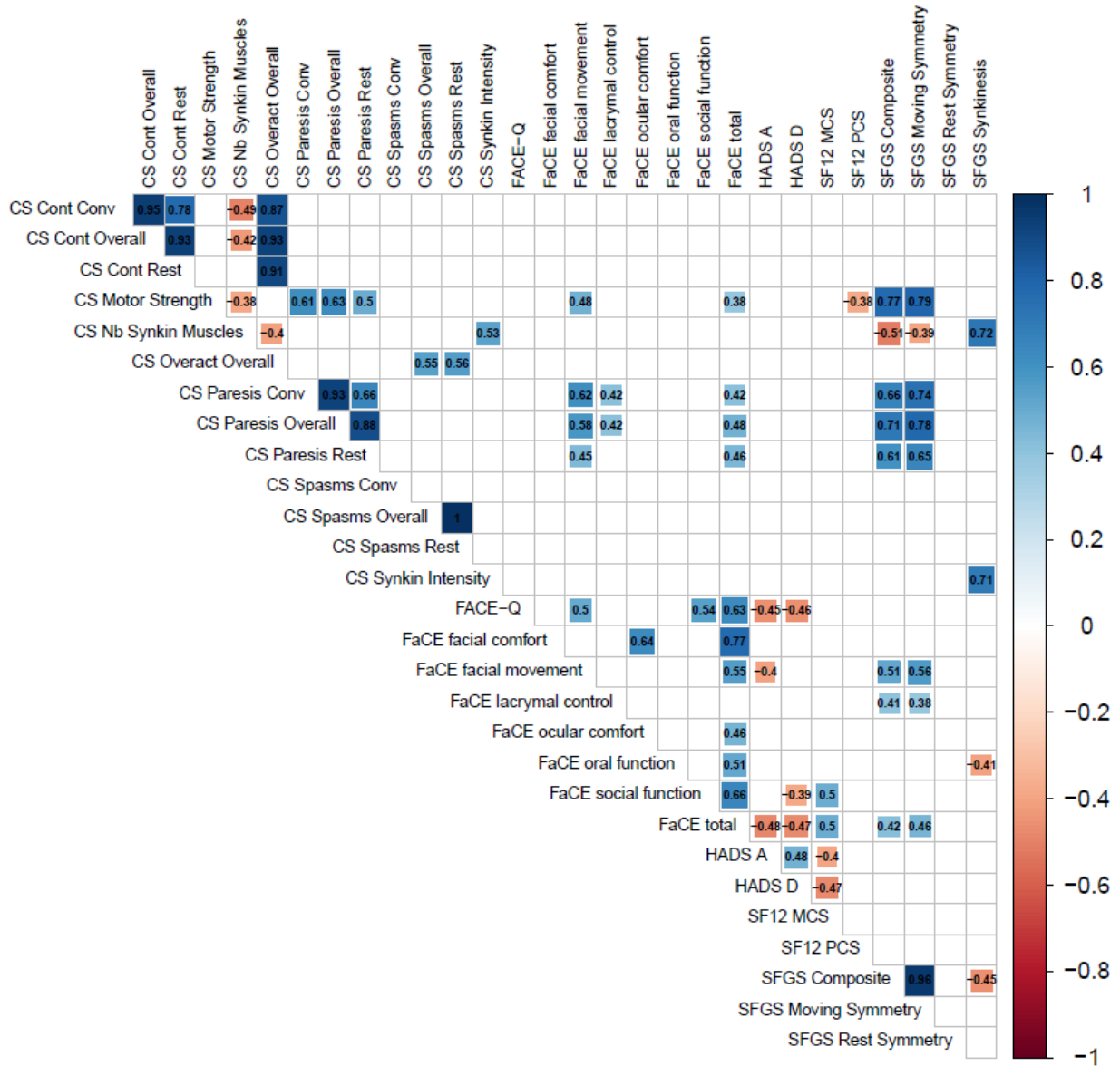


Figure 64. Matrice de corrélation entre questionnaires et échelles cliniques de l'étude.

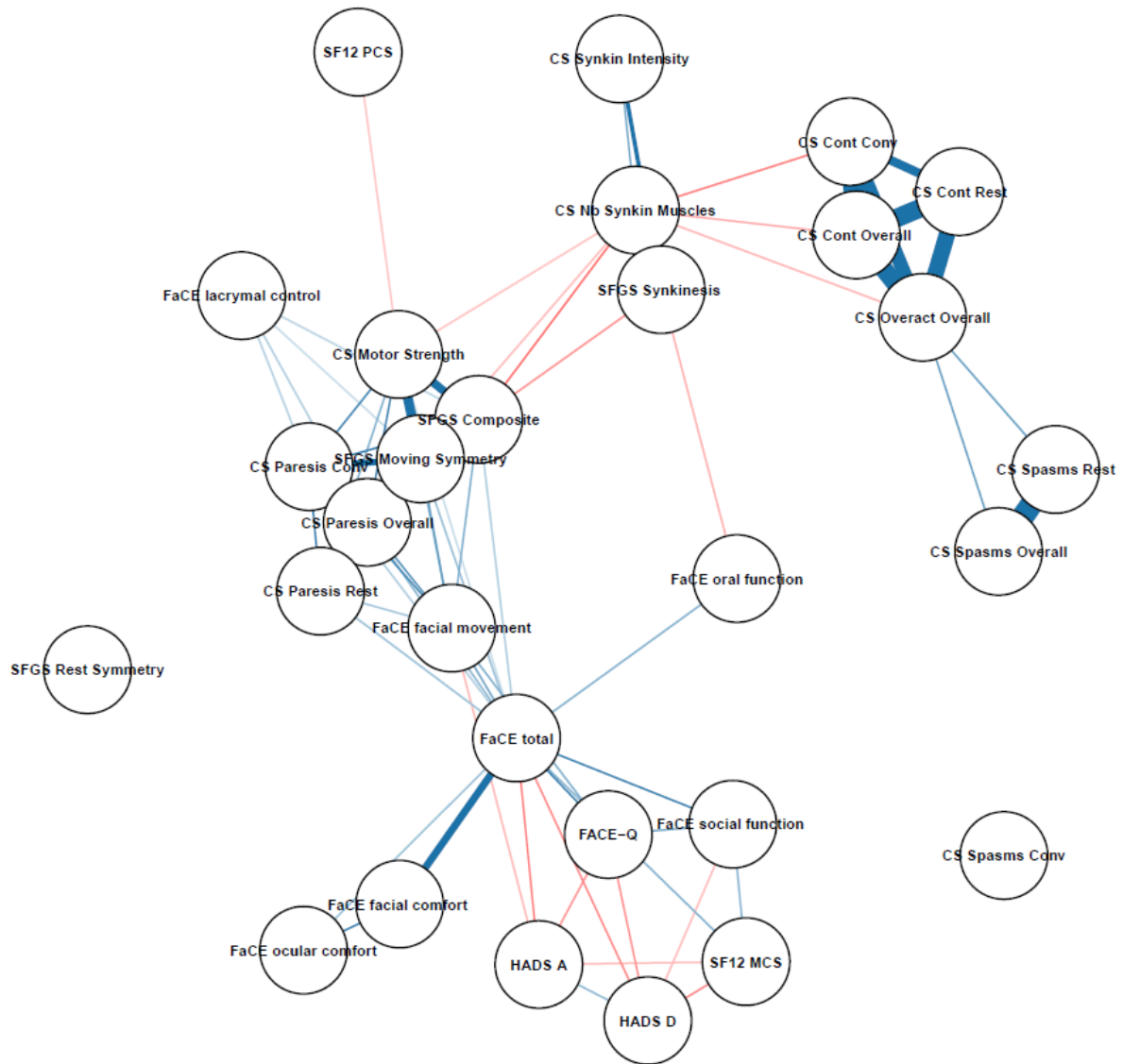


Figure 65. Réseau des corrélations entre les questionnaires et les échelles cliniques de l'étude.

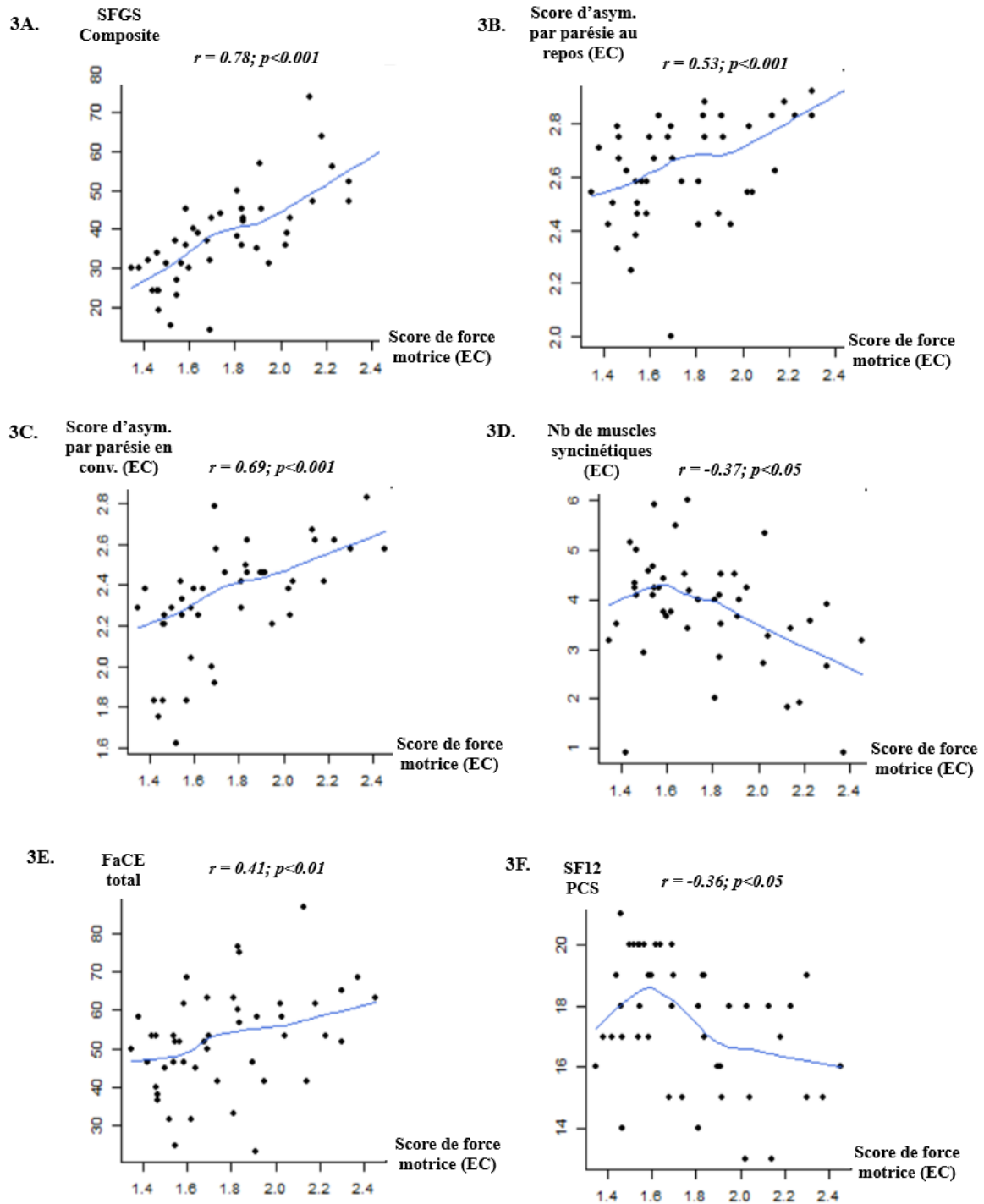


Figure 66. Diagrammes de corrélations bivariées.

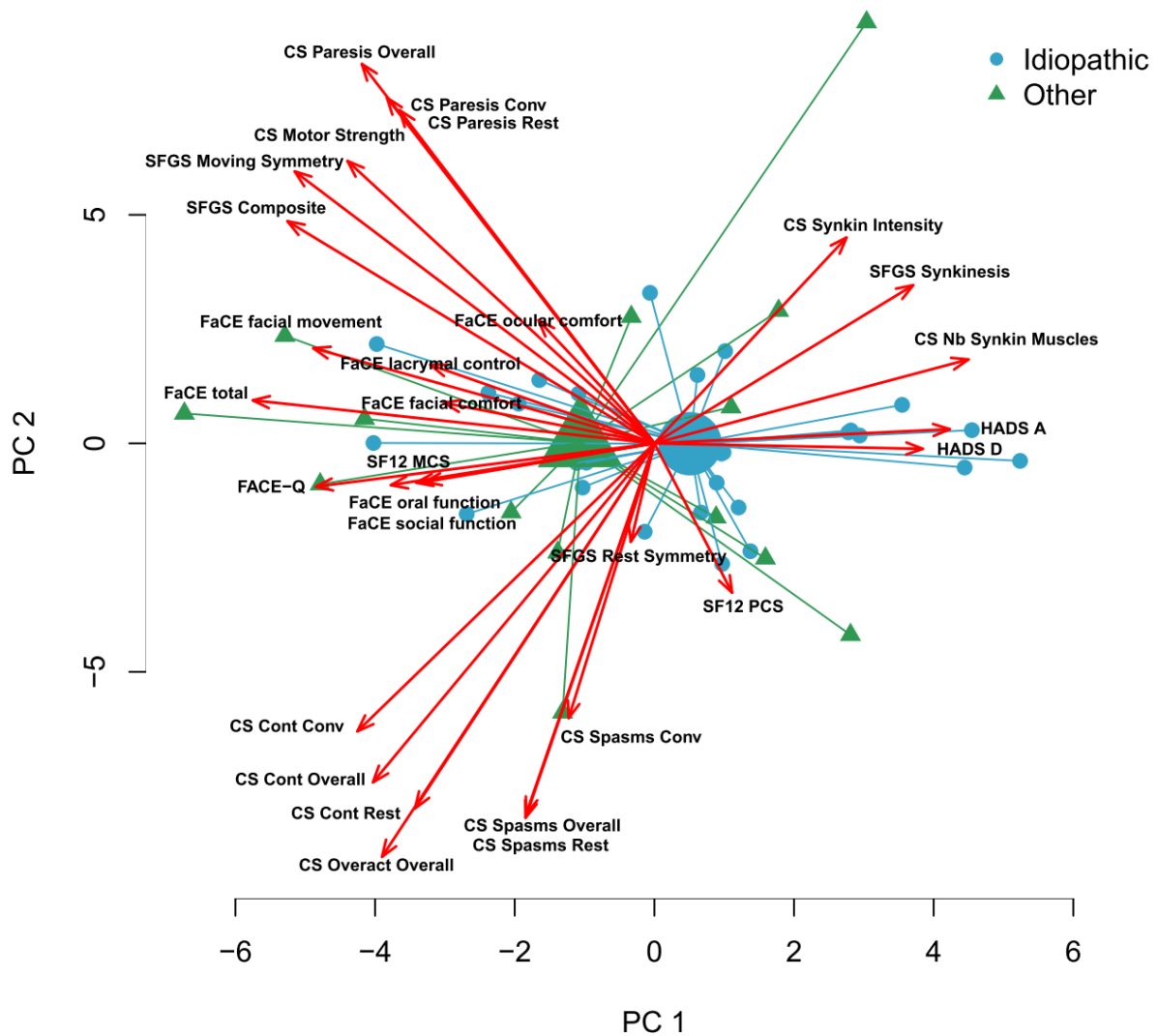


Figure 67. Biplot entre les variables des questionnaires et des échelles cliniques en fonction de la cause de la PFP (idiopathique vs. non idiopathique). Cette figure montre la représentation biplot des 29 variables évaluées dans les analyses de corrélation, permettant de visualiser les relations entre les variables (représentées par des flèches) tout en affichant simultanément les patients (représentés par des cercles/triangles), sur la base de leurs caractéristiques individuelles. Les résultats sont projetés sur les deux premières composantes/dimensions (PC1, PC2) générées par l'analyse en composantes principales. Les couleurs des observations correspondent à la cause de la PFP (cause idiopathique en bleu et cause non idiopathique en vert). Cette représentation confirme les corrélations précédemment identifiées comme le montrent les flèches pointant dans des directions parallèles similaires ou inversées, correspondant à des corrélations positives ou négatives, respectivement. Les patients souffrant de causes idiopathiques (bleu) sont principalement projetés dans la zone droite du graphique, indiquant des scores de syncinésies et d'anxiodépression plus élevés, et des valeurs plus faibles dans le score d'asymétrie liée à la contracture en conversation et les scores et sous-scores de la FaCE, par rapport aux patients souffrant de PFP d'autres causes.

Characteristic	N	Overall N = 46 ¹	Idiopathic N=31 ¹	Other N=15 ¹	p-value ²
Age	46	48.0 [38.0;60.8]	47.0 [37.5;58.0]	49.0 [40.0;60.0]	0.61
Gender, women	46	34 (73.9%)	24 (77.4%)	10 (66.7%)	0.49
Time since lesion, years	46	2.13 [1.18;5.1]	2.38 [1.12;5.4]	1.80 [1.33;3.35]	>0.99
Facial Palsy < 2y		23 (50.0%)	15 (48.4%)	8 (53.3%)	0.75
Facial Palsy ≥ 2y		23 (50.0%)	16 (51.6%)	7 (46.7%)	
Scores					
FaCE total	46	52.1 ±13.1	50.5 ±10.9	55.2 ±16.8	0.34
FaCE facial comfort	46	41.5 ±21.5	40.6 ±20.4	43.3 ±24.2	0.71
FaCE facial movement	46	40.9 ±18.0	40.1 ±18.3	42.8 ±17.8	0.63
FaCE lacrymal control	46	55.4 ±32.0	51.6 ±28.8	63.3 ±37.6	0.30
FaCE oral function	46	70.4 ±22.3	69.8 ±18.2	71.7 ±29.7	0.82
FaCE social function	46	62.2 ±21.1	57.9 ±18.5	71.3 ±23.8	0.069
FaCE ocular comfort	46	54.3 ±34.6	61.7 ±30.3	39.2 ±38.9	0.061
FACE-Q	46	21.0 ±5.4	20.4 ±5.2	22.3 ±5.6	0.26
SF12 PCS	46	17.5 ±2.08	17.7 ±2.03	16.9 ±2.15	0.23
SF12 MCS	46	21.1 ±2.65	20.9 ±2.70	21.5 ±2.59	0.48
HADS anxiety	46	7.0 ±2.84	7.5 ±2.99	5.9 ±2.22	0.047
HADS depression	46	5.0 ±2.99	5.5 ±2.74	4.07 ±3.35	0.18
SFGS Composite score	46	39.1 ±13.7	36.6 ±11.0	44.2 ±17.5	0.14
SFGS Resting symmetry score	46	13.7 ±2.46	14.0 ±2.01	13.0 ±3.16	0.26
SFGS Voluntary movement symmetry score	46	61.6 ±12.0	60.1 ±10.1	64.5 ±15.1	0.32
SFGS Synkinesis score	46	8.8 ±2.99	9.5 ±2.72	7.3 ±3.11	0.033
CS Asymmetry by paresis at rest	46	2.64 ±0.20	2.64 ±0.18	2.65 ±0.25	0.85
CS Asymmetry by paresis at conversation	46	2.33 ±0.27	2.31 ±0.25	2.38 ±0.31	0.48
CS Asymmetry by paresis	46	2.47 ±0.21	2.46 ±0.19	2.50 ±0.26	0.55
CS Asymmetry by contracture at rest	46	2.59 ±0.26	2.57 ±0.25	2.63 ±0.29	0.52
CS Asymmetry by contracture at conversation	46	2.34 ±0.28	2.28 ±0.23	2.48 ±0.32	0.034
CS Asymmetry by contracture	46	2.45 ±0.26	2.40 ±0.23	2.54 ±0.30	0.14
CS Asymmetry by spasms at rest	46	2.80 ±0.24	2.83 ±0.16	2.74 ±0.35	0.33
CS Asymmetry by spasms at conversation	43	2.99 ±0.04	3.00 ±0.01	2.97 ±0.07	0.17
CS Asymmetry by spasms	43	69.4 ±3.26	69.9 ±1.96	68.5 ±4.96	0.33
CS Overactivity (spasms + contracture)	43	2.67 ±0.17	2.66 ±0.13	2.70 ±0.23	0.59
CS Motor strength	46	1.77 ±0.29	1.73 ±0.27	1.86 ±0.33	0.21
CS Number of syncinetic muscles	46	3.79 ±1.11	4.14 ±0.89	3.06 ±1.20	0.005
CS Intensity of synkinesis	46	1.61 ±0.24	1.66 ±0.18	1.51 ±0.32	0.12

¹Median [25%;75%]; n (%); Mean ±SD

²Wilcoxon rank sum test; Fisher's exact test; Pearson's Chi-squared test; Welch Two Sample t-test

Tableau 12. Données cliniques selon la cause de la PFP (idiopathique vs. non idiopathique).

Characteristic	N	Overall N = 46 ¹	Facial Palsy < 2y N=23 ¹	Facial Palsy >= 2y N=23 ¹	p- value ²
Age, years	46	48.0 [38.0;60.8]	50.0 [39.5;59.5]	43.0 [37.5;59.0]	0.65
Gender, women		34 (73.9%)	16 (69.6%)	18 (78.3%)	0.50
Scores					
FaCE total	46	52.1 ±13.1	52.8 ±14.9	51.3 ±11.4	0.70
FaCE facial comfort	46	41.5 ±21.5	42.4 ±21.9	40.6 ±21.5	0.78
FaCE facial movement	46	40.9 ±18.0	43.5 ±18.8	38.4 ±17.2	0.34
FaCE lacrymal control	46	55.4 ±32.0	60.9 ±28.0	50.0 ±35.4	0.25
FaCE oral function	46	70.4 ±22.3	70.1 ±20.9	70.7 ±24.0	0.94
FaCE social function	46	62.2 ±21.1	60.9 ±22.8	63.6 ±19.7	0.67
FaCE ocular comfort	46	54.3 ±34.6	59.2 ±29.0	49.5 ±39.4	0.34
FACE-Q	46	21.0 ±5.4	21.3 ±6.3	20.7 ±4.33	0.67
SF12 PCS	46	17.5 ±2.08	16.8 ±2.11	18.2 ±1.85	0.022
SF12 MCS	46	21.1 ±2.65	20.6 ±2.54	21.5 ±2.74	0.25
HADS anxiety	46	7.0 ±2.84	7.3 ±3.07	6.7 ±2.62	0.44
HADS depression	46	5.0 ±2.99	5.1 ±3.43	4.87 ±2.55	0.77
SFGS Composite score	46	39.1 ±13.7	40.2 ±14.9	38.0 ±12.7	0.60
SFGS Resting symmetry score	46	13.7 ±2.46	13.9 ±2.11	13.5 ±2.79	0.55
SFGS Voluntary movement symmetry score	46	61.6 ±12.0	63.0 ±13.0	60.2 ±11.0	0.44
SFGS Synkinesis score	46	8.8 ±2.99	8.9 ±2.83	8.7 ±3.20	0.81
CS Asymmetry by paresis at rest	46	2.64 ±0.20	2.69 ±0.15	2.59 ±0.23	0.089
CS Asymmetry by paresis at conversation	46	2.33 ±0.27	2.41 ±0.22	2.25 ±0.30	0.049
CS Asymmetry by paresis	46	2.47 ±0.21	2.54 ±0.16	2.41 ±0.24	0.043
CS Asymmetry by contracture at rest	46	2.59 ±0.26	2.58 ±0.26	2.60 ±0.26	0.82
CS Asymmetry by contracture at conversation	46	2.34 ±0.28	2.36 ±0.27	2.32 ±0.28	0.64
CS Asymmetry by contracture	46	2.45 ±0.26	2.45 ±0.26	2.44 ±0.26	0.86
CS Asymmetry by spasms at rest	46	2.80 ±0.24	2.76 ±0.28	2.85 ±0.18	0.22
CS Asymmetry by spasms at conversation	43	2.99 ±0.04	2.99 ±0.05	2.99 ±0.02	0.55
CS Asymmetry by spasms	43	69.4 ±3.26	68.9 ±3.96	70.0 ±2.28	0.29
CS Overactivity (spasms + contracture)	43	2.67 ±0.17	2.66 ±0.19	2.68 ±0.15	0.75
CS Motor strength	46	1.77 ±0.29	1.82 ±0.30	1.72 ±0.28	0.24
CS Number of syncinetic muscles	46	3.79 ±1.11	3.79 ±1.07	3.79 ±1.17	0.98
CS Intensity of synkinesis	46	1.61 ±0.24	1.61 ±0.20	1.61 ±0.29	0.97

¹Median [25%;75%]; n (%); Mean ±SD

²Wilcoxon rank sum test; Pearson's Chi-squared test; Welch Two Sample t-test

Tableau 13. Données cliniques selon l'ancienneté de la PFP (<2 ans vs. > 2ans)

Characteristic	N	Overall N = 46 ¹	Men N=12 ¹	Women N=34 ¹	p- value ²
Age, years	46	48.0 [38.0;60.8]	49.0 [40.0;56.8]	47.0 [37.3;60.8]	0.64
Time since lesion, years	46	2.13 [1.18;5.1]	1.59 [1.10;2.73]	2.64 [1.31;6.8]	0.18
Facial Palsy < 2y		23 (50.0%)	7 (58.3%)	16 (47.1%)	0.50
Facial Palsy >= 2y		23 (50.0%)	5 (41.7%)	18 (52.9%)	
Scores					
FaCE total	46	52.1 ±13.1	57.9 ±17.8	50.0 ±10.6	0.17
FaCE facial comfort	46	41.5 ±21.5	45.8 ±28.5	40.0 ±18.7	0.52
FaCE facial movement	46	40.9 ±18.0	42.4 ±19.9	40.4 ±17.5	0.77
FaCE lacrymal control	46	55.4 ±32.0	64.6 ±31.0	52.2 ±32.2	0.25
FaCE oral function	46	70.4 ±22.3	76.0 ±20.3	68.4 ±22.9	0.29
FaCE social function	46	62.2 ±21.1	72.4 ±25.2	58.6 ±18.6	0.10
FaCE ocular comfort	46	54.3 ±34.6	49.0 ±38.2	56.3 ±33.6	0.57
FACE-Q	46	21.0 ±5.4	25.1 ±6.4	19.6 ±4.19	0.014
SF12 PCS	46	17.5 ±2.08	18.3 ±1.67	17.2 ±2.15	0.068
SF12 MCS	46	21.1 ±2.65	22.6 ±3.03	20.5 ±2.33	0.049
HADS anxiety	46	7.0 ±2.84	6.3 ±2.46	7.3 ±2.96	0.30
HADS depression	46	5.0 ±2.99	4.75 ±3.74	5.1 ±2.73	0.78
SFGS Composite score	46	39.1 ±13.7	41.5 ±13.3	38.3 ±14.0	0.48
SFGS Resting symmetry score	46	13.7 ±2.46	14.2 ±1.95	13.5 ±2.62	0.38
SFGS Voluntary movement symmetry score	46	61.6 ±12.0	64.0 ±12.1	60.7 ±12.0	0.43
SFGS Synkinesis score	46	8.8 ±2.99	8.3 ±2.96	8.9 ±3.03	0.57
CS Asymmetry by paresis at rest	46	2.64 ±0.20	2.66 ±0.18	2.64 ±0.21	0.68
CS Asymmetry by paresis at conversation	46	2.33 ±0.27	2.43 ±0.25	2.30 ±0.27	0.13
CS Asymmetry by paresis	46	2.47 ±0.21	2.53 ±0.18	2.45 ±0.22	0.21
CS Asymmetry by contracture at rest	46	2.59 ±0.26	2.63 ±0.22	2.58 ±0.27	0.54
CS Asymmetry by contracture at conversation	46	2.34 ±0.28	2.48 ±0.26	2.29 ±0.27	0.043
CS Asymmetry by contracture	46	2.45 ±0.26	2.54 ±0.24	2.42 ±0.26	0.15
CS Asymmetry by spasms at rest	46	2.80 ±0.24	2.89 ±0.15	2.77 ±0.26	0.084
CS Asymmetry by spasms at conversation	43	2.99 ±0.04	2.99 ±0.03	2.99 ±0.04	0.71
CS Asymmetry by spasms	43	69.4 ±3.26	70.4 ±2.01	69.1 ±3.55	0.15
CS Overactivity (spasms + contracture)	43	2.67 ±0.17	2.75 ±0.13	2.64 ±0.17	0.059
CS Motor strength	46	1.77 ±0.29	1.78 ±0.24	1.77 ±0.31	0.87
CS Number of syncinetic muscles	46	3.79 ±1.11	3.57 ±1.18	3.87 ±1.09	0.45
CS Intensity of synkinesis	46	1.61 ±0.24	1.70 ±0.17	1.58 ±0.26	0.081

¹Median [25%;75%]; n (%); Mean ±SD

²Wilcoxon rank sum test; Pearson's Chi-squared test; Welch Two Sample t-test

Tableau 14. Données cliniques selon le sexe.

Characteristic	N	Overall N = 46 ¹	Age < 50y N=26 ¹	Age >= 50y N=20 ¹	p-value ²
Gender, women		34 (73.9%)	19 (73.1%)	15 (75.0%)	0.88
Time since lesion, years	46	2.13 [1.18;5.1]	3.12 [1.39;5.8]	1.46 [1.06;3.56]	0.094
Facial Palsy < 2y		23 (50.0%)	11 (42.3%)	12 (60.0%)	0.23
Facial Palsy >= 2y		23 (50.0%)	15 (57.7%)	8 (40.0%)	
Scores					
FaCE total	46	52.1 ±13.1	53.7 ±11.7	50.0 ±14.8	0.37
FaCE facial comfort	46	41.5 ±21.5	44.2 ±17.8	37.9 ±25.6	0.35
FaCE facial movement	46	40.9 ±18.0	44.2 ±18.8	36.7 ±16.3	0.15
FaCE lacrymal control	46	55.4 ±32.0	59.6 ±27.5	50.0 ±37.2	0.34
FaCE oral function	46	70.4 ±22.3	69.2 ±22.1	71.9 ±22.9	0.70
FaCE social function	46	62.2 ±21.1	62.5 ±19.6	61.9 ±23.5	0.92
FaCE ocular comfort	46	54.3 ±34.6	60.6 ±34.8	46.3 ±33.5	0.16
FACE-Q	46	21.0 ±5.4	22.3 ±5.0	19.4 ±5.4	0.070
SF12 PCS	46	17.5 ±2.08	17.9 ±1.75	17.0 ±2.39	0.15
SF12 MCS	46	21.1 ±2.65	21.3 ±2.58	20.7 ±2.77	0.42
HADS anxiety	46	7.0 ±2.84	7.0 ±2.63	7.1 ±3.16	0.88
HADS depression	46	5.0 ±2.99	4.81 ±3.11	5.3 ±2.88	0.62
SFGS Composite score	46	39.1 ±13.7	40.5 ±11.0	37.4 ±16.8	0.48
SFGS Resting symmetry score	46	13.7 ±2.46	13.5 ±2.75	14.0 ±2.05	0.45
SFGS Voluntary movement symmetry score	46	61.6 ±12.0	62.6 ±9.9	60.2 ±14.4	0.52
SFGS Synkinesis score	46	8.8 ±2.99	8.7 ±2.13	8.9 ±3.90	0.87
CS Asymmetry by paresis at rest	46	2.64 ±0.20	2.68 ±0.16	2.59 ±0.24	0.17
CS Asymmetry by paresis at conversation	46	2.33 ±0.27	2.36 ±0.24	2.30 ±0.31	0.53
CS Asymmetry by paresis	46	2.47 ±0.21	2.50 ±0.17	2.43 ±0.26	0.28
CS Asymmetry by contracture at rest	46	2.59 ±0.26	2.65 ±0.20	2.53 ±0.32	0.15
CS Asymmetry by contracture at conversation	46	2.34 ±0.28	2.41 ±0.23	2.25 ±0.31	0.064
CS Asymmetry by contracture	46	2.45 ±0.26	2.51 ±0.20	2.37 ±0.30	0.077
CS Asymmetry by spasms at rest	46	2.80 ±0.24	2.79 ±0.20	2.82 ±0.29	0.73
CS Asymmetry by spasms at conversation	43	2.99 ±0.04	2.99 ±0.02	2.98 ±0.06	0.58
CS Asymmetry by spasms	43	69.4 ±3.26	69.4 ±2.43	69.5 ±4.23	0.96
CS Overactivity (spasms + contracture)	43	2.67 ±0.17	2.70 ±0.12	2.63 ±0.22	0.21
CS Motor strength	46	1.77 ±0.29	1.76 ±0.28	1.79 ±0.32	0.73
CS Number of syncinetic muscles	46	3.79 ±1.11	4.00 ±1.01	3.51 ±1.20	0.15
CS Intensity of synkinesis	46	1.61 ±0.24	1.60 ±0.17	1.62 ±0.32	0.83

¹Median [25%;75%]; n (%); Mean ±SD

²Wilcoxon rank sum test; Pearson's Chi-squared test; Welch Two Sample t-test

Tableau 15. Données cliniques selon l'âge.

D. Discussion

Cette étude prospective sur la parésie faciale périphérique chronique (PFP) a exploré la validité de l'*Echelle de Créteil*, un nouvel outil conçu pour établir cliniquement deux distinctions importantes : la quantification de la parésie testée sur commande volontaire par rapport à la parésie sur commande automatique/émotionnelle, ainsi que des évaluations distinctes des trois principales formes d'hyperactivité qui affectent les patients : contracture, syncinésies et spasmes, dans chacune des deux situations de repos et de conversation. Les résultats démontrent la validité concurrente de l'*Echelle de Créteil* par rapport à l'échelle de référence actuelle (Sunnybrook Facial Grading System). La qualité de vie liée à la PFP est corrélée aux deux échelles, le score physique de la qualité de vie non spécifique (SF12) n'étant corrélé qu'à l'*Echelle de Créteil*.

Echantillon de l'étude

L'échantillon étudié dans cette étude de corrélation se révèle représentatif des patients souffrant d'une lésion chronique du nerf facial, avec une cause idiopathique prédominante (Bruins *et al.*, 2022). Le délai moyen depuis la lésion était plus long dans la présente étude que dans d'autres études ayant examiné les corrélations entre échelles cliniques et de qualité de vie ou les niveaux d'anxiété et de dépression avant/après injections de toxine botulique, les scores aux questionnaires auto-administrés et aux échelles cliniques étaient similaires (Bruins *et al.*, 2022; Amar *et al.*, 2024).

Critères de jugement et méthodologie de l'étude

A notre connaissance, cette étude est la seule qui quantifie cliniquement de manière aussi exhaustive les paramètres d'hypo- et d'hyperactivité faciale et de qualité de vie chez une population de patients ayant une PFP au stade chronique. En plus des performances motrices visualisées lors de l'examen clinique, quatre questionnaires ont permis d'interroger les patients sur leur qualité de vie spécifique liée à la PFP, leur bien-être physique, leur bien-être psychique,

leur niveau d'anxiété et de dépression ainsi que sur leur niveau d'auto-appréciation visuelle du visage. Cette étude est également la première à intégrer le questionnaire FACE-Q comme outil d'évaluation du retentissement esthétique perçu de la PFP chez le patient parétique facial au stade chronique et à explorer des corrélations avec les échelles cliniques et d'autres questionnaires.

Le visage est aujourd'hui considéré comme la partie du corps la plus importante d'un point de vue psychologique et la symétrie faciale est considérée comme l'un des principaux critères de beauté (Slade and Russell, 1973). La parésie faciale périphérique peut amener le patient à inhiber ses activités de communication avec son entourage, ce qui peut conduire à l'exclusion, l'activation des muscles faciaux en conversationnel augmentant encore l'asymétrie faciale par rapport au repos, comme cela a été constaté ici (Bradbury, Simons and Sanders, 2006).

L'absence de données manquantes et l'extraction de ces données à partir d'un projet de recherche de grande envergure, prospectif, contrôlé et randomisé plaident pour la robustesse des résultats présentés.

Validité de l'Echelle de Créteil

Les scores de l'Echelle de Créteil sont bien corrélés avec le SFGS, qui est considérée depuis 2015 comme l'échelle de référence dans l'évaluation des lésions du nerf facial, en particulier à son score composite, à son score de symétrie au mouvement volontaire ainsi qu'à son score de syncinésies, démontrant une bonne validité concurrente pour le score de force motrice (commande volontaire), le nombre moyen de muscles syncinétiques par effort, le score d'intensité des syncinésies et les scores d'asymétrie dues à la parésie (commande automatique / émotionnelle).

Il convient de relever qu'aucune corrélation n'a été établie avec le score de symétrie de repos du SFGS, qui est par ailleurs connu pour sa faible fiabilité inter-observateurs et sa faible sensibilité au changement (Ross, Fradet and Nedzelski, 1996). En pratique, le score de symétrie

de repos du SFGS ne permet pas de différencier l'asymétrie liée à la parésie de celle liée à la contracture. De plus, le faible nombre de régions étudiées au repos (fente palpébrale, sillon naso-génien et commissure buccale) ainsi que le faible nombre d'items proposés par région ne permet pas de distinguer suffisamment les différents types de parésie. Les scores d'asymétrie liée à la contracture et la fréquence des spasmes sur l'Echelle de Créteil ne sont pas corrélés avec les scores du SFGS, mais une fois encore, ces derniers ne permettent pas de quantifier spécifiquement les contractures.

Contrairement au SFGS, les scores de parésie de l'Echelle de Créteil sont corrélés - légèrement - avec le score PCS du SF-12. Il existe également une corrélation avec le Facial Clinimetric Evaluation (FaCE) qui est l'échelle de référence de l'évaluation de la qualité de vie spécifique à la PFP, en particulier pour le score de force motrice (commande volontaire) et les scores d'asymétrie liée à la parésie (commande automatico-émotionnelle) de l'Echelle de Créteil. En se concentrant sur 12 muscles distincts et en utilisant des scores de symétrie en 7 grades, la précision des scores de l'Echelle de Créteil permet probablement de mieux quantifier la gravité de la parésie que les outils actuellement disponibles.

La parésie comme déclencheur de l'hyperactivité ?

Le fait que le *nombre de muscles syncinétiques* soit corrélé au *score de force motrice* sur l'Echelle de Créteil ($r=-0,38$, $p<0,049$) est intéressant d'un point de vue physiologique, au-delà de l'hypothèse d'une réinnervation faciale aberrante. Pour les motoneurones des membres, il est bien établi que leur non-utilisation peut induire des formes d'hyperexcitabilité motoneuronale, en d'autres termes qu'il existe une relation causale probable entre la sous-activation d'un motoneurone et sa réponse naturelle d'augmentation de son niveau d'excitabilité intrinsèque (Lundbye-Jensen and Nielsen, 2008b, 2008a; Seynnes *et al.*, 2008). Le fait que le nombre de muscles syncinétiques augmente avec les niveaux de parésie peut refléter des mécanismes similaires au niveau du motoneurone facial, les patients souffrant d'une

PFP sévère ayant tendance à réduire l'utilisation de leur commande faciale - même si la lésion est en aval du motoneurone augmentant ainsi les risques d'hyperexcitabilité motoneuronale en conséquence.

Mesure de la parésie faciale : sur commande volontaire ou sur commande automatique / émotionnelle ?

La différence entre les scores de *force motrice* ($1,77 \pm 0,29$) qui testent l'amplitude du mouvement lors d'un effort volontaire maximal, plus sévères que les scores d'asymétrie liée à la parésie en conversation ($2,33 \pm 0,27$) signale probablement comme dans l'évaluation quantifiée d'autres troubles neurologiques en neuroéducation, que le fait de soumettre le système nerveux à une contrainte maximale est la meilleure stratégie pour optimiser la *sensibilité* de l'évaluation (Hermsdörfer *et al.*, 1999). Nous considérons ce résultat comme un argument fort pour continuer à mesurer soigneusement les scores de *force motrice* lors de l'évaluation de la PFP, car ils sont probablement ceux qui fournissent la meilleure indication de l'étendue de la lésion nerveuse.

Importance de l'analyse en conversation

Les voies de la commande faciale volontaire sont rarement utilisées en dehors des testing moteurs en clinique, et les recommandations récentes n'incluent pas l'évaluation du contrôle moteur automatico-émotionnel dans le cadre de l'évaluation de la PFP (Berner *et al.*, 2019). C'est regrettable car les cliniciens s'abstiennent alors d'évaluer les voies automatico-émotionnelles, bien qu'elles soient largement prépondérantes dans le contrôle moteur cervico-facial quotidien.

A notre connaissance, l'Echelle de Créteil est la seule échelle clinique qui propose une évaluation quantifiée des altérations de symétrie par parésie, par contracture et par spasmes au cours d'une conversation spontanée. En pratique, l'évaluateur pose au patient des questions

ouvertes, liées à la journée, y compris des questions amusantes si possible, et enregistre la réponse faciale pendant 30 secondes.

Dans cette étude, l'altération de symétrie par parésie pendant la conversation sur l'Echelle de Créteil était corrélée avec le score total de la FaCE ainsi qu'avec ses sous-scores de mouvement facial et de contrôle lacrymal, montrant que l'expression motrice faciale automatico-émotionnelle a un retentissement sur la qualité de vie. En outre, l'altération de la symétrie liée à la contracture pendant la conversation cotée par l'Echelle de Créteil était corrélée avec le score moyen de muscles syncinétiques par effort, tous deux reflétant potentiellement l'hyperexcitabilité des motoneurones faciaux en tant que mécanisme commun (Cossu *et al.*, 1999). L'analyse faciale pendant la conversation permet donc d'approcher le contrôle automatico-émotionnel de la motricité faciale, et semble donc particulièrement intéressante car elle est liée à la qualité de vie spécifique des patients atteints de PFP.

Pertinence de l'évaluation spécifique de la contracture

L'Echelle de Créteil est le seul outil clinique proposant de quantifier la contracture faciale post-PFP au stade chronique sur 12 régions faciales, au cours d'un enregistrement de 30 secondes au repos suivi de 30 secondes de conversation spontanée.

Les quantifications des altérations de symétrie liée à la contracture (scores spécifiques de symétrie au repos, pendant la conversation et moyenne des deux) sont fortement corrélées entre elles et inversement corrélées au nombre de muscles syncinétiques. En revanche, elles ne sont corrélées à aucun autre questionnaire ni score du SFGS, ce qui peut s'expliquer par le fait que cette composante n'est pas explicitement évaluée dans les questionnaires proposés, ni recherchée dans le SFGS. Le rétrécissement de la fente palpébrale ou le creusement du sillon naso-génien recherchés dans le score de symétrie de repos du SFGS, qui indiquent pourtant une contracture hémifaciale, sont confondus dans le score SFGS avec l'élargissement de la fente palpébrale et l'effacement du sillon naso-génien, qui traduisent une parésie. Le score SFGS ne

permet donc pas de différencier contracture et parésie. Le réseau de corrélation (Figure 65) montre néanmoins que cette composante est corrélée avec les autres formes d'hyperactivité, à savoir les spasmes et les syncinésies. Le développement d'un questionnaire subjectif capturant l'opinion du patient spécifiquement sur cette composante pourrait être intéressant. Enfin, il sera pertinent de suivre les altérations de la symétrie liée à la contracture sur l'Echelle de Créteil de manière longitudinale sur un échantillon plus large de patients, par exemple en incluant des patients en phase aiguë sans aucune hyperactivité et de les surveiller cliniquement dans le temps pour détecter l'émergence de tels signes cliniques d'hyperactivité.

Limites de l'étude ou des outils d'évaluation proposés

Questionnement sur l'intérêt de l'évaluation de la fréquence des spasmes

Les scores de fréquence des spasmes de l'Echelle de Créteil n'étaient corrélés avec aucun autre score dans cette étude. Ceci pourrait être dû aux faits que les spasmes sont un phénomène distinct de tous les autres et qu'ils n'ont pas de retentissement significatif sur la qualité de vie perçue. Cependant, une autre interprétation pourrait être la sensibilité insuffisante de notre évaluation des spasmes dans la présente étude. Le nombre exact de spasmes sur 30 secondes a été enregistré séparément (non inclus dans le présent rapport de thèse) ; ce paramètre quantitatif pourrait s'avérer plus sensible que la cotation ordinale utilisée ici.

Il est intéressant de noter que les spasmes présents au repos ont quasiment disparu en conversation. Il est possible que l'activation faciale descendante liée à l'activité conversationnelle soit associée à une dépolarisation de la membrane motoneuronale ou des axones du motoneurone facial à un niveau où les courants entrants voltage-dépendants potentiellement responsables des spasmes ne sont plus opérationnels (Lin *et al.*, 2000). L'exploration de cette hypothèse nécessiterait évidemment des explorations physiologiques spécifiques.

Enfin, dans la plupart des cas, les spasmes ne sont pas ressentis subjectivement par les patients, bien que ce point nécessiterait également une investigation spécifique, ce qui peut aussi expliquer l'absence de corrélations avec les questionnaires de qualité de vie et d'esthétique perçues. D'un point de vue clinique, les spasmes sont facilement visibles et individualisables par le clinicien, et leur quantification semble importante pour le thérapeute. Les effets des thérapies, telles que certains programmes de rééducation ou la toxine botulique, pourraient un jour montrer l'importance de ce score.

Il n'existe à ce jour dans la littérature aucun questionnaire qui interroge le patient sur les conséquences directes de ces spasmes. Il a récemment été proposé de transposer un questionnaire validé dans le spasme hémifacial essentiel – une entité *distincte* de la PFP et de ses composantes neuromusculaires – appelé *Hemifacial Spasm 30* (HFS-30), dans l'évaluation du patient PFP (Amar *et al.*, 2024). Une amélioration du score total HFS-30 a été montrée à un et quatre mois après des injections de toxine botulique réalisées au stade chronique (Amar *et al.*, 2024). Cependant, la physiopathologie et probablement la sévérité du *spasme hémifacial essentiel* diffèrent de celle des spasmes induits par la PFP (Tan *et al.*, 2004).

Il convient de noter que le score de symétrie de repos du SFGS dans cette étude n'était également corrélé avec aucune autre variable. Sa pertinence semble discutable, car il est aussi le moins fiable des quatre scores SFGS (Ross, Fradet and Nedzelski, 1996; Cabrol *et al.*, 2021).

Absence de corrélation retrouvée entre les scores de l'échelle SGFS et de l'Echelle de Créteil et les niveaux d'anxiété et de dépression

Les niveaux d'anxiété sont en corrélation avec le score total et le score des mouvements faciaux de l'échelle FaCE ainsi qu'avec l'auto-appréciation esthétique du visage par le biais du FACE-Q. Le niveau de dépression est également corrélé avec le FACE-Q et négativement lié au score total et au score de fonction sociale de la FaCE. Cependant, nous n'avons retrouvé aucune corrélation entre les neuf scores de l'Echelle de Créteil ou les quatre scores du SFGS dans cette étude. Cela peut être dû à de faibles corrélations et/ou à une puissance d'étude

Perspectives

Les données recueillies dans cette étude, en particulier celles des échelles cliniques (Echelle de Créteil et SFGS), seront corrélées avec les indices biomécaniques des évaluations faciales en 3D collectées dans VISAGE afin de poursuivre l'étude de la validité de l'Echelle de Créteil. La corrélation sera spécifiquement explorée entre les scores de l'Echelle de Créteil et du SFGS et les indices d'asymétrie et de Procruste calculés à partir des séquences d'enregistrement du visage au repos (30 secondes), pendant 10 mouvements volontaires distincts d'amplitude maximale et pendant l'enregistrement d'un sourire spontané (Guihard, Gracies and Baude, 2022).

La consolidation de la validation de l'Echelle de Créteil et sa diffusion seront complétées par la poursuite du projet VISAGE. Une étude de *fiabilité* intra- et inter-évaluateurs (n=4 évaluateurs) sera également réalisée afin de déterminer les coefficients de corrélations intra-classe respectifs des scores de l'échelle, ainsi que les différences brutes minimales au sein et entre les évaluateurs.

Enfin, la sensibilité au changement des scores de l'Echelle de Créteil sera analysée entre J1 et J180, entourant ainsi 6 mois de rééducation faciale, dans cette même cohorte de patients.

E. Conclusion

Cette étude est la première à intégrer l'utilisation de l'Echelle de Créteil composée de neuf scores, montrant des validités concourante et concurrente qui semblent pertinentes par rapport aux échelles de référence SFGS et FaCE. Cette étude est également la première à combiner un grand nombre de données issues de différents questionnaires dans une population de patients présentant une parésie faciale périphérique unilatérale chronique, quelle qu'en soit la cause. Elle s'intègre dans le cadre d'une étude prospective de grande envergure visant à quantifier cliniquement et caractériser sur le plan cinématique les différents processus neuromusculaires qui surviennent à distance après une lésion du nerf facial.

Dans l'ensemble, les résultats présentés ici montrent que l'Echelle de Créteil est bien corrélée au SFGS, mais qu'elle s'en distingue dans son évaluation spécifique de chacune des composantes neuromusculaires de la PFP, notamment la contracture ou les spasmes, par l'inclusion de l'évaluation en conversation et par distinction des quantifications de la parésie sur commande volontaire et de la parésie sur commande automatico-émotionnelle. Enfin, l'échelle FACE-Q semble être un outil d'évaluation intéressant pour les patients atteints de PFP, étant donné les corrélations élevées obtenues avec les autres scores des questionnaires. Les prochaines explorations de corrélation entre les données cliniques présentées ici et les données biomécaniques/cinématiques obtenues dans l'étude VISAGE nous permettront donc d'étudier la validité de construit de l'Echelle de Créteil et de mieux caractériser les composantes neuromusculaires de la PFP.

CHAPITRE V : Conclusions et perspectives

A. Conclusions

Le chapitre I a exposé la neuroanatomie du nerf facial et des nerfs sensitifs de la face et du cou ainsi que l'anatomie des muscles peauciers du visage et du cou tout en tentant de décrire la neurophysiologie des voies de commande volontaires mais aussi automatiques / émotionnelles de la musculature faciale impliquant des structures dont le rôle n'est pas encore parfaitement élucidé, comme celui du système limbique (cerveau émotionnel) dans la prépondérante commande motrice faciale non volontaire. Une nouvelle phénoménologie est proposée qui permet de distinguer quatre composantes neuromusculaires qui peuvent survenir au stade chronique de la parésie faciale périphérique : parésie, contracture, spasmes et syncinésies hémifaciales.

Le chapitre II a présenté l'étude VISAGE, pierre angulaire de ce travail de thèse, qui s'y inscrit à la fois dans sa phase « préclinique » sur sujets sans lésion du nerf facial et dans sa phase clinique réalisée sur sujets présentant une parésie faciale périphérique au stade chronique. Même si les collections de données cliniques menées dans le cadre de cette thèse se vont pas au-delà du premier jour d'évaluation des participants à la phase clinique, notre travail a permis de mettre en avant la stratégie des contrats d'autorééducation guidée et la nécessité de disposer d'outils précis de quantification motrice faciale afin de mieux suivre l'évolution de nos patients, notamment une fois sous traitement, et de mieux caractériser les différentes composantes neuromusculaires qui entravent leur qualité de vie afin de les accompagner et de les traiter de façon adéquate et ciblée notamment à la phase chronique, qui se caractérise trop souvent par une forme d'abandon du combat par le corps médical.

Le chapitre III a permis, à travers la phase préclinique de VISAGE, de mettre au point un système d'analyse tridimensionnelle des mouvements faciaux à travers une étude prospective

sur 53 sujets indemnes de lésion du nerf facial. Nous avons souhaité que ce dispositif puisse un jour être utilisé en pratique clinique courante donc cliniquement acceptable par le patient, réalisable aisément en consultation sur une durée raisonnable. Le protocole d'évaluation mis en place s'est avéré reproductible dans sa fiabilité test-retest de la pose des 27 marqueurs faciaux utilisés, réalisable en moins de 45 minutes sans effet secondaire et a permis l'obtention d'une base de données normatives tridimensionnelles faciales sur 10 muscles faciaux. Cette phase a également permis de développer des indices d'asymétrie et des indices plus spécifiques de Procruste qui puissent être transposables et comparables à la cohorte de participants à la phase clinique de VISAGE. Enfin, deux seuils sain-pathologique d'asymétrie ont pu être proposés.

Le chapitre IV a permis de valider en partie une nouvelle échelle clinique de motricité faciale développée depuis 2012, l'Echelle de Créteil, qui a pour objectif de quantifier les quatre composantes neuromusculaires de la parésie faciale périphérique au stade chronique en analysant le visage au repos, lors de 12 mouvements faciaux *volontaires* d'amplitude maximale mais également lors d'une conversation spontanée de 30 secondes, permettant d'accéder à l'implication des voies *automatiques* et *émotionnelles* de la commande motrice faciale. Nous avons observé de très fortes corrélations entre plusieurs scores de l'Echelle de Créteil et de l'échelle de référence d'évaluation de la lésion du nerf facial (Sunnybrook Facial Grading System). L'Echelle de Créteil était également corrélée aux échelles de qualité de vie globale (composante physique du Short-Form 12) et de qualité de vie spécifique de la parésie faciale périphérique (Facial Clinimetric Evaluation). Elle a aussi permis de démontrer une corrélation entre *intensité de la parésie*, mesurée en commande volontaire, et *étendue des syncinésies*, corrélation intéressante sur le plan neurophysiologique et non clairement mise à jour à notre connaissance dans la littérature préalable.

Dans l'ensemble, les travaux menés dans cette thèse vont contribuer à introduire dans la littérature une phénoménologie clarifiée de la parésie faciale périphérique ainsi qu'une échelle

clinique d'évaluation permettant de caractériser chaque phénomène, tout en ayant accès aux différents types de commande de la musculature faciale : la voie volontaire, qui reste trop souvent la seule évaluée en clinique avec les 'testing' moteurs faciaux *vs.* la voie automatico-émotionnelle, pourtant prépondérante dans la vie quotidienne.

B. Perspectives

a. Etude VISAGE

i. Au niveau clinique

1. Evolution des paramètres cliniques

La poursuite de l'étude VISAGE et notamment de sa phase clinique permettra de disposer dans le temps de données de surveillance clinique quantifiée d'échelles de motricité faciale mais également de qualité de vie globale, de qualité de vie spécifique, de niveaux d'anxiété et de dépression et d'auto-appréciation esthétique du visage, et d'étudier l'impact de six mois de deux types de rééducation sur chacun de ces paramètres.

La comparaison des deux groupes de traitement entre eux permettra également de savoir si une récupération motrice est possible au stade chronique et si la stratégie des contrats d'autorééducation guidée impliquant un double travail de renforcement et de précision de la commande volontaire doit ou non être mise en avant par rapport à une rééducation plus conventionnelle.

2. Validation de l'Echelle de Créteil

La poursuite de la validation de l'Echelle de Créteil se fera à trois niveaux. Tout d'abord, en corrélant chacun de ses scores à des indices spécifiques issus des évaluations biomécaniques des 46 patients de l'étude présentée dans le chapitre IV. Ensuite, en étudiant la sensibilité au changement de l'Echelle de Créteil avant et après les six mois de rééducation des participants à la phase clinique de VISAGE et en déterminant quelles sont les composantes qui évoluent le

mieux sous l'effet d'un programme intensif de renforcement moteur et de précision des muscles faciaux. Notre hypothèse – et osons dire notre pressentiment – est que la parésie devrait être améliorée, et en particulier le score de force motrice, les scores d'asymétrie au repos mais également les scores en conversation liés à la commande émotionnelle des muscles faciaux.

L'amélioration ou même la simple stabilité des scores en lien avec les différentes formes d'hyperactivité musculaire faciale, en particulier ceux liés aux syncinésies, pourrait permettre à la communauté de s'affranchir, par ces données prospectives précises obtenues en simple aveugle, d'un vieux dogme selon lequel le renforcement moteur serait source d'hyperactivité motrice faciale. Cela permettrait bien entendu aussi de proposer de nouveaux programmes de rééducation à nos patients.

Enfin, l'étude de la *fiabilité* de l'Echelle de Créteil sera réalisée en demandant à quatre évaluateurs (deux médecins spécialistes en Médecine Physique et de Réadaptation, un kinésithérapeute maxillo-facial et un orthophoniste spécialisé en PFP) de relire et de coter les vidéos de 50 patients de la phase clinique de VISAGE afin de déterminer la fiabilité intra- et inter-évaluateurs de l'échelle.

ii. Au niveau biomécanique

1. Etude des paramètres biomécaniques

L'analyse des indices biomécaniques définis chez le sujet sans lésion du nerf facial sera transposée à la cohorte des participants à la phase clinique afin d'obtenir une deuxième base de données tridimensionnelles faciales concernant le sujet présentant une parésie faciale périphérique. Cette base de données est pressentie plus hétérogène que la base normative, les profils des patients parétiques faciaux étant cliniquement parfois très différents (parésie majeure *vs.* parésie modérée ; hypoactif *vs.* hyperactif, etc.). La caractérisation des phénomènes séparément détectés cliniquement via l'Echelle de Créteil sera poursuivie au niveau biomécanique afin de mieux valider la clarification de la phénoménologie que nous proposons.

En parallèle du suivi des paramètres cliniques, les paramètres issus des évaluations biomécaniques tridimensionnelles faciales permettront de quantifier l'évolution des indices de symétrie et de Procruste des patients tout en les corrélant aux données cliniques.

2. Analyse de nouveaux paramètres : vitesse et accélération

De nouveaux paramètres cinétiques seront également étudiés, tels que la vitesse et l'accélération des mobilisations musculaires faciales afin de mettre en évidence que l'amplitude du mouvement n'est pas le seul paramètre altérant la symétrie faciale des patients au quotidien. Ces nouveaux paramètres seront étudiés dans un premier temps dans la base de données tridimensionnelles des sujets de la phase préclinique, avant d'être transposés et analysés chez les sujets avec PFP.

3. Comparaison des sourires volontaire et émotionnels

Enfin, nous étudierons à l'aide des paramètres suscités (amplitude, vitesse et accélération) les différences d'élicitation entre un sourire volontaire et un sourire émotionnel. En effet, chaque enregistrement 3D des phases préclinique et clinique a compris la réalisation d'une séquence de quelques secondes durant laquelle l'évaluation était conçue pour augmenter la probabilité de déclencher un sourire automatique (automatico-émotionnel) chez le sujet évalué. Nous anticipons que la vitesse de déplacement sera plus rapide dans le cas d'un sourire lié aux émotions et qu'il occasionnera davantage de syncinésies pathologiques chez le sujet avec PFP.

b. Etude FACETOX

L'étape d'après l'étude VISAGE est déjà engagée avec un second projet appelé FACETOX, financé par l'appel à projet PHRC-National 2022 à hauteur de 545 k€, pour lequel le début des inclusions est prévu début 2026.

Cette étude multicentrique française, écrite et portée par la candidate, s'intéressera, à la différence de VISAGE, au stade aigu de la PFP idiopathique, et en particulier aux effets

d'injections de toxine botulique réalisées de façon répétée (trois cycles par patient) durant la première année qui suit la lésion sur le côté sain du visage, la cible étant l'hyperactivation motrice de l'hémiface saine. Les preuves existantes dans la littérature et dans la pratique clinique de l'investigateur coordonnateur du projet suggèrent que ces injections amélioreraient la vitesse de récupération des sujets, et diminueraient le développement de signes d'hyperactivité motrice faciale du côté parétique sur le long terme.

Les principaux outils de mesure et de quantification de VISAGE seront de nouveau utilisés, échelles cliniques, auto-questionnaires et casque d'évaluation tridimensionnelle (pour les centres de Paris et de Créteil seulement pour le casque). Ils permettront de caractériser cliniquement et cinématiquement l'hyperactivation musculaire faciale du côté sain du visage chez le sujet parétique facial au stade aigu mais aussi de la suivre dans le temps tout en détectant l'émergence de signes d'hyperactivité motrice faciale du côté parétique sur le long cours, la durée de participation des patients étant fixée à 24 mois.

Le schéma de l'étude FACETOX sera celui d'un essai contrôlé randomisé en deux groupes parallèles avec un groupe traité par injections régulières de toxine botulique durant la première année qui suit la PFP *vs.* injections répétées de placebo.

BIBLIOGRAPHIE

Abe, T. *et al.* (2019) ‘Assessments of Facial Muscle Thickness by Ultrasound in Younger Adults: Absolute and Relative Reliability’, *Cosmetics*, 6(4), p. 65. Available at: <https://doi.org/10.3390/cosmetics6040065>.

Abrams, P. *et al.* (2016) ‘Electronic bladder diaries of differing duration versus a paper diary for data collection in overactive bladder’, *Neurourology and Urodynamics*, 35(6), pp. 743–749. Available at: <https://doi.org/10.1002/nau.22800>.

Ackerman, A.M. and Shapiro, E.S. (1984) ‘Self-monitoring and work productivity with mentally retarded adults’, *Journal of Applied Behavior Analysis*, 17(3), pp. 403–407. Available at: <https://doi.org/10.1901/jaba.1984.17-403>.

Adour, K.K. *et al.* (1978) ‘The true nature of Bell’s palsy: analysis of 1,000 consecutive patients’, *The Laryngoscope*, 88(5), pp. 787–801. Available at: <https://doi.org/10.1002/lary.1978.88.5.787>.

Alfen, N.V. *et al.* (2013) ‘Quantitative facial muscle ultrasound: feasibility and reproducibility’, *Muscle & Nerve*, 48(3), pp. 375–380. Available at: <https://doi.org/10.1002/mus.23769>.

de Almeida, J.R. *et al.* (2014) ‘Management of Bell palsy: clinical practice guideline’, *CMAJ: Canadian Medical Association journal = journal de l’Association medicale canadienne*, 186(12), pp. 917–922. Available at: <https://doi.org/10.1503/cmaj.131801>.

Amar, J. *et al.* (2024) ‘Impact of Botulinum Toxin Injections on Quality of Life of Patients with Long-Standing Peripheral Facial Palsy’, *Toxins*, 16(3), p. 140. Available at: <https://doi.org/10.3390/toxins16030140>.

Arioz Habibi, H. *et al.* (2018) ‘Quantitative Assessment of Thyroid, Submandibular, and Parotid Glands Elasticity With Shear-Wave Elastography in Children’, *Ultrasound Quarterly*, 34(2), pp. 58–61. Available at: <https://doi.org/10.1097/RUQ.0000000000000352>.

Arnold, D. *et al.* (2023) ‘Selective zygomaticus muscle activation by ball electrodes in synkinetically reinnervated patients after facial paralysis’, *Frontiers in Rehabilitation Sciences*, 4, p. 1205154. Available at: <https://doi.org/10.3389/fresc.2023.1205154>.

Bajaj-Luthra, A. *et al.* (1998) ‘Quantitation of Patterns of Facial Movement in Patients with Ocular Synkinesis’, *Plastic and Reconstructive Surgery - Global Open*, 101(6), pp. 1473–1480.

Bandini, A. *et al.* (2021) ‘A New Dataset for Facial Motion Analysis in Individuals With Neurological Disorders’, *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 25(4), pp. 1111–1119. Available at: <https://doi.org/10.1109/JBHI.2020.3019242>.

Banks, C.A. *et al.* (2015) ‘Clinician-Graded Electronic Facial Paralysis Assessment: The eFACE’, *Plastic and Reconstructive Surgery*, 136(2), pp. 223e–230e. Available at: <https://doi.org/10.1097/PRS.0000000000001447>.

Banks, C.A. *et al.* (2017) 'Worldwide Testing of the eFACE Facial Nerve Clinician-Graded Scale', *Plastic and Reconstructive Surgery*, 139(2), pp. 491e–498e. Available at: <https://doi.org/10.1097/PRS.0000000000002954>.

Bao, T. *et al.* (2019) 'Quantitative assessment of symmetry recovery in navigation-assisted surgical reduction of zygomaticomaxillary complex fractures', *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 47(2), pp. 311–319. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2018.12.003>.

Barry, P. *et al.* (2019) 'Validation of French versions of the Facial Disability Index and the Facial Clinimetric Evaluation Scale, specific quality of life scales for peripheral facial palsy patients', *Clinical otolaryngology: official journal of ENT-UK ; official journal of Netherlands Society for Oto-Rhino-Laryngology & Cervico-Facial Surgery*, 44(3), pp. 313–322. Available at: <https://doi.org/10.1111/coa.13294>.

Baud, R. *et al.* (2005) *Version Francophone de la Terminologia Anatomica*. (Journées Francophones d'Informatique Médicale).

Baude, M. *et al.* (2012) 'Self-rehabilitation program of fatiguing series of maximal contraction exercises in chronic peripheral facial paresis', p. 55:e295.

Baude, M. *et al.* (2018) 'Degree of praxis of command for facial muscles in healthy individuals to develop a new clinical scale for facial motor function in peripheral facial paresis', p. 61:e26.

Baude, M. *et al.* (2023) 'Guided Self-rehabilitation Contract vs conventional therapy in chronic peripheral facial paresis: VISAGE, a multicenter randomized controlled trial', *BMC neurology*, 23(1), p. 148. Available at: <https://doi.org/10.1186/s12883-023-03096-8>.

Baude, M., Hutin, E. and Gracies, J.-M. (2015) 'A Bidimensional System of Facial Movement Analysis Conception and Reliability in Adults', *BioMed Research International*, 2015, pp. 1–8. Available at: <https://doi.org/10.1155/2015/812961>.

Ben Mansour, K. *et al.* (2014) 'Analysis of mimic facial movements based on motion capture', *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 17(sup1), pp. 78–79. Available at: <https://doi.org/10.1080/10255842.2014.931142>.

Bercoff, J., Tanter, M. and Fink, M. (2004) 'Supersonic shear imaging: a new technique for soft tissue elasticity mapping', *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 51(4), pp. 396–409. Available at: <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2004.1295425>.

Berner, J.E. *et al.* (2019) 'Facial synkinesis outcome measures: A systematic review of the available grading systems and a Delphi study to identify the steps towards a consensus', *Journal of plastic, reconstructive & aesthetic surgery: JPRAS*, 72(6), pp. 946–963. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.bjps.2019.03.011>.

Bertin, C. and Gracies, J.-M. (2022) 'Long-term stabilization of motor capacities using Guided Self-rehabilitation Contracts (GSC) in parkinsonism', *J Int Soc Pjys Rehabil Med*, pp. 119–411.

Beurskens, C.H.G. and Heymans, P.G. (2006) 'Mime therapy improves facial symmetry in people with long-term facial nerve paresis: a randomised controlled trial', *The Australian Journal of Physiotherapy*, 52(3), pp. 177–183. Available at: [https://doi.org/10.1016/s0004-9514\(06\)70026-5](https://doi.org/10.1016/s0004-9514(06)70026-5).

Beurskens, C.H.G., Oosterhof, J. and Nijhuis-van der Sanden, M.W.G. (2010) 'Frequency and location of synkineses in patients with peripheral facial nerve paresis', *Otology & Neurotology: Official Publication of the American Otological Society, American Neurotology Society [and] European Academy of Otology and Neurotology*, 31(4), pp. 671–675. Available at: <https://doi.org/10.1097/MAO.0b013e3181d8d84d>.

Bhatia, K. *et al.* (2012) 'Reliability of Shear Wave Ultrasound Elastography for Neck Lesions Identified in Routine Clinical Practice', *Ultraschall in der Medizin - European Journal of Ultrasound*, 33(05), pp. 463–468. Available at: <https://doi.org/10.1055/s-0032-1325428>.

Binder, M.D., Hirokawa, N. and Windhorst, U. (eds) (2009) 'Behavioral Plasticity', in *Encyclopedia of Neuroscience*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 372–372. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-540-29678-2_594.

Bjelland, I. *et al.* (2002) 'The validity of the Hospital Anxiety and Depression Scale. An updated literature review', *Journal of Psychosomatic Research*, 52(2), pp. 69–77. Available at: [https://doi.org/10.1016/s0022-3999\(01\)00296-3](https://doi.org/10.1016/s0022-3999(01)00296-3).

Bookstein, F.L. (1997) 'Shape and the Information in Medical Images: A Decade of the Morphometric Synthesis', *Computer vision and image understanding*, 66(2), pp. 97–118.

Bradbury, E.T., Simons, W. and Sanders, R. (2006) 'Psychological and social factors in reconstructive surgery for hemi-facial palsy', *Journal of plastic, reconstructive & aesthetic surgery: JPRAS*, 59(3), pp. 272–278. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.bjps.2005.09.003>.

Brichacek, M.A. *et al.* (2013) 'Stapedial Synkinesis Causing Change in Hearing Threshold With Facial Motion', *Otology & Neurotology*, 34(4), pp. 762–765. Available at: <https://doi.org/10.1097/MAO.0b013e31827f1909>.

Briche, T. *et al.* (1999) '[Rehabilitation of the paralyzed face by hypoglossal-facial nerve anastomosis. An analysis of 7 cases]', *Annales D'oto-Laryngologie Et De Chirurgie Cervico Faciale: Bulletin De La Societe D'oto-Laryngologie Des Hopitaux De Paris*, 116(4), pp. 228–236.

Bruins, T.E. *et al.* (2021) 'Associations Between Clinician-Graded Facial Function and Patient-Reported Quality of Life in Adults With Peripheral Facial Palsy: A Systematic Review and Meta-analysis', *JAMA Otolaryngology–Head & Neck Surgery*, 147(8), p. 717. Available at: <https://doi.org/10.1001/jamaoto.2021.1290>.

Bruins, T.E. *et al.* (2022) 'Interpreting Quality-of-Life Questionnaires in Patients with Long-Standing Facial Palsy', *Facial Plastic Surgery & Aesthetic Medicine*, 24(2), pp. 75–80. Available at: <https://doi.org/10.1089/fpsam.2020.0604>.

Bylund, N. *et al.* (2021) 'Quality of Life in Bell's Palsy: Correlation with Sunnybrook and House-Brackmann Over Time', *The Laryngoscope*, 131(2), pp. E612–E618. Available at: <https://doi.org/10.1002/lary.28751>.

Cabrol, C. *et al.* (2021) 'Sunnybrook Facial Grading System: Intra-rater and Inter-rater Variabilities', *Otology & Neurotology: Official Publication of the American Otological Society, American Neurotology Society [and] European Academy of Otology and Neurotology*, 42(7), pp. 1089–1094. Available at: <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000003140>.

- Cassi, D. *et al.* (2019) ‘Three-dimensional evaluation of facial asymmetry in patients with hemifacial microsomia using stereophotogrammetry’, *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 47(1), pp. 179–184. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2018.11.011>.
- Cattaneo, L. and Pavesi, G. (2014) ‘The facial motor system’, *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 38, pp. 135–159. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.11.002>.
- Cevidane, L.H.S. *et al.* (2011) ‘Three-dimensional quantification of mandibular asymmetry through cone-beam computerized tomography’, *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 111(6), pp. 757–770. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tripleo.2011.02.002>.
- Chang, P.-H. *et al.* (2020) ‘Ultrasound measurements of superficial and deep masticatory muscles in various postures: reliability and influencers’, *Scientific Reports*, 10(1), p. 14357. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71378-z>.
- Choi, D. and Raisman, G. (2004) ‘After facial nerve damage, regenerating axons become aberrant throughout the length of the nerve and not only at the site of the lesion: an experimental study’, *British Journal of Neurosurgery*, 18(1), pp. 45–48. Available at: <https://doi.org/10.1080/02688690410001660454>.
- Cooper, L., Lui, M. and Nduka, C. (2017) ‘Botulinum toxin treatment for facial palsy: A systematic review’, *Journal of plastic, reconstructive & aesthetic surgery: JPRAS*, 70(6), pp. 833–841. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.bjps.2017.01.009>.
- Cossu, G. *et al.* (1999) ‘Reflex excitability of facial motoneurons at onset of muscle reinnervation after facial nerve palsy’, *Muscle & Nerve*, 22(5), pp. 614–620. Available at: [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-4598\(199905\)22:5<614::aid-mus10>3.0.co;2-g](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-4598(199905)22:5<614::aid-mus10>3.0.co;2-g).
- Coulson, S.E. *et al.* (2005) ‘Reliability of the “Sydney,” “Sunnybrook,” and “House Brackmann” Facial Grading Systems to Assess Voluntary Movement and Synkinesis after Facial Nerve Paralysis’, *Otolaryngology–Head and Neck Surgery*, 132(4), pp. 543–549. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.otohns.2005.01.027>.
- Coulson, S.E., Croxson, G.R. and Gilleard, W.L. (1999) ‘Three-Dimensional Quantification of “Still” Points during Normal Facial Movement’, *Annals of Otolaryngology, Rhinology & Laryngology*, 108(3), pp. 265–268. Available at: <https://doi.org/10.1177/000348949910800308>.
- Coulson, S.E., Croxson, G.R. and Gilleard, W.L. (2000) ‘Quantification of the Three-Dimensional Displacement of Normal Facial Movement’, *Annals of Otolaryngology & Laryngology*, 109(5), pp. 478–483. Available at: <https://doi.org/10.1177/000348940010900507>.
- Dagnes, N. *et al.* (2018) ‘What is the best set of markers for facial movements recognition?’, *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 61, pp. e455–e456. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2018.05.1062>.
- Dagnes, N. *et al.* (2019) ‘Optimal marker set assessment for motion capture of 3D mimic facial movements’, *Journal of Biomechanics*, 93, pp. 86–93. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.06.012>.

Daly, J.J. and Ruff, R.L. (2007) 'Construction of efficacious gait and upper limb functional interventions based on brain plasticity evidence and model-based measures for stroke patients', *TheScientificWorldJournal*, 7, pp. 2031–2045. Available at: <https://doi.org/10.1100/tsw.2007.299>.

Dauber, W. (2007) *Lexique illustré d'anatomie Feneis*. Flammarion. (Atlas de poche).

Desmurget, M., Bonnetblanc, F. and Duffau, H. (2007) 'Contrasting acute and slow-growing lesions: a new door to brain plasticity', *Brain: A Journal of Neurology*, 130(Pt 4), pp. 898–914. Available at: <https://doi.org/10.1093/brain/awl300>.

Devriese, P.P. *et al.* (1990) 'Incidence, prognosis and recovery of Bell's palsy. A survey of about 1000 patients (1974-1983)', *Clinical Otolaryngology and Allied Sciences*, 15(1), pp. 15–27. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2273.1990.tb00427.x>.

Díaz-Aristizabal, U. *et al.* (2021) 'Effect of botulinum toxin typeA in functionality, synkinesis and quality of life in peripheral facial palsy sequelae', *Neurologia (Barcelona, Spain)*, pp. S0213-4853(21)00032–3. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.nrl.2021.01.015>.

Dieterich, A.V. *et al.* (2017) 'Shear wave elastography reveals different degrees of passive and active stiffness of the neck extensor muscles', *European Journal of Applied Physiology*, 117(1), pp. 171–178. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00421-016-3509-5>.

Djordjevic, J. *et al.* (2013) 'Three-dimensional longitudinal assessment of facial symmetry in adolescents', *The European Journal of Orthodontics*, 35(2), pp. 143–151. Available at: <https://doi.org/10.1093/ejo/cjr006>.

Dobkin, B.H. *et al.* (2010) 'International randomized clinical trial, stroke inpatient rehabilitation with reinforcement of walking speed (SIRROWS), improves outcomes', *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 24(3), pp. 235–242. Available at: <https://doi.org/10.1177/1545968309357558>.

Du, S., Tao, Y. and Martinez, A.M. (2014) 'Compound facial expressions of emotion', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(15), pp. E1454-1462. Available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.1322355111>.

Efthimiou, T.N. *et al.* (2024) 'Smiling and frowning induced by facial neuromuscular electrical stimulation (fNMES) modulate felt emotion and physiology', *Emotion (Washington, D.C.)* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1037/emo0001408>.

Ekman, P. and Friesen, W.V. (2019) 'Facial Action Coding System'. Available at: <https://doi.org/10.1037/t27734-000>.

Ewertsen, C. *et al.* (2018) 'Reference Values for Shear Wave Elastography of Neck and Shoulder Muscles in Healthy Individuals', *Ultrasound International Open*, 04(01), pp. E23–E29. Available at: <https://doi.org/10.1055/s-0044-102013>.

Farrugia, M.E. *et al.* (2007) 'Magnetic resonance imaging of facial muscles', *Clinical Radiology*, 62(11), pp. 1078–1086. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.crad.2007.05.003>.

Fattah, A.Y. *et al.* (2014) 'Survey of methods of facial palsy documentation in use by members of the Sir Charles Bell Society', *The Laryngoscope*, 124(10), pp. 2247–2251. Available at: <https://doi.org/10.1002/lary.24636>.

Fattah, A.Y. *et al.* (2015) 'Facial nerve grading instruments: systematic review of the literature and suggestion for uniformity', *Plastic and Reconstructive Surgery*, 135(2), pp. 569–579. Available at: <https://doi.org/10.1097/PRS.0000000000000905>.

Federative Committee on Anatomical Terminology (1998) 'Terminologia Anatomica: International Anatomical Terminology.', in. Available at: <http://www.thieme.com/>.

Feng, G. *et al.* (2014) 'A New 3-Dimensional Dynamic Quantitative Analysis System of Facial Motion: An Establishment and Reliability Test', *PLoS ONE*. Edited by R. Ji, 9(11), p. e113115. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113115>.

Ferrario, V.F. *et al.* (1993) 'Craniofacial morphometry by photographic evaluations', *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 103(4), pp. 327–337. Available at: [https://doi.org/10.1016/0889-5406\(93\)70013-E](https://doi.org/10.1016/0889-5406(93)70013-E).

Finsterer, J. (2008) 'Management of peripheral facial nerve palsy', *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 265(7), pp. 743–752. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00405-008-0646-4>.

Freilinger, G. *et al.* (1987) 'Surgical anatomy of the mimic muscle system and the facial nerve: importance for reconstructive and aesthetic surgery', *Plastic and Reconstructive Surgery*, 80(5), pp. 686–690. Available at: <https://doi.org/10.1097/00006534-198711000-00005>.

Frey, M. *et al.* (1994) 'Development of a New Documentation System for Facial Movements as a Basis for the International Registry for Neuromuscular Reconstruction in the Face', *Plastic and Reconstructive Surgery - Global Open*, 93(6), pp. 1334–1349. Available at: <https://doi.org/10.1097/00006534-199406000-00002>.

Frey, M. *et al.* (1999) 'Three-dimensional video analysis of facial movements: a new method to assess the quantity and quality of the smile', *Plastic and Reconstructive Surgery*, 104, pp. 2032–2039.

Freyss, G. *et al.* (1971) '[Attempted evaluation of esthetic damage in facial paralysis by clinical examination and testing]', *Annales D'oto-Laryngologie Et De Chirurgie Cervico Faciale: Bulletin De La Societe D'oto-Laryngologie Des Hopitaux De Paris*, 88(12), pp. 654–662.

Fu, L., Bundy, C. and Sadiq, S.A. (2011) 'Psychological distress in people with disfigurement from facial palsy', *Eye (London, England)*, 25(10), pp. 1322–1326. Available at: <https://doi.org/10.1038/eye.2011.158>.

Fujiwara, K. *et al.* (2022) 'Psychological evaluation for patients with non-cured facial nerve palsy', *Auris, Nasus, Larynx*, 49(1), pp. 53–57. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.anl.2021.04.007>.

Gabriel, K.R. and Odoroff, C.L. (1990) 'Biplots in biomedical research', *Statistics in Medicine*, 9(5), pp. 469–485. Available at: <https://doi.org/10.1002/sim.4780090502>.

Gama, J.T. *et al.* (2020) ‘Cross-cultural validation of the FACE-Q Satisfaction with Facial Appearance Overall Scale (FACE-Q SFAOS) in Brazilian rhytidoplasty patients’, *Clinics (Sao Paulo, Brazil)*, 75, p. e1568. Available at: <https://doi.org/10.6061/clinics/2020/e1568>.

Gandek, B. *et al.* (1998) ‘Cross-validation of item selection and scoring for the SF-12 Health Survey in nine countries: results from the IQOLA Project. International Quality of Life Assessment’, *Journal of Clinical Epidemiology*, 51(11), pp. 1171–1178. Available at: [https://doi.org/10.1016/s0895-4356\(98\)00109-7](https://doi.org/10.1016/s0895-4356(98)00109-7).

Gasser, R.F. (1967) ‘The development of the facial nerve in man’, *The Annals of Otolaryngology, Rhinology, and Laryngology*, 76(1), pp. 37–56. Available at: <https://doi.org/10.1177/000348946707600103>.

Ghassemi, A. *et al.* (2003) ‘Anatomy of the SMAS revisited’, *Aesthetic Plastic Surgery*, 27(4), pp. 258–264. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00266-003-3065-3>.

Ghosh, D. (2019) ‘Wavelet-based Benjamini-Hochberg procedures for multiple testing under dependence’, *Mathematical biosciences and engineering: MBE*, 17(1), pp. 56–72. Available at: <https://doi.org/10.3934/mbe.2020003>.

Giovanoli, P. *et al.* (2003) ‘Three-dimensional video-analysis of facial movements in healthy volunteers’, *British Journal of Plastic Surgery*, 56(7), pp. 644–652. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0007-1226\(03\)00277-7](https://doi.org/10.1016/S0007-1226(03)00277-7).

Gracies, J.-M. (2005) ‘Pathophysiology of spastic paresis. I: Paresis and soft tissue changes’, *Muscle & Nerve*, 31(5), pp. 535–551. Available at: <https://doi.org/10.1002/mus.20284>.

Gracies, J.-M. *et al.* (2019) ‘Guided Self-rehabilitation Contract vs conventional therapy in chronic stroke-induced hemiparesis: NEURORESTORE, a multicenter randomized controlled trial’, *BMC neurology*, 19(1), p. 39. Available at: <https://doi.org/10.1186/s12883-019-1257-y>.

Gracies, J.-M. *et al.* (2021) ‘Guided Self-rehabilitation Contracts Combined With AbobotulinumtoxinA in Adults With Spastic Paresis’, *Journal of neurologic physical therapy: JNPT*, 45(3), pp. 203–213. Available at: <https://doi.org/10.1097/NPT.0000000000000359>.

Graeber, M.B., Bise, K. and Mehraein, P. (1993) ‘Synaptic stripping in the human facial nucleus’, *Acta Neuropathologica*, 86(2), pp. 179–181. Available at: <https://doi.org/10.1007/BF00334886>.

Grosheva, M., Wittekindt, C. and Guntinas-Lichius, O. (2008) ‘Prognostic value of electroneurography and electromyography in facial palsy’, *The Laryngoscope*, 118(3), pp. 394–397. Available at: <https://doi.org/10.1097/MLG.0b013e31815d8e68>.

Guihard, M., Gracies, J.-M. and Baude, M. (2022) ‘Three-Dimensional Quantification of Facial Morphology and Movements Using a Wearable Helmet’, *BioMed Research International*. Edited by G. Messina, 2022, pp. 1–12. Available at: <https://doi.org/10.1155/2022/2774713>.

Guntinas-Lichius, O. *et al.* (2005) ‘Factors limiting motor recovery after facial nerve transection in the rat: combined structural and functional analyses’, *European Journal of Neuroscience*, 21(2), pp. 391–402. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2005.03877.x>.

Guntinas-Lichius, O. *et al.* (2020) 'Facial nerve electrodiagnostics for patients with facial palsy: a clinical practice guideline', *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 277(7), pp. 1855–1874. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00405-020-05949-1>.

Hälbig, T.D. *et al.* (2011) 'Differential role of dopamine in emotional attention and memory: evidence from Parkinson's disease', *Movement Disorders: Official Journal of the Movement Disorder Society*, 26(9), pp. 1677–1683. Available at: <https://doi.org/10.1002/mds.23728>.

Hamlet, C. *et al.* (2018) 'Consensus research priorities for facial palsy: A Delphi survey of patients, carers, clinicians and researchers', *Journal of plastic, reconstructive & aesthetic surgery: JPRAS*, 71(12), pp. 1777–1784. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.bjps.2018.07.037>.

Hanel, F. and Martin, G. (1980) 'Self-monitoring, self-administration of token reinforcement, and goal-setting to improve work rates with retarded clients', *International Journal of Rehabilitation Research. Internationale Zeitschrift Fur Rehabilitationsforschung. Revue Internationale De Recherches De Readaptation*, 3(4), pp. 505–517. Available at: <https://doi.org/10.1097/00004356-198012000-00004>.

Harada, T. *et al.* (2009) 'Gait capacity affects cortical activation patterns related to speed control in the elderly', *Experimental Brain Research*, 193(3), pp. 445–454. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1643-y>.

Harastani, M. *et al.* (2020) 'Methamphetamine drug abuse and addiction: Effects on face asymmetry', *Computers in Biology and Medicine*, 116, p. 103475. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compbimed.2019.103475>.

Hawes, M.J. and Dortzbach, R.K. (1982) 'The microscopic anatomy of the lower eyelid retractors', *Archives of Ophthalmology (Chicago, Ill.: 1960)*, 100(8), pp. 1313–1318. Available at: <https://doi.org/10.1001/archopht.1982.01030040291018>.

Herman, J. *et al.* (2017) 'Shear wave elastography parameters of normal soft tissues of the neck', *Biomedical Papers*, 161(3), pp. 320–325. Available at: <https://doi.org/10.5507/bp.2017.024>.

Hermisdörfer, J. *et al.* (1999) 'Comparative analysis of diadochokinetic movements', *Journal of Electromyography and Kinesiology: Official Journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology*, 9(4), pp. 283–295. Available at: [https://doi.org/10.1016/s1050-6411\(98\)00050-9](https://doi.org/10.1016/s1050-6411(98)00050-9).

Hohman, M.H. and Hadlock, T.A. (2014) 'Etiology, diagnosis, and management of facial palsy: 2000 patients at a facial nerve center', *The Laryngoscope*, 124(7), pp. E283-293. Available at: <https://doi.org/10.1002/lary.24542>.

Holds, J.B. *et al.* (1990) 'Motor nerve sprouting in human orbicularis muscle after botulinum A injection', *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 31(5), pp. 964–967.

Hontanilla, B. and Aubá, C. (2008) 'Automatic three-dimensional quantitative analysis for evaluation of facial movement', *Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery*, 61(1), pp. 18–30. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.bjps.2007.03.037>.

- Hontanilla, B. and Marre, D. (2013) 'Eyelid reanimation with gold weight implant and tendon sling suspension: Evaluation of excursion and velocity using the FACIAL CLIMA system', *Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery*, 66(4), pp. 518–524. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.bjps.2012.12.022>.
- Hood, C.A. *et al.* (2003) 'Facial asymmetry - 3D assessment of infants with cleft lip & palate: 3D assessment of infants with cleft lip & palate', *International Journal of Paediatric Dentistry*, 13(6), pp. 404–410. Available at: <https://doi.org/10.1046/j.1365-263X.2003.00496.x>.
- Hormazabal-Peralta, A. *et al.* (2021) 'Clinical anatomy considerations on the muscular and vascular components of the midface by ultrasonographic imaging', *Clinical Anatomy (New York, N.Y.)*, 34(8), pp. 1142–1149. Available at: <https://doi.org/10.1002/ca.23754>.
- Houk, J. and Henneman, E. (1967) 'Responses of Golgi tendon organs to active contractions of the soleus muscle of the cat', *Journal of Neurophysiology*, 30(3), pp. 466–481. Available at: <https://doi.org/10.1152/jn.1967.30.3.466>.
- House, J.W. and Brackmann, D.E. (1985) 'Facial nerve grading system', *Otolaryngology--Head and Neck Surgery: Official Journal of American Academy of Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, 93(2), pp. 146–147. Available at: <https://doi.org/10.1177/019459988509300202>.
- Hsu, A.K. and Frankel, A.S. (2017) 'Modification of Chin Projection and Aesthetics With OnabotulinumtoxinA Injection', *JAMA facial plastic surgery*, 19(6), pp. 522–527. Available at: <https://doi.org/10.1001/jamafacial.2017.0606>.
- Hutto, J.R. and Vattoth, S. (2015) 'A practical review of the muscles of facial mimicry with special emphasis on the superficial musculoaponeurotic system', *AJR. American journal of roentgenology*, 204(1), pp. W19-26. Available at: <https://doi.org/10.2214/AJR.14.12857>.
- Hutz, M., Aasen, M. and Leonetti, J. (2020) 'Facial-Stapedial Synkinesis Following Acute Idiopathic Facial Palsy', *WMJ: official publication of the State Medical Society of Wisconsin*, 119(3), pp. 205–210.
- Jorge Jr., J.J. *et al.* (2012) 'Avaliação objetiva computadorizada dos parâmetros normais de contração dos músculos faciais', *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, 78(2), pp. 41–51. Available at: <https://doi.org/10.1590/S1808-86942012000200008>.
- Kahn, J.B. *et al.* (2001) 'Validation of a patient-graded instrument for facial nerve paralysis: the FaCE scale', *The Laryngoscope*, 111(3), pp. 387–398. Available at: <https://doi.org/10.1097/00005537-200103000-00005>.
- Kandel, E.R. and Tauc, L. (1964) 'MECHANISM OF PROLONGED HETEROSYNAPTIC FACILITATION', *Nature*, 202, pp. 145–147. Available at: <https://doi.org/10.1038/202145a0>.
- Kanerva, M., Poussa, T. and Pitkäranta, A. (2006) 'Sunnybrook and House-Brackmann Facial Grading Systems: intrarater repeatability and interrater agreement', *Otolaryngology--Head and Neck Surgery: Official Journal of American Academy of Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, 135(6), pp. 865–871. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.otohns.2006.05.748>.
- Kato, D. and Wake, H. (2019) 'Activity-Dependent Myelination', *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 1190, pp. 43–51. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-32-9636-7_4.

- Kaya, K.S. and Cakmak, O. (2022) 'Facelift Techniques: An Overview', *Facial plastic surgery: FPS*, 38(6), pp. 540–545. Available at: <https://doi.org/10.1055/a-1877-9371>.
- Khambay, B.S. *et al.* (2019) 'Fluctuating asymmetry of dynamic smiles in normal individuals', *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 48(10), pp. 1372–1379. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2019.01.032>.
- Kim, H.J. *et al.* (2018) 'Comparison of strain and shear wave elastography for qualitative and quantitative assessment of breast masses in the same population', *Scientific Reports*, 8(1), p. 6197. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24377-0>.
- Klassen, A.F. *et al.* (2010) 'Measuring patient-reported outcomes in facial aesthetic patients: development of the FACE-Q', *Facial plastic surgery: FPS*, 26(4), pp. 303–309. Available at: <https://doi.org/10.1055/s-0030-1262313>.
- Klein, M. and Kandel, E.R. (1978) 'Presynaptic modulation of voltage-dependent Ca²⁺ current: mechanism for behavioral sensitization in *Aplysia californica*', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 75(7), pp. 3512–3516. Available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.75.7.3512>.
- Klingner, C.M. *et al.* (2011) 'Cortical reorganization in Bell's palsy', *Restorative Neurology and Neuroscience*, 29(3), pp. 203–214. Available at: <https://doi.org/10.3233/RNN-2011-0592>.
- Knight, C. *et al.* (2002) 'Is accurate self-monitoring necessary for people with acquired neurological problems to benefit from the use of differential reinforcement methods?', *Brain Injury*, 16(1), pp. 75–87. Available at: <https://doi.org/10.1080/02699050110082188>.
- Koog, Y.H., Lee, J.S. and Wi, H. (2014) 'Clinically meaningful nocebo effect occurs in acupuncture treatment: a systematic review', *Journal of Clinical Epidemiology*, 67(8), pp. 858–869. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2014.02.021>.
- Kwakkel, G. *et al.* (1999) 'Intensity of leg and arm training after primary middle-cerebral-artery stroke: a randomised trial', *Lancet (London, England)*, 354(9174), pp. 191–196. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(98\)09477-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(98)09477-X).
- Lanciego, J.L., Luquin, N. and Obeso, J.A. (2012) 'Functional neuroanatomy of the basal ganglia', *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, 2(12), p. a009621. Available at: <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a009621>.
- Lannadère, E. *et al.* (2023) 'Contribution of the Synkinesis Assessment Questionnaire and the Sunnybrook Facial Grading System to the evaluation of synkinesis after peripheral facial palsy: A STROBE observational study', *European Annals of Otorhinolaryngology, Head and Neck Diseases*, 140(1), pp. 8–12. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.anorl.2022.05.002>.
- Le Clerc, N. *et al.* (2013) 'Comparison of 3 procedures for hypoglossal-facial anastomosis', *Otology & Neurotology: Official Publication of the American Otological Society, American Neurotology Society [and] European Academy of Otology and Neurotology*, 34(8), pp. 1483–1488. Available at: <https://doi.org/10.1097/MAO.0b013e31828dac62>.
- Lee, S.-Y. *et al.* (2019) 'Increased risk of depression in Bell's palsy: Two longitudinal follow-up studies using a national sample cohort', *Journal of Affective Disorders*, 251, pp. 256–262. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jad.2019.03.059>.

- Lenderking, W.R. *et al.* (2008) ‘Daily process methodology for measuring earlier antidepressant response’, *Contemporary Clinical Trials*, 29(6), pp. 867–877. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cct.2008.05.012>.
- Lépine, J.P. *et al.* (1985) ‘[Evaluation of anxiety and depression among patients hospitalized on an internal medicine service]’, *Annales Medico-Psychologiques*, 143(2), pp. 175–189.
- Liao, Q., Jin, X. and Zeng, W. (2012) ‘Enhancing the Symmetry and Proportion of 3D Face Geometry’, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 18(10), pp. 1704–1716. Available at: <https://doi.org/10.1109/TVCG.2012.26>.
- Lin, C.S. *et al.* (2000) ‘Accommodation to depolarizing and hyperpolarizing currents in cutaneous afferents of the human median and sural nerves’, *The Journal of Physiology*, 529 Pt 2(Pt 2), pp. 483–492. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2000.00483.x>.
- Linstrom, C.J. (2002) ‘Objective Facial Motion Analysis in Patients With Facial Nerve Dysfunction’, *The Laryngoscope*, 112(7), pp. 1129–1147. Available at: <https://doi.org/10.1097/00005537-200207000-00001>.
- Liu, K. *et al.* (2014) ‘Shear Wave Elastography – A New Quantitative Assessment of Post-Irradiation Neck Fibrosis’, *Ultraschall in der Medizin - European Journal of Ultrasound*, 36(04), pp. 348–354. Available at: <https://doi.org/10.1055/s-0034-1366364>.
- Lundbye-Jensen, J. and Nielsen, J.B. (2008a) ‘Central nervous adaptations following 1 wk of wrist and hand immobilization’, *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 105(1), pp. 139–151. Available at: <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00687.2007>.
- Lundbye-Jensen, J. and Nielsen, J.B. (2008b) ‘Immobilization induces changes in presynaptic control of group Ia afferents in healthy humans’, *The Journal of Physiology*, 586(17), pp. 4121–4135. Available at: <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2008.156547>.
- Ma, J. *et al.* (2021) ‘Spatial patterns of intrinsic brain activity and functional connectivity in facial synkinesis patients’, *British Journal of Neurosurgery*, 35(6), pp. 730–735. Available at: <https://doi.org/10.1080/02688697.2020.1773396>.
- Ma, Z.-Z. *et al.* (2022) ‘Effective connectivity decreases in specific brain networks with postparalysis facial synkinesis: a dynamic causal modeling study’, *Brain Imaging and Behavior*, 16(2), pp. 748–760. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11682-021-00547-z>.
- Mancini, P. *et al.* (2014) ‘Prognostic factors of Bell’s palsy: multivariate analysis of electrophysiological findings’, *The Laryngoscope*, 124(11), pp. 2598–2605. Available at: <https://doi.org/10.1002/lary.24764>.
- Manson, P.N. *et al.* (1986) ‘Pathways of sympathetic innervation to the superior and inferior (Müller’s) tarsal muscles’, *Plastic and Reconstructive Surgery*, 78(1), pp. 33–40. Available at: <https://doi.org/10.1097/00006534-198607000-00004>.
- Mantsopoulos, K. *et al.* (2015) ‘Applicability of Shear Wave Elastography of the Major Salivary Glands: Values in Healthy Patients and Effects of Gender, Smoking and Pre-Compression’, *Ultrasound in Medicine & Biology*, 41(9), pp. 2310–2318. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2015.04.015>.

- Mardia, K.V., Bookstein, F.L. and Moreton, I.J. (2000) 'Statistical Assessment of Bilateral Symmetry of Shapes', *Biometrika*, 87(2), pp. 285–300.
- Martineau, S. *et al.* (2021) 'French Translation and Validation of the Synkinesis Assessment Questionnaire', *The Canadian Journal of Neurological Sciences. Le Journal Canadien Des Sciences Neurologiques*, 48(3), pp. 425–429. Available at: <https://doi.org/10.1017/cjn.2020.208>.
- Martin-Villares, C., Alba, J.R. and Gonzalez-Gimeno, M.J. (2021) 'Data from 235 Cases of Bell's Palsy during COVID-19 Pandemic: Were There Clusters of Facial Palsy?', *Neuroepidemiology*, 55(6), pp. 495–496. Available at: <https://doi.org/10.1159/000518671>.
- Mastryukova, V. *et al.* (2020) 'Can MRI quantify the volume changes of denervated facial muscles?', *European Journal of Translational Myology*, 30(1), p. 8918. Available at: <https://doi.org/10.4081/ejtm.2019.8918>.
- Mehta, R.P., WernickRobinson, M. and Hadlock, T.A. (2007) 'Validation of the Synkinesis Assessment Questionnaire', *The Laryngoscope*, 117(5), pp. 923–926. Available at: <https://doi.org/10.1097/MLG.0b013e3180412460>.
- Meimoun, M. *et al.* (2015) '[Intensity in the neurorehabilitation of spastic paresis]', *Revue Neurologique*, 171(2), pp. 130–140. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.neurol.2014.09.011>.
- Melzer, W., Herrmann-Frank, A. and Lüttgau, H.Ch. (1995) 'The role of Ca²⁺ ions in excitation-contraction coupling of skeletal muscle fibres', *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Reviews on Biomembranes*, 1241(1), pp. 59–116. Available at: [https://doi.org/10.1016/0304-4157\(94\)00014-5](https://doi.org/10.1016/0304-4157(94)00014-5).
- Miller, M.Q. *et al.* (2021) 'The Auto-eFACE: Machine Learning–Enhanced Program Yields Automated Facial Palsy Assessment Tool', *Plastic & Reconstructive Surgery*, 147(2), pp. 467–474. Available at: <https://doi.org/10.1097/PRS.00000000000007572>.
- Mitz, V. and Peyronie, M. (1976) 'The superficial musculo-aponeurotic system (SMAS) in the parotid and cheek area', *Plastic and Reconstructive Surgery*, 58(1), pp. 80–88. Available at: <https://doi.org/10.1097/00006534-197607000-00013>.
- Mlosek, R.K. and Malinowska, S. (2013) 'Ultrasound image of the skin, apparatus and imaging basics', *Journal of Ultrasonography*, 13(53), pp. 212–221. Available at: <https://doi.org/10.15557/JoU.2013.0021>.
- Montoya, F.J. *et al.* (2002) 'Treatment of gustatory hyperlacrimation (crocodile tears) with injection of botulinum toxin into the lacrimal gland', *Eye*, 16(6), pp. 705–709. Available at: <https://doi.org/10.1038/sj.eye.6700230>.
- Moran, C.J. and Neely, J.G. (1996) 'Patterns of Facial Nerve Synkinesis', *The Laryngoscope*, 106(12), pp. 1491–1496. Available at: <https://doi.org/10.1097/00005537-199612000-00009>.
- Morishima, N. *et al.* (2013) 'Prognostic factors of synkinesis after Bell's palsy and Ramsay Hunt syndrome', *Auris Nasus Larynx*, 40(5), pp. 431–434. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.anl.2013.01.001>.

- Mosmuller, D. *et al.* (2016) 'The use and reliability of SymNose for quantitative measurement of the nose and lip in unilateral cleft lip and palate patients', *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 44(10), pp. 1515–1521. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2016.07.022>.
- Nasr, M.W. *et al.* (2016) 'Botulinum Toxin for the Treatment of Excessive Gingival Display: A Systematic Review', *Aesthetic Surgery Journal*, 36(1), pp. 82–88. Available at: <https://doi.org/10.1093/asj/sjv082>.
- Neely, J.G. *et al.* (2010) 'Sunnybrook facial grading system: reliability and criteria for grading', *The Laryngoscope*, 120(5), pp. 1038–1045. Available at: <https://doi.org/10.1002/lary.20868>.
- Ng, J.H. and Ngo, R.Y.S. (2013) 'The use of the facial clinimetric evaluation scale as a patient-based grading system in Bell's palsy', *The Laryngoscope*, 123(5), pp. 1256–1260. Available at: <https://doi.org/10.1002/lary.23790>.
- Nippita, S. *et al.* (2015) 'A randomized controlled trial of daily text messages versus monthly paper diaries to collect bleeding data after intrauterine device insertion', *Contraception*, 92(6), pp. 578–584. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.contraception.2015.09.004>.
- Noland, M.P. (1989) 'The effects of self-monitoring and reinforcement on exercise adherence', *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 60(3), pp. 216–224. Available at: <https://doi.org/10.1080/02701367.1989.10607443>.
- Obata, H. *et al.* (2022) 'Effect of Long-Term Classical Ballet Dance Training on Postactivation Depression of the Soleus Hoffmann-Reflex', *Motor Control*, 26(2), pp. 169–180. Available at: <https://doi.org/10.1123/mc.2021-0079>.
- Oklar, M., Yazıcıoğlu, T. and Talan, M. (2023) 'Modified Horner-Duverney's muscle plication in the treatment of functional epiphora', *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology = Albrecht Von Graefes Archiv Fur Klinische Und Experimentelle Ophthalmologie*, 261(10), pp. 2971–2978. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00417-023-06090-5>.
- Omstead, K.M. *et al.* (2023) 'Mammalian facial muscles contain muscle spindles', *Anatomical Record (Hoboken, N.J.: 2007)*, 306(10), pp. 2562–2571. Available at: <https://doi.org/10.1002/ar.25172>.
- Osthues, M. *et al.* (2022) 'Continual rehabilitation motivation of patients with postparalytic facial nerve syndrome', *European archives of oto-rhino-laryngology: official journal of the European Federation of Oto-Rhino-Laryngological Societies (EUFOS): affiliated with the German Society for Oto-Rhino-Laryngology - Head and Neck Surgery*, 279(1), pp. 481–491. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00405-021-06895-2>.
- Owusu, J.A., Stewart, C.M. and Boahene, K. (2018) 'Facial Nerve Paralysis', *Medical Clinics of North America*, 102(6), pp. 1135–1143. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.mcna.2018.06.011>.
- Pan, B., Yu, L. and Zhang, Q. (2018) 'Review of single-camera stereo-digital image correlation techniques for full-field 3D shape and deformation measurement', *Science China Technological Sciences*, 61(1), pp. 2–20. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11431-017-9090-x>.

- Paolucci, T. *et al.* (2020) 'Give me a kiss! An integrative rehabilitative training program with motor imagery and mirror therapy for recovery of facial palsy', *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine*, 56(1), pp. 58–67. Available at: <https://doi.org/10.23736/S1973-9087.19.05757-5>.
- Peitersen, E. (2002) 'Bell's Palsy: The Spontaneous Course of 2,500 Peripheral Facial Nerve Palsies of Different Etiologies', *Acta Oto-Laryngologica*, (549), pp. 4–30.
- Pessa, J.E. *et al.* (1998) 'Variability of the midfacial muscles: analysis of 50 hemifacial cadaver dissections', *Plastic and Reconstructive Surgery*, 102(6), pp. 1888–1893. Available at: <https://doi.org/10.1097/00006534-199811000-00013>.
- Pradines, M. *et al.* (2019) 'Ultrasound Structural Changes in Triceps Surae After a 1-Year Daily Self-stretch Program: A Prospective Randomized Controlled Trial in Chronic Hemiparesis', *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 33(4), pp. 245–259. Available at: <https://doi.org/10.1177/1545968319829455>.
- Pusic, A.L. *et al.* (2013) 'Development and psychometric evaluation of the FACE-Q satisfaction with appearance scale: a new patient-reported outcome instrument for facial aesthetics patients', *Clinics in Plastic Surgery*, 40(2), pp. 249–260. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cps.2012.12.001>.
- Putterman, A.M. (1978) 'Ectropion of the lower eyelid secondary to Müller's muscle-capsulopalpebral fascia detachment', *American Journal of Ophthalmology*, 85(6), pp. 814–817. Available at: [https://doi.org/10.1016/s0002-9394\(14\)78110-3](https://doi.org/10.1016/s0002-9394(14)78110-3).
- Raslan, A. *et al.* (2014) 'Reduced cholinergic and glutamatergic synaptic input to regenerated motoneurons after facial nerve repair in rats: potential implications for recovery of motor function', *Brain Structure and Function*, 219(3), pp. 891–909. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00429-013-0542-6>.
- Rath, B. *et al.* (2007) 'All that palsies is not Bell's -the need to define Bell's palsy as an adverse event following immunization', *Vaccine*, 26(1), pp. 1–14. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2007.10.043>.
- Ross, B.G., Fradet, G. and Nedzelski, J.M. (1996) 'Development of a sensitive clinical facial grading system', *Otolaryngology--Head and Neck Surgery: Official Journal of American Academy of Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, 114(3), pp. 380–386. Available at: [https://doi.org/10.1016/s0194-5998\(96\)70206-1](https://doi.org/10.1016/s0194-5998(96)70206-1).
- Rüschenschmidt, H. *et al.* (2022) 'Electromyography of Extrinsic and Intrinsic Ear Muscles in Healthy Probands and Patients with Unilateral Postparalytic Facial Synkinesis', *Diagnostics*, 12(1), p. 121. Available at: <https://doi.org/10.3390/diagnostics12010121>.
- Saadi, R. *et al.* (2019) 'Depression Rates After Facial Paralysis', *Annals of Plastic Surgery*, 83(2), pp. 190–194. Available at: <https://doi.org/10.1097/SAP.0000000000001908>.
- Salles, A.G. *et al.* (2015) 'Epidemiologic Overview of Synkinesis in 353 Patients with Longstanding Facial Paralysis under Treatment with Botulinum Toxin for 11 Years', *Plastic and Reconstructive Surgery*, 136(6), pp. 1289–1298. Available at: <https://doi.org/10.1097/PRS.0000000000001802>.

de Sanctis Pecora, C. and Shitara, D. (2021) 'Botulinum Toxin Type A to Improve Facial Symmetry in Facial Palsy: A Practical Guideline and Clinical Experience', *Toxins*, 13(2), p. 159. Available at: <https://doi.org/10.3390/toxins13020159>.

Sarhan, F.-R. (2017) *Quantification des mouvements de la mimique faciale par motion capture sur une population de volontaires sains*. PhD. Université de Technologie de Compiègne.

Saw, A.E., Main, L.C. and Gatin, P.B. (2015) 'Monitoring athletes through self-report: factors influencing implementation', *Journal of Sports Science & Medicine*, 14(1), pp. 137–146.

Schutte, H. *et al.* (2022) 'Identification of the Peri-oral Mimic Muscles on Cadaver Slices and 3 and 7 Tesla MRI Scans', *Plastic and Reconstructive Surgery. Global Open*, 10(2), p. e4113. Available at: <https://doi.org/10.1097/GOX.0000000000004113>.

Schutte, H. *et al.* (2024) 'New method for analysing spatial relationships of facial muscles on MRI: a pilot study', *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 53(9), pp. 731–738. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2024.03.003>.

Sekikawa, K. *et al.* (2019) 'Evaluation of Yanagihara facial nerve grading system based on a muscle fiber analysis of human facial muscles', *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 276(7), pp. 2055–2060. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00405-019-05462-0>.

Seynnes, O.R. *et al.* (2008) 'Soleus T reflex modulation in response to spinal and tendinous adaptations to unilateral lower limb suspension in humans', *Acta Physiologica (Oxford, England)*, 194(3), pp. 239–251. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.2008.01874.x>.

Sforza, C. *et al.* (2010) 'A three-dimensional study of facial mimicry in healthy young adults', *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 38(6), pp. 409–415. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2009.10.018>.

Sidarta, A. *et al.* (2016) 'Somatic and Reinforcement-Based Plasticity in the Initial Stages of Human Motor Learning', *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 36(46), pp. 11682–11692. Available at: <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1767-16.2016>.

Slade, P.D. and Russell, G.F. (1973) 'Experimental investigations of bodily perception in anorexia nervosa and obesity', *Psychotherapy and Psychosomatics*, 22(2), pp. 359–363. Available at: <https://doi.org/10.1159/000286543>.

Som, P.M. *et al.* (2012) 'The MR Imaging Identification of the Facial Muscles and the Subcutaneous Musculoaponeurotic System', *Neurographics*, 2(1), pp. 35–43. Available at: <https://doi.org/10.3174/ng.1120022>.

Stennert, E. (1982) 'Das Autoparalytische Syndrom? ein Leitsymptom der postparesischen Fazialisfunktion', *Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 236(1), pp. 97–114. Available at: <https://doi.org/10.1007/BF00464062>.

Sullivan, F.M. *et al.* (2007) 'Early treatment with prednisolone or acyclovir in Bell's palsy', *The New England Journal of Medicine*, 357(16), pp. 1598–1607. Available at: <https://doi.org/10.1056/NEJMoa072006>.

Sunderland, S. (1951) 'A CLASSIFICATION OF PERIPHERAL NERVE INJURIES PRODUCING LOSS OF FUNCTION', *Brain*, 74(4), pp. 491–516. Available at: <https://doi.org/10.1093/brain/74.4.491>.

Surek, C.C. (2019) 'Facial Anatomy for Filler Injection: The Superficial Musculoaponeurotic System (SMAS) Is Not Just for Facelifting', *Clinics in Plastic Surgery*, 46(4), pp. 603–612. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cps.2019.06.007>.

Takahashi, Y. *et al.* (2021) 'Disabling muscle of Riolan: A novel concept of orbicularis oculi myectomy for refractory benign essential blepharospasm', *European Journal of Ophthalmology*, 31(6), pp. 3411–3417. Available at: <https://doi.org/10.1177/1120672121991043>.

Tan, E.-K. *et al.* (2004) 'Botulinum toxin improves quality of life in hemifacial spasm: validation of a questionnaire (HFS-30)', *Journal of the Neurological Sciences*, 219(1–2), pp. 151–155. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jns.2004.01.010>.

Tanter, M. *et al.* (2008) 'Quantitative Assessment of Breast Lesion Viscoelasticity: Initial Clinical Results Using Supersonic Shear Imaging', *Ultrasound in Medicine & Biology*, 34(9), pp. 1373–1386. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2008.02.002>.

Tatu, L. and Béreau, M. (2020) 'Anatomie fonctionnelle des ganglions de la base', in *Pathologies du mouvement*. Editions DOIN (Traité de neurologie), pp. 1–12.

Tavares-Brito, J. *et al.* (2019) 'Facial Palsy-Specific Quality of Life in 920 Patients: Correlation With Clinician-Graded Severity and Predicting Factors', *The Laryngoscope*, 129(1), pp. 100–104. Available at: <https://doi.org/10.1002/lary.27481>.

Taylor, H.O. *et al.* (2014) 'Quantitative Facial Asymmetry: Using Three-Dimensional Photogrammetry to Measure Baseline Facial Surface Symmetry', *Journal of Craniofacial Surgery*, 25(1), pp. 124–128. Available at: <https://doi.org/10.1097/SCS.0b013e3182a2e99d>.

Teixeira, L.J., Valbuza, J.S. and Prado, G.F. (2011) 'Physical therapy for Bell's palsy (idiopathic facial paralysis)', *The Cochrane Database of Systematic Reviews*, (12), p. CD006283. Available at: <https://doi.org/10.1002/14651858.CD006283.pub3>.

Ternifi, R. *et al.* (2019) 'First Evaluation of Zygomaticus Major Muscle Elastic Properties Using a US Elastography Technique', *Journal of Biomedical Science and Engineering*, 12(11), pp. 459–468. Available at: <https://doi.org/10.4236/jbise.2019.1211037>.

Testa, M. and Rossetini, G. (2016) 'Enhance placebo, avoid nocebo: How contextual factors affect physiotherapy outcomes', *Manual Therapy*, 24, pp. 65–74. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.math.2016.04.006>.

Thiel, C. *et al.* (2021) 'Pushing occupational rehabilitation - implementation of a therapy diary in the outpatient aftercare of psychosomatic rehabilitation may promote the occupational reintegration process: a survey of therapists and patients', *Journal of Occupational Medicine and Toxicology (London, England)*, 16(1), p. 15. Available at: <https://doi.org/10.1186/s12995-021-00306-2>.

Trévidic, P. *et al.* (2022) 'Injection Guidelines for Treating Midface Volume Deficiency With Hyaluronic Acid Fillers: The ATP Approach (Anatomy, Techniques, Products)', *Aesthetic Surgery Journal*, 42(8), pp. 920–934. Available at: <https://doi.org/10.1093/asj/sjac007>.

Trimble, M.H., Kukulka, C.G. and Behrman, A.L. (1998) 'The effect of treadmill gait training on low-frequency depression of the soleus H-reflex: comparison of a spinal cord injured man to normal subjects', *Neuroscience Letters*, 246(3), pp. 186–188. Available at: [https://doi.org/10.1016/s0304-3940\(98\)00259-6](https://doi.org/10.1016/s0304-3940(98)00259-6).

Trotman, C.A. *et al.* (2018) 'Facial Soft-tissue Mobility: Baseline Dynamics of Patients with Unilateral Facial Paralysis', *Plastic and Reconstructive Surgery - Global Open*, 6(10), p. e1955. Available at: <https://doi.org/10.1097/GOX.0000000000001955>.

Trotman, C.A., Faraway, J. and Hadlock, T.A. (2020) 'Facial mobility and recovery in patients with unilateral facial paralysis', *Orthodontics & Craniofacial Research*, 23(1), pp. 82–91. Available at: <https://doi.org/10.1111/ocr.12346>.

Tzou, C.H.J. *et al.* (2005) 'Are there ethnic differences of facial movements between Europeans and Asians?', *British Journal of Plastic Surgery*, 58(2), pp. 183–195. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.bjps.2004.10.014>.

Tzou, C.-H.J. *et al.* (2012) 'Evolution of the 3-Dimensional Video System for Facial Motion Analysis: Ten Years' Experiences and Recent Developments', *Annals of Plastic Surgery*, 69(2), pp. 173–185. Available at: <https://doi.org/10.1097/SAP.0b013e3182223d96>.

Urban, E. *et al.* (2020) 'Prognostic factors for the outcome of Bells' palsy: A cohort register-based study', *Clinical otolaryngology: official journal of ENT-UK; official journal of Netherlands Society for Oto-Rhino-Laryngology & Cervico-Facial Surgery*, 45(5), pp. 754–761. Available at: <https://doi.org/10.1111/coa.13571>.

Utley, D.S. and Goode, R.L. (1999) 'Radiofrequency ablation of the nerve to the corrugator muscle for elimination of glabellar frowning', *Archives of Facial Plastic Surgery*, 1(1), pp. 46–48. Available at: <https://doi.org/10.1001/archfaci.1.1.46>.

Vacher, S. *et al.* (1982) '[Hypoglossofacial anastomosis. Analysis and results on 12 cases and comparison with results of facio facial anastomosis]', *Annales D'oto-Laryngologie Et De Chirurgie Cervico Faciale: Bulletin De La Societe D'oto-Laryngologie Des Hopitaux De Paris*, 99(7–8), pp. 303–312.

Vagg, R. *et al.* (1998) 'Activity-dependent hyperpolarization of human motor axons produced by natural activity', *The Journal of Physiology*, 507 (Pt 3), pp. 919–925. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.1998.919bs.x>.

Valls-Solé, J. (2007) 'Electrodiagnostic studies of the facial nerve in peripheral facial palsy and hemifacial spasm', *Muscle & Nerve*, 36(1), pp. 14–20. Available at: <https://doi.org/10.1002/mus.20770>.

Van Veen, M.M. *et al.* (2019) 'Patient-perceived severity of synkinesis reduces quality of life in facial palsy: A cross-sectional analysis in 92 patients', *Clinical Otolaryngology*, 44(3), pp. 483–486. Available at: <https://doi.org/10.1111/coa.13322>.

- VanSwearingen, J.M. *et al.* (1998) 'Psychological distress: linking impairment with disability in facial neuromotor disorders', *Otolaryngology--Head and Neck Surgery: Official Journal of American Academy of Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, 118(6), pp. 790–796. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0194-5998\(98\)70270-0](https://doi.org/10.1016/S0194-5998(98)70270-0).
- VanSwearingen, J.M. and Brach, J.S. (1996) 'The Facial Disability Index: Reliability and Validity of a Disability Assessment Instrument for Disorders of the Facial Neuromuscular System', *Physical Therapy*, 76(12), pp. 1288–1298. Available at: <https://doi.org/10.1093/ptj/76.12.1288>.
- VanSwearingen, J.M., Cohn, J.F. and Bajaj-Luthra, A. (1999) 'Specific Impairment of Smiling Increases the Severity of Depressive Symptoms in Patients with Facial Neuromuscular Disorders', *Aesthetic Plastic Surgery*, 23(6), pp. 416–423. Available at: <https://doi.org/10.1007/s002669900312>.
- VanWormer, J.J. *et al.* (2009) 'Self-weighing promotes weight loss for obese adults', *American Journal of Preventive Medicine*, 36(1), pp. 70–73. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2008.09.022>.
- Vercruyse, H. *et al.* (2016) 'The effect of a Le Fort I incision on nose and upper lip dynamics: Unraveling the mystery of the "Le Fort I lip"', *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 44(12), pp. 1917–1921. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2016.08.022>.
- Vimercati, S.L. *et al.* (2012) 'Quantitative Evaluation of Facial Movement and Morphology', *Annals of Otolaryngology, Rhinology & Laryngology*, 121(4), pp. 246–252. Available at: <https://doi.org/10.1177/000348941212100410>.
- Volk, G.F. *et al.* (2013) 'Quantitative ultrasonography of facial muscles', *Muscle & Nerve*, 47(6), pp. 878–883. Available at: <https://doi.org/10.1002/mus.23693>.
- Volk, Gerd F. *et al.* (2014) 'Quantitative magnetic resonance imaging volumetry of facial muscles in healthy patients with facial palsy', *Plastic and Reconstructive Surgery. Global Open*, 2(6), p. e173. Available at: <https://doi.org/10.1097/GOX.0000000000000128>.
- Volk, Gerd Fabian, Pohlmann, M., *et al.* (2014) 'Quantitative ultrasonography of facial muscles in patients with chronic facial palsy', *Muscle & Nerve*, 50(3), pp. 358–365. Available at: <https://doi.org/10.1002/mus.24154>.
- Volk, Gerd Fabian, Sauer, M., *et al.* (2014) 'Reference values for dynamic facial muscle ultrasonography in adults', *Muscle & Nerve*, 50(3), pp. 348–357. Available at: <https://doi.org/10.1002/mus.24204>.
- Volk, G.F. *et al.* (2015) '[Facial Disability Index and Facial Clinimetric Evaluation Scale: validation of the German versions]', *Laryngo- Rhinology*, 94(3), pp. 163–168. Available at: <https://doi.org/10.1055/s-0034-1381999>.
- Volk, G.F., Leier, C. and Guntinas-Lichius, O. (2016) 'Correlation between electromyography and quantitative ultrasonography of facial muscles in patients with facial palsy', *Muscle & Nerve*, 53(5), pp. 755–761. Available at: <https://doi.org/10.1002/mus.24931>.

Vrabec, J.T. *et al.* (2009) 'Facial Nerve Grading System 2.0', *Otolaryngology--Head and Neck Surgery: Official Journal of American Academy of Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, 140(4), pp. 445–450. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.otohns.2008.12.031>.

Wang, Y. *et al.* (2018) 'Patterns of cortical reorganization in facial synkinesis: a task functional magnetic resonance imaging study', *Neural Regeneration Research*, 13(9), p. 1637. Available at: <https://doi.org/10.4103/1673-5374.235304>.

Wang, Y. *et al.* (2019) 'Decreased Distance between Representation Sites of Distinct Facial Movements in Facial Synkinesis—A Task fMRI Study', *Neuroscience*, 397, pp. 12–17. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2018.11.036>.

Ware, J., Kosinski, M. and Keller, S.D. (1996) 'A 12-Item Short-Form Health Survey: construction of scales and preliminary tests of reliability and validity', *Medical Care*, 34(3), pp. 220–233. Available at: <https://doi.org/10.1097/00005650-199603000-00003>.

Waubant, A., Franco-Vidal, V. and Ribadeau Dumas, A. (2022) 'Validation of a French version of the Sunnybrook facial grading system', *European Annals of Otorhinolaryngology, Head and Neck Diseases*, 139(3), pp. 119–124. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.anorl.2021.08.003>.

Wiles, R. *et al.* (2004) 'Discharge from physiotherapy following stroke: the management of disappointment', *Social Science & Medicine (1982)*, 59(6), pp. 1263–1273. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2003.12.022>.

Wu, J.-J. *et al.* (2021) 'Structural remodeling in related brain regions in patients with facial synkinesis', *Neural Regeneration Research*, 16(12), pp. 2528–2533. Available at: <https://doi.org/10.4103/1673-5374.313055>.

Wu, W.-T. *et al.* (2022) 'Ultrasound Imaging of the Facial Muscles and Relevance with Botulinum Toxin Injections: A Pictorial Essay and Narrative Review', *Toxins*, 14(2), p. 101. Available at: <https://doi.org/10.3390/toxins14020101>.

Xue, Z. *et al.* (2020) 'Three-Dimensional Dynamic Analysis of the Facial Movement Symmetry of Skeletal Class III Patients With Facial Asymmetry', *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 78(2), pp. 267–274. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.joms.2019.09.007>.

Yuen, K. *et al.* (1997) 'Evaluation of facial palsy by moiré topography index', *Otolaryngology–Head and Neck Surgery*, 117(5), pp. 567–572.

Zhao, Y. *et al.* (2020) 'Prognostic value of a three-dimensional dynamic quantitative analysis system to measure facial motion in acute facial paralysis patients', *Head & Face Medicine*, 16(1), p. 15. Available at: <https://doi.org/10.1186/s13005-020-00230-6>.

Zou, G.Y. (2012) 'Sample size formulas for estimating intraclass correlation coefficients with precision and assurance', *Statistics in Medicine*, 31(29), pp. 3972–3981. Available at: <https://doi.org/10.1002/sim.5466>.

BIBLIOGRAPHIE PERSONNELLE

Thèses, chapitres de livres

1. Baude M, Ghedira M, Pradines M, Gracies JM. (2022). Clinical Assessment of the Syndrome of Spastic Paresis. In: Raghavan, P. (eds) Spasticity and Muscle Stiffness. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96900-4_3
2. Guihard M, Gracies JM, Baude M. Three-Dimensional Quantification of Facial Morphology and Movements Using a Wearable Helmet. *Biomed Res Int.* ;2022:2774713. doi: 10.1155/2022/2774713. PMID: 35252441; PMCID: PMC8890869. Thèse de Sciences (Créteil) 2022 – UPEC.
3. Baude M, Guihard M, Gault-Colas C, Bénichou L, Coste A, Méningaud JP, Schmitz D, Natella PA, Audureau E, Gracies JM. Guided Self-rehabilitation Contract vs conventional therapy in chronic peripheral facial paresis: VISAGE, a multicenter randomized controlled trial. *BMC Neurol.* 2023;23(1):148. doi: 10.1186/s12883-023-03096-8. PMID: 37038105; PMCID: PMC10084642. Thèse de Sciences (Créteil) 2023 – UPEC.

Articles Originaux avec Comité de Lecture

4. Meimoun M, Bayle N, Baude M, Gracies JM. Intensity in the neurorehabilitation of spastic paresis. *Rev Neurol.* 2015;171(2):130-40
5. Baude M, Hutin E, Gracies JM. A Bidimensional System of Facial Movement Analysis Conception and Reliability in Adults. *Biomed Res Int.* 2015;2015:812961
6. Pradines M, Baude M, Marciniak C, Francisco G, Gracies JM, Hutin E, Bayle N. Effect on Passive Range of Motion and Functional Correlates After a Long-Term Lower Limb Self-Stretch Program in Patients With Chronic Spastic Paresis. *PM R.* 2018;10(10):1020-1031
7. Baude M, Nielsen JB, Gracies JM. The neurophysiology of deforming spastic paresis: A revised taxonomy. *Ann Phys Rehabil Med.* 2018. pii: S1877-0657(18)31479-9.
8. Gracies JM, Pradines M, Ghédira M, Loche CM, Mardale V, Hennegrave C, Gault-Colas C, Audureau E, Hutin E, Baude M, Bayle N; Neurorestore Study Group. Guided Self-rehabilitation Contract vs conventional therapy in chronic stroke-induced hemiparesis: NEUROSTORE, a multicenter randomized controlled trial. *BMC Neurol.* 2019;19(1):39
9. Segaux L, Oubaya N, Broussier A, Baude M, et al. Identification of five frailty profiles in community-dwelling individuals aged 50 to 75: a latent class analysis of the SUCCEED survey data. *Maturitas.* 2019;127:1-11
10. Piquet V, Luczak C, Seiler F, Monaury J, Martini A, Ward AB, Gracies JM, Motavasseli D; Covid Rehabilitation Study Group. Do Patients with Covid-19 Benefit from Rehabilitation? Functional outcomes of the first 100 patients in a Covid-19 rehabilitation unit. *Arch Phys Med Rehabil.* 2021:S0003-9993(21)00134-9

11. Guihard M, Gracies JM, Baude M. Three-Dimensional Quantification of Facial Morphology and Movements Using a Wearable Helmet. *Biomed Res Int*. 2022;2022:2774713
12. Baude M, Guihard M, Gault-Colas C, Bénichou L, Coste A, Méningaud JP, Schmitz D, Natella PA, Audureau E, Gracies JM. Guided Self-rehabilitation Contract vs conventional therapy in chronic peripheral facial paresis: VISAGE, a multicenter randomized controlled trial. *BMC Neurol*. 2023;23(1):148
13. Laclergue Z, Ghédira M, Gault-Colas C, Billy L, Gracies JM, Baude M. Reliability of the Modified Frenchay Scale for the assessment of upper limb function in adults with hemiparesis. *Arch Phys Med Rehabil*. 2023;104(10):1596-1605
14. Pradines M, Poitou T, Gál O, Hoskovcová M, Bayle N, Baude M, Gracies JM. Where is the zero of Tardieu for proximal trans-joint lower limb muscles? The relevance for the estimation of muscle shortening and weakness. *Front Neurol*. 2023;14:1108535
15. Jamal K, Butet S, Maitre B, Gracies JM, Hameau S, Leveque LE Bras É, Baude M, Cordillet S, Bonan I. Validity and reliability of the chronic composite XA, an upper limb motor assessment using Active Range of Motion in patients with chronic stroke. *Eur J Phys Rehabil Med*. 2024;60(4):559-566
16. Motavasseli D, Delorme C, Bayle N, Gracies JM, Roze E, Baude M. Use of Botulinum Toxin in Upper-Limb Tremor: Systematic Review and Perspectives. *Toxins (Basel)*. 2024;16(9):392.
17. Gault-Colas C, Pradines M, Baude M, Gracies JM. Exceptional improvement in chronic stroke through Guided Self-rehabilitation Contract: a case report study. *Front Rehabil Sci*. 2024 Sep 18;5:1385483. doi: 10.3389/fresc.2024.1385483. PMID: 39363991; PMCID: PMC11447270.
18. Pradines M, Jabouille F, Fontenas E, Baba Aissa I, Gault-Colas C, Baude M, Guihard M, Gros K, Gracies JM. Does spastic myopathy determine active movement and ambulation speed in chronic spastic paresis?-A cross-sectional study on plantar flexors. *PLoS One*. 2024 Oct 24;19(10):e0310969. doi: 10.1371/journal.pone.0310969. PMID: 39446866; PMCID: PMC11500935.

Reuves et Chapitres sur Invitation avec Comité de Lecture

19. Baude M, Gracies JM. Techniques and scales for measuring spastic paresis. In: Brashear A, editor. *Spasticity: diagnosis and management*, second edition. New York: Demos Medical; 2016. p. 73-80.

Participation en Congrès (Résumés)

20. Baude M, Hutin E, Behnegar A, Gracies JM. Self-rehabilitation program of fatiguing series of maximal contraction exercises in chronic peripheral facial paresis. *Ann Phys Rehabil Med* 2012;55:e295.
21. Baude M, Hutin E., Behnegar A., Gracies J.-M. Programme d'autorééducation en séries fatigantes de contractions maximales dans la parésie faciale périphérique chronique, *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, Volume 55, Supplement 1, 2012, Page e293

22. Mardale V, Benhegar A, Baude M, Gracies JM. Validation de la fréquence maximale de petits mouvements alternatifs comme marqueur du retentissement fonctionnel du tremblement hypermétrique du membre supérieur. *Ann Phys Rehabil Med* 2012;55(1):e202-e203
23. Mardale V, Behnegar A, Baude M, Gracies JM, Validation of the maximal frequency of small rapid alternating movements as a marker of functional impairment from upper limb tremor. *Ann Phys Rehabil Med* 2012;55(1):e205
24. Baude M, Scripcaru S, Lafosse D, Hutin E, Gracies J-M. Prise en charge rééducative de la parésie faciale périphérique par un programme d'autorééducation en séries fatigantes de contractions maximales. *Rev Neurol* 2012;168(S2):A100
25. Baude M, Hutin E., Gracies J-M. A bidimensional system of facial movement analysis: Conception and validation. *Ann Phys Rehabil Med* 2014;57(S1):e98
26. Pradines M, Baude M, Mardale V, Hutin E, Gracies JM. Daily static and eccentric self-stretching program and changes in muscle functional length in chronic spastic paresis after one year of Guided Self-rehabilitation Contract's practice. *Ann Phys Rehabil Med* 2015;58(S1):e87
27. Bignami B, Baude M, Vielotte J, Loche CL, Colas C, Pradines M, Gracies JM. Comparative shortening of different muscles in patients with chronic hemiparesis treated in guided self-rehabilitation contracts. *Ann Phys Rehabil Med* 2015;58(S1):e5-e6
28. Baude M, Loche CM, Gault-Colas C, Pradines M, Gracies JM. Intra- and inter-raters reliabilities of a stepped clinical assessment of chronic spastic paresis in adults. *Ann Phys Rehabil Med* 2015;58(S1):e4-e5
29. Chambéron M, Radot C, Baude M, Colas C, Loche CM, Gracies JM. Anterior vs posterior patterns of hip flexion impairment in spastic paresis. *Toxicon* 2016;123:S14-S15 10.1016/j.toxicon.2016.11.045
30. Baude M, Mardale V, Loche CM, Hutin E, Gracies JM, Bayle N. Intra- and inter-rater reliability of the Modified Frenchay Scale to measure active upper limb function in hemiparetic patients. *Ann Phys Rehabil Med*. 2016;59S:e59-e60
31. Motavasseli D, Baude M, Santiago T, Hutin E, Bayle N, Gracies JM. Effects of intensive physical therapy on levodopa prescription in Parkinson's disease over a 5-month period. *Ann Phys Rehabil Med* 2017;60(S):e67-e68
32. Chambéron M, Radot C, Baude M, Colas C, Gracies JM. Anterior vs posterior patterns of hip flexion impairment in spastic paresis. *Toxicon* 2017;123:S14-S15
33. Baude M, Lagnau P, Gault-Colas C, Gracies JM. Degree of praxis of command for facial muscles in healthy individuals to develop a new clinical scale for facial motor function in peripheral facial paresis. *Ann Phys Rehabil Med* 2018; 61(S):e264
34. Baude M, Guihard M, Gracies JM. Objective facial muscle groups quantification through a 3D helmet motion capture – World Federation of Neuro-Rehabilitation, 2020
35. Baude M, Guihard M, Gracies JM. Implementation and test-retest reliability of a tri-dimensional facial analysis device using a portable instrumented helmet – European Association of Cranio and Maxillo-Facial Surgery, 2021

36. Maigne P, Poitou T, Gault-Colas C, Martinat A, Baude M. Validité concourante des sous-scores du *early Composite X_A* dans l'évaluation de l'hémiplégie aigue post-AVC – SOFMER 2024 (poster)
37. Martinat A, Poitou T, Gault-Colas C, Maigne P, Gracies JM, Baude M. Fiabilités du score *early Composite X_A* dans l'évaluation de l'hémiplégie aigue post-AVC – SOFMER 2024 (poster)
38. Baguet B, Tison E, Gault-Colas C, Peiffer B, Lopes C, Piquet V, Gracies JM, Pradines M, Baude M. Fiabilités intra- et inter-évaluateurs des étaes additionnelles de l'Echelle en 5 Etapes au membre inférieur chez le sujet atteint de parésie spastique déformante – SOFMER 2024 (poster)
39. Baude M, Poitou T, Gault-Colas C, Pradines M, Motavasseli D, Gracies JM. Vers une nouvelle évaluation de l'hémiplégie aigue post AVC : le score *early Composite X_A* – SOFMER 2024 (intervention orale)
40. Michallet C, Poitou T, Audureau E, Gault-Colas C, Gracies JM, Baude M, Pradines M. Prédicteurs cliniques de la vitesse de marche dans l'hémiplégie chronique : une approche par équations structurelles – SOFMER 2024 (intervention orale)

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Introduction

- Figure 1** : Les trois étages de la face : supérieur, moyen, inférieur.
- Figure 2** : Principaux éléments de l'anatomie de surface de la face et du cou.
- Figure 3** : Eléments osseux constitutifs du massif facial.
- Figure 4** : Eléments osseux constitutifs du cou.
- Figure 5** : A. Anatomie multicouche de la joue, de l'os à la peau. B. Compartiments graisseux superficiels mobiles.
- Figure 6** : Schéma d'une coupe transversale de peau du visage et du cou.
- Figure 7** : Coupe transversale de la structure de l'épiderme.
- Figure 8** : Systèmes musculo-aponévrotiques superficiels.
- Figure 9** : Muscles peauciers et manducateurs de la face et du cou sur une vue de face.
- Figure 10** : Muscles peauciers sur une vue de profil.
- Figure 11** : Muscle releveur de la paupière supérieure et muscle tarsal supérieur.
- Figure 12** : Muscle masséter.
- Figure 13** : Muscles temporal (A), ptérygoïdien médial et ptérygoïdien latéral (B).
- Figure 14** : Branches nerveuses d'innervation sensitive de la face, du cou et du scalp.
- Figure 15** : Auricule.
- Figure 16** : Dermatomes des nerfs cervicaux.
- Figure 17** : Rameaux terminaux du nerf facial dans la face.
- Figure 18** : Nerf visible en vert sur cette photo prise en microscopie confocale sous la peau d'une souris dont les follicules pileux sont visibles en rouge et en bleu foncé
- Figure 19** : Vascularisation de la face.
- Figure 20** : Connexions veineuses intracrâniennes.
- Figure 21** : Vascularisation lymphatique de la face.
- Figure 22** : Système lacrymal, vue antérieure.
- Figure 23** : Innervation des paupières.
- Figure 24** : Glande parotide, vue latérale.
- Figure 25** : Glandes submandibulaire et sublinguale.
- Figure 26** : Photographies des 22 émotions de l'être humain.
- Figure 27** : Schématisation des noyaux des nerfs crâniens, vue dorsale.
- Figure 28** : Noyaux du nerf abducens (VI) et du nerf facial (VII).
- Figure 29** : Tronc cérébral – origine des nerfs crâniens sur une vue antérieure.
- Figure 30** : Nerf facial et nerf vestibulo-cochléaire.
- Figure 31** : Nerf facial dans le canal facial sur une coupe longitudinale de l'oreille moyenne.
- Figure 32** : Branches collatérales du nerf facial sur une vue latérale.
- Figure 33** : Trajet périphérique du nerf facial.
- Figure 34** : Fibres gustatives afférentes et voie gustative.
- Figure 35** : Innervation parasympathique des glandes de la face.
- Figure 36** : Groupe fronto-orbitaire des muscles de la face.
- Figure 37** : Principales rides de la face et du cou.
- Figure 38** : Groupe nasal des muscles de la face.
- Figure 39** : Groupe oral des muscles de la face.
- Figure 40** : Principaux muscles peauciers de la face et du cou sur une vue de profil.
- Figure 41** : Mesure SWE à l'aide de la sonde SuperLinear™ SLH20-6 sur le muscle zygomaticus major.
- Figure 42** : Schématisation des voies sensitives de la face et du cou.
- Figure 43** : Terminaisons nerveuses cutanées in situ.

- Figure 44** : Récepteurs somatosensoriels de la peau.
Figure 45 : Innervation sensitive de la peau du visage, du crâne et du cou.
Figure 46 : Innervation volontaire centrale de la zone nucléaire faciale dans le tronc cérébral.
Figure 47 : Neuroanatomie et clinique distinctives entre parésie faciale périphérique (PFP) et « parésie centrale » (PFC).
Figure 48 : Photographie d'une patiente de l'étude VISAGE présentant une PFP gauche chronique avec hyperactivité.
Figure 49 : Sunnybrook Facial Grading System.
Figure 50 : Instructions et grille d'évaluation de l'Echelle de Créteil.

Chapitre II : Présentation de l'étude VISAGE

- Figure 51** : Phases de l'étude VISAGE.
Figure 52 : Fiches d'autorééducation guidée de l'étude VISAGE (groupe CAG).
Figure 53 : Ordonnance d'autorééducation guidée de l'étude VISAGE (groupe CAG).
Figure 54 : Rythme des inclusions de l'étude VISAGE.

Chapitre III : Base de données normatives tridimensionnelles faciales via un système portatif chez le sujet sans lésion du nerf facial

- Figure 55** : Sujet de la phase clinique de VISAGE équipé avec le casque Cara™(VICON).
Figure 56 : Modèle géométrique d'analyse des mouvements faciaux de l'étude VISAGE.
Figure 57 : Photographie des marqueurs faciaux d'une patiente de la phase clinique de VISAGE.
Figure 58 : Architecture du traitement des données.
Figure 59 : Analyse des mouvements des 10 muscles de l'étude.
Figure 60 : Indices d'asymétrie au repos pour chaque paire de marqueurs.
Figure 61 : Indices d'asymétrie au repos et en contraction maximale pour chaque tâche.
Figure 62 : Indices de Procruste au repos et en contraction maximale pour chaque tâche.
Figure 63 : Exemple d'indices de Procruste (%) chez une patiente présentant une parésie faciale périphérique gauche.

Chapitre IV : Corrélations entre échelles de qualité de vie et échelles de motricité faciale chez le patient parétique au stade chronique

- Figure 64** : Matrice de corrélation entre questionnaires et échelles cliniques de l'étude.
Figure 65 : Réseau des corrélations entre questionnaires et échelles cliniques de l'étude.
Figure 66 : Diagrammes de corrélations bivariées.
Figure 67 : Biplot entre les variables des questionnaires et des échelles cliniques en fonction de la cause de la PFP (idiopathique vs. non idiopathique).
Figure 68 : Matrice de corrélation entre les questionnaires et les échelles cliniques de l'étude avant corrections pour la multiplicité des tests.

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : Introduction

Tableau 1 : Synthèse anatomico-fonctionnelle des muscles peauciers du visage et du cou.

Chapitre II : Présentation de l'étude VISAGE

Tableau 2 : Registre d'autorééducation guidée du groupe CAG de l'étude VISAGE.

Tableau 3 : Calendrier de l'étude et actions menées.

Chapitre III : Base de données normatives tridimensionnelles faciales via un système portatif chez le sujet sans lésion du nerf facial

Tableau 4 : Muscles faciaux étudiés, tâches et marqueurs d'intérêt correspondant.

Tableau 5 : Position et identification des marqueurs faciaux de l'étude.

Tableau 6 : Précision du positionnement des marqueurs entre deux évaluations à une semaine d'intervalle.

Tableau 7 : Base de données normatives 3D de la partie supérieure de la face.

Tableau 8 : Base de données normatives 3D de la partie moyenne de la face.

Tableau 9 : Base de données normatives 3D de la partie inférieure de la face.

Chapitre IV : Corrélations entre échelles de qualité de vie et échelles de motricité faciale chez le patient parétique au stade chronique

Tableau 10 : Caractéristiques démographiques de la population d'étude.

Tableau 11 : Données des questionnaires et des échelles de la population d'étude.

Tableau 12 : Données cliniques selon la cause de la PFP.

Tableau 13 : Données cliniques selon l'ancienneté de la PFP.

Tableau 14 : Données cliniques selon le sexe.

Tableau 15 : Données cliniques selon l'âge.




PUBLICATIONS LIEES A LA THESE

Guihard *et al.*, Biomed Research International, 2022

Hindawi
BioMed Research International
Volume 2022, Article ID 2774713, 12 pages
<https://doi.org/10.1155/2022/2774713>

Research Article

Three-Dimensional Quantification of Facial Morphology and Movements Using a Wearable Helmet

Marina Guihard ¹, Jean-Michel Gracies ^{1,2} and Marjolaine Baude ^{1,2}

¹BIOTN Research Unit, UPEC University, 94000 Créteil, France

²Rehabilitation Unit of Henri Mondor Hospitals, 1 Rue Gustave Eiffel, 94000 Créteil, France

Correspondence should be addressed to Marina Guihard; guihard@u-pec.fr

Received 14 September 2021; Accepted 26 January 2022; Published 23 February 2022

Academic Editor: Giuseppe Messina

Copyright © 2022 Marina Guihard et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

This work proposes a 3D normative database of facial ranges of motion in adults free from facial disorders. Ten facial movements were analyzed, each targeting the activity of specific muscle groups innervated by the facial nerve. The experimental protocol included a test-retest reliability positioning procedure of 25 skin markers based on clinical expertise in facial morphology. Three maximal voluntary contractions were recorded for each facial movement studied, using a 3D facial motion capture helmet. We included 53 adults free from facial disorders (26 men; age 43 ± 14), evaluated twice one week apart. The reliability of marker positioning was expressed as absolute measurement errors. The range of motion vectors of all markers from the best rest to the maximal voluntary contraction was calculated for each muscle group. Primary, secondary, and tertiary markers were extracted for each facial movement. 3D Procruste and asymmetry indices were developed. This allowed the identification of common thresholds of 10% for the asymmetry index and of 6 mm for the Procruste index, beyond which facial motions would be considered abnormally asymmetric. The normative database quantifies facial motions and allows assessment of the degree of clinical disorders by comparison. This protocol is currently being investigated in patients with chronic unilateral peripheral facial paresis.

1. Introduction

Impairment of the facial nerve has functional, aesthetic, and emotional impacts which can lead to social isolation and depression [1]. Assessment of facial motions remains a challenge because it involves a high number of short muscle groups, often difficult to locate and with a small range of motion (ROM) [2, 3]. Besides, each face is unique in terms of dimensions, proportions, and even degree of symmetry. No standard model has been established.

Peripheral facial paresis (PFP) is a common disease that generally affects middle-aged patients, regardless of sex [4, 5]. In clinical practice, the degree of facial dysfunction is evaluated primarily by subjective clinical grading scales [6, 7]. Functional or plastic reconstructive surgical procedures attempt to bring solutions for acute local disorders and may produce significant improvements [8, 9] whereas physical rehabilitation is aimed at improving the neuromuscular

control of facial muscles. Rehabilitation-induced motion recovery after facial paresis may then prove very slow, which requires precise quantification tools to detect motor skill improvements [10]. It is likely that the combination of validated quantification techniques and clinical scales should improve evaluation objectivity and reliability [11].

The objective tools are based on specific motion measurements in two dimensions [12, 13] and three dimensions [14–19], on shape analysis as for topography indices [20], using stereophotogrammetric procedures [21] or 3D mesh processing [22]. It is now established that 2D analysis is not sufficient to measure facial motions as 2D measurements ignore anterior-posterior axis displacements [10]. In 1999, Frey et al. designed a 2D device equipped with 2 mirrors and a calibration grid to compute the third dimension [23]. This device was marketed and used in a major international study on 241 PFP patients reported by Tzou et al. in 2012 [18]. 3D capture motion principle is based on the

tracking of markers glued to the skin with several cameras placed around the head. For a long time, 3D analysis was limited to research studies as experimental conditions were unrealistic for wider use in clinical practice [24]. Furthermore, head motion during recordings compromised the reliability of the data. It is essential to define a common frame independent of head motions. In recent works, Ben Mansour et al. [25] compared three anatomical references composed of two rigid structures with bonded markers fixed in the maxillary, the auricle, and a pericranial band and determined that the device fixed to the jawbone is the best reference. Vimercati et al. [15] as well as Feng et al. [16] proposed a rigid support fixed on the head with reflective points. Trotman et al. performed a Procruste rotation to fit individual frames onto a standardized template to counteract head motions [19].

With the rise of biometric facial recognition and the development of custom avatars in videogames, technological advances have brought about new tools. In this work, we used the VICON Cara device, an instrumented helmet able to track small markers in 3D, even with large head motions (Vicon Oxford, UK). Aside from being the most recent technology specifically designed for facial motion analysis, this device offers a new flexibility, suitable for wide clinical measurement campaigns.

Beyond the acquisition system tool, the objective to describe the facial nerve function in terms of facial motions depends on the experimental protocol. The first challenge is to select marker types and positions. Most previous studies used adhesive and reflective markers of different diameters (from 3 mm [15, 19] up to 9 mm [17]). Tzou et al. reported that low contrast and shadows of facial creases sometimes interfered with the tracking process [18]. These authors tested active markers and reported the difficulty of attaching them to the skin. In their perspectives, Vimercati et al. proposed to use a pen with reflective ink [15] in order to ease marker positioning, to allow the use of smaller markers, and to decrease preparation time. In this work, we drew 2 mm diameter dots using a standard makeup pen using various colours depending on skin pigmentation.

The marker locations are key for the recording of maximal ranges of motion. Facial motion analysis involves more than 20 muscle groups on each side of the face, which overlap in a small volume. There are no known perfectly still facial points [26] although specific anatomical points are commonly studied (nasion, mouth commissures, base of the nose wings, frontal) [10, 27]. Their location is usually determined to describe the facial soft tissue structure for surgical reconstruction purposes [28] or for discrimination purposes of facial motion [29]. Our objective differs here, as we focus on assessing potential changes in facial neuromuscular control in PFP patients. Facial markers must be located at the point that will move the most during maximal muscle fiber recruitment in target muscle groups. Bandini et al. developed recent automatic detection marker algorithms and demonstrated a bias correlated with the severity of facial impairment [30]. We opted for a precise positioning technique based on careful inspection by an experienced senior physician (MB). We developed a precise positioning tech-

nique based on careful inspection by an experienced senior physician (MB). Twenty-five dots were traced on the face, of which 18 served for motion investigations. Rest and maximal voluntary contractions were recorded to estimate the ranges of motion for 10 facial muscle groups.

Symmetrization is deemed to be related to aesthetic appeal [22]. Therefore, many studies have been based on superimposing the two hemifaces and analyzing shapes using image processing [21, 31, 32] or computing the average distance of pairs of markers and the percentage of coincidence [33, 34]. The Procruste analysis duplicated the original landmarks in a mirror version reflecting along the sagittal plane [35] or the plane of maximum symmetry [36, 37] or an arbitrary plane outside of the face [21, 38]. This mirror technique does not fit our objective of assessing paretic facial motions, as the unaffected hemiface is influenced by the movements of the affected hemiface in both intended and unintended movements [19, 39]. Hyperactive reactions due to synkinesia or opposite directions of facial movements of the flaccid hemiface affect symmetry [40]. In this work, we propose to use a classical asymmetry index and a new Procruste index.

To the best of our knowledge, this work is the first attempt to quantify 3D motion for the main facial muscle groups. It provides a normative database with which facial disorders can be compared. It is part of the preclinical phase of the government-funded VISAGE project (NCT04074018).

2. Materials and Methods

2.1. Experimental Protocol. To assess facial movements, we identified 10 main muscle groups and defined the corresponding bilateral tasks. Subjects were to perform each task with a maximal voluntary contraction. Three maximal voluntary contractions were recorded lasting three seconds each, separated by five seconds of rest periods [10, 15]. Table 1 displays the target muscle groups and the description of the tasks in the order prescribed by the clinician.

The Cara device, initially designed for film and game studios, is an instrumented 4 camera-helmet, weighing 1.2 kg, with comfortable fastening straps and a controllable rig of four on-board lights to adjust marker contrasts according to skin pigmentation (see Figure 1).

Fifty-three adults without PFP (26 men; age 43 ± 14) with no cervico-facial injuries or neurologic disorders participated twice at least one week apart ($n = 53$ participants, $n' = 106$ evaluations) (ID-RCB 2018-A01815-50). An experienced rater manually drew 25 dots on the face using a makeup pencil. A specific procedure was followed to identify the best location of each marker based on the maximum recruitment of the target muscle fibers and of the facial morphology. Table 2 displays the marker names and descriptions in relation to the photograph.

Subjects were first trained to perform the 10 tasks in front of a mirror for visual feedback. They were then seated comfortably on a chair, and the instrumented helmet was set upon their head. The helmet was mounted with a rigid connection to the head. The room light intensity was adjusted to

TABLE 1: Muscle and task correspondence.

Target muscle groups	Task description	Markers of interest
Frontalis	Eyebrow raising	F3, F4
Corrugator	Eyebrow frowning	S1, S2
Procerus	Nose crinkling	S1, S2
Orbicularis oculi	Eyes closure	Y1, Y2
Canine	Nose wings up (detect smell)	N1, N2
Zygomaticus	Smile mouth open	B1, B2
Buccinator	Cheek sucking	J1, J2
Orbicularis oris	Cheeks inflating	J1, J2
Triangular	Corners of the mouth lowering	B1, B2
Mentalis	Lower lip curling	M1, M2

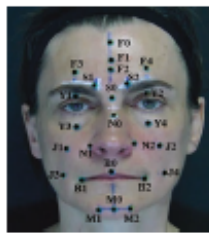


FIGURE 1: VICON Cara helmet device.

TABLE 2: Marker positions.

Lateral markers			
F3	Forehead right side	F4	Forehead left side
S1	Eyebrow right side	S2	Eyebrow left side
N1	Nose right side	N2	Nose left side
B1	Right mouth corner	B2	Left mouth corner
M1	Chin right side	M2	Chin left side
J1	Cheek right side high	J2	Cheek left side high
J3	Cheek right side low	J4	Cheek left side low
Y1	Right eyelid	Y2	Left eyelid
Y3	Right eye	Y4	Left eye

Central markers	
F0	Forehead center high
F1	Forehead middle center
F2	Forehead center low
S0	Eyebrow center
N0	Nose center
B0	Mouth center
M0	Chin center



achieve clear views from all cameras, avoiding subject discomfort.

2.2. *VICON Cara Softwares.* The Vicon Cara system comprises two softwares: Caralive records live captures with four backlighted cameras, and Carapost tracks all markers and provides their coordinates in a helmet-dependent orthonormal reference frame. A configuration step consisted of detecting the markers (size, brightness threshold) and checking their tracking along the capture.

The acquisition frequency was 50 Hz. A 2D anatomical reference plane was defined using 3 points: 2 external end points of the eyes and N0. The origin of the coordinate system was the centroid of the three points. The X-axis was the line between the 2 external canthi. The Y-axis was the line perpendicular to the X-axis that crossed the origin of the coordinate system in the reference plane. The Z-axis was the line perpendicular to the reference plane that crossed the origin of the coordinate system. All coordinates were converted to a text file format.

2.3. *Data Processing.* Specific software was developed using MATLAB. The development of automation modules at different stages of motion processing is described in Figure 2.

As motion was recorded in mobile reference frames, the first step was to define a common reference frame from one evaluation to another for the same participant. A change in the initial frame proposed by the Carapost software was performed. The origin was placed on the N0 marker, which is the most central and easiest to position [10, 13, 27]. The X-axis remained unchanged (line from N0 to the external canthus), and the Y-axis was positioned along the line N0-F0 to define the sagittal plane as $(N0, \vec{y}, \vec{z})$ plane.

The second step consisted of locating the maximal movement on the three contractions according to task-dependent clinical reference markers and optimal rest. In fact, it appeared that after a maximal contraction, markers rarely returned to their initial positions, making complete relaxation of the group of muscles difficult to achieve. Some recordings showed optimal rest at the beginning, others between contractions. For each recording, an automation procedure was developed to compute the mean of the maximal motion and of the optimal rest over a stable period. Visual as well as automatic verifications were performed to detect outliers. A vector of motion per marker was then computed from the rest position to the maximum motion position for each task as in (1) where $Mark_{Rest_t}$ and $Mark_{Cont_t}$ represent the coordinates of marker i , respectively, at rest and at the maximum of contraction.

$$\vec{\Delta Mark}_i = \vec{Mark}_{Cont_t} - \vec{Mark}_{Rest_t} \quad (1)$$

This process was applied to the 10 tasks of the 106 evaluations to get the mean and standard deviation of all of the 3D spherical coordinates. From the obtained module range of values, relevant markers were determined and classified in three levels as in (2) where $Mark_{prim}^t$, $Mark_{second}^t$, and

$\text{Mark}_{\text{tert}}^t$ represent the set of, respectively, primary, secondary, and tertiary markers for a given task t .

$$\begin{aligned} \text{Mark}_i^t \in \text{Mark}_{\text{prim}}^t &\Leftrightarrow \frac{3}{4} M_{\text{max}}^t \leq \|\overrightarrow{\Delta \text{Mark}_i^t}\|, \\ \text{Mark}_i^t \in \text{Mark}_{\text{second}}^t &\Leftrightarrow \frac{1}{2} M_{\text{max}}^t \leq \|\overrightarrow{\Delta \text{Mark}_i^t}\| < \frac{3}{4} M_{\text{max}}^t, \\ \text{Mark}_i^t \in \text{Mark}_{\text{tert}}^t &\Leftrightarrow \frac{1}{4} M_{\text{max}}^t \leq \|\overrightarrow{\Delta \text{Mark}_i^t}\| < \frac{1}{2} M_{\text{max}}^t \\ &\text{with } M_{\text{max}}^t = \max_{i=1 \text{ to } 24} \|\overrightarrow{\Delta \text{Mark}_i^t}\|. \end{aligned} \quad (2)$$

The last step was to quantify facial asymmetry. Marker pairs were identified from the previous analysis that define the degree of primary, secondary, and tertiary symmetry in relation to their level for each task. Two asymmetry indices were calculated, one for the rest position (3) and one for the maximal voluntary contraction position (4) where C represents the central marker associated with the pairs of markers, R the dominant/healthy side, and NR the other side.

$$\text{IdAsym}_{\text{Rest}} = \frac{\left\| \frac{\overrightarrow{\text{Mark}_C \text{Mark}_R}}{\|\overrightarrow{\text{Mark}_C \text{Mark}_R}\|} - \frac{\overrightarrow{\text{Mark}_C \text{Mark}_{NR}}}{\|\overrightarrow{\text{Mark}_C \text{Mark}_{NR}}\|} \right\|}{\left\| \frac{\overrightarrow{\text{Mark}_C \text{Mark}_R}}{\|\overrightarrow{\text{Mark}_C \text{Mark}_R}\|} + \frac{\overrightarrow{\text{Mark}_C \text{Mark}_{NR}}}{\|\overrightarrow{\text{Mark}_C \text{Mark}_{NR}}\|} \right\|} * 100 (\%), \quad (3)$$

$$\text{IdAsym}_{\text{Cont}} = \frac{\left\| \frac{\overrightarrow{\Delta \text{Mark}_R}}{\|\overrightarrow{\Delta \text{Mark}_R}\|} - \frac{\overrightarrow{\Delta \text{Mark}_{NR}}}{\|\overrightarrow{\Delta \text{Mark}_{NR}}\|} \right\|}{\left\| \frac{\overrightarrow{\Delta \text{Mark}_R}}{\|\overrightarrow{\Delta \text{Mark}_R}\|} + \frac{\overrightarrow{\Delta \text{Mark}_{NR}}}{\|\overrightarrow{\Delta \text{Mark}_{NR}}\|} \right\|} * 100 (\%). \quad (4)$$

These indices were calculated for all evaluations. The mean and standard deviation provided a range of values for a population of patients without PFP, from which asymmetry indices of PFP patients can be later compared. However, these indices may not be adequate to evaluate the progress of facial motion recovery. In fact, unilateral peripheral facial paresis can cause a deformity in which central markers no longer lie on the Y -axis, and the movement of marker pairs on the parietic side becomes inverted compared to expected normal movements. Some patients have flaccid muscles, whereas others have hyperactive reactions characterized by synkinesia. Then, another important objective was to develop indices that can quantify facial asymmetries in patients with PFP. We proposed a new asymmetry index IdPro, based on a Procruste analysis [41] with the central, primary, secondary, and tertiary markers of each task. The computed distance between the dominant and the nondominant sides gave a quantified value reflecting the degree of similarity between the 2 volumes.

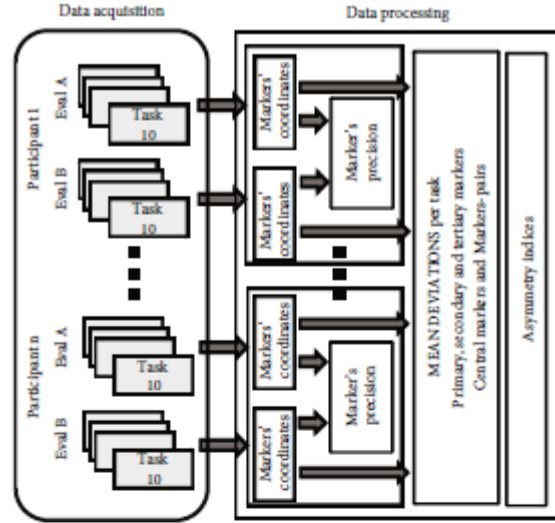


FIGURE 2: Data processing architecture.

3. Results

3.1. Marker Positioning Accuracy. Table 3 shows the differences in the marker positioning test-retest module between the evaluations performed one week apart for each marker. Marker diameters are estimated at 2 mm. Two markers have been removed for the mean computation (0.16%).

3.2. Marker Range of Motion. For each task, a posteriori video analysis was performed to detect motions that were not well performed. 0.6% of the tasks (6 tasks out of 1006) were deleted because the participant was unable to follow the instructions (facial apraxia). It mainly related to the depressor anguli oris task, which is not a common movement in everyday life. Physiological cocontractions of other facial muscles were observed during the requested tasks, leading to the displacement of nonprimary markers. The location and the intensity of cocontractions varied depending on the task, the most obvious being during corrugator activation with the lower face tensed up (3% marker deleted) and for the depressor anguli oris task with cocontraction of the corrugator (6% marker deleted). The rise in the eyebrow—corresponding to the frontalis—was the best performed task (0.05% marker removed). Figure 3 represents the results for the zygomaticus task. It shows the displacement of the lower face markers in the chosen reference frame.

Tables 4–6 display the database built for each task according to the part of the face involved (upper, middle, and lower part). Mean and SD are given for the 106 evaluations to take into account the intrasubject variation of motion from one evaluation to the other, averaging 7% for all the tasks.

3.3. Asymmetry Indices. Figure 4 represents the asymmetry indices computed at rest from Equations (3) to (4) for all

TABLE 3: Marker positions.

Central markers	Right markers	Left markers			
F0	1.63 ± 1.48	F1	2.51 ± 3.16	F2	2.38 ± 3.26
S0	1.05 ± 0.47	F3	3.38 ± 1.39	F4	2.67 ± 1.24
B0	2.25 ± 1.19	S1	2.08 ± 1.10	S2	2.04 ± 1.36
M0	3.49 ± 1.83	N1	2.48 ± 1.12	N2	2.39 ± 1.13
		B1	2.94 ± 1.21	B2	3.20 ± 1.84
		M1	3.50 ± 1.73	M2	3.64 ± 1.80
		J1	3.30 ± 1.07	J2	2.79 ± 1.43
		J3	3.66 ± 1.83	J4	3.90 ± 2.10
		Y1	2.71 ± 1.22	Y2	2.31 ± 1.07
		Y3	2.25 ± 0.94	Y4	2.41 ± 1.18

Marking accuracy between the two evaluations one week apart, mean ± standard deviation of the modules (mm), $n = 53$.

the paired markers. Central markers associated to the marker-pairs F, S, B, and M are, respectively, F2, S0, B0, M0, and N0 for all the others. Figure 5 reports the asymmetry indices computed from Equations (3) to (4) at rest and maximal motion conditions for the markers for interest of each task (see Table 1). In Figure 6, Procruste indices at rest and at maximal contraction are displayed for each task. Primary, secondary, and tertiary lateral and central markers were collected, and the Procruste distance was calculated to match the set of markers of both the nondominant and dominant sides. The Procruste index at rest taking into account all the markers of each side of the face is 2.47 ± 1.16 mm. Figure 7 illustrates an example of the Procruste distance for a patient with chronic left peripheral facial palsy during the zygomaticus task.

4. Discussion

4.1. ROM Analysis. This work provides a database of 10 muscle displacements from rest to maximal voluntary contraction in terms of ROM and orientation. The ROMs of all pairs of markers for each task (see Tables 4–6) are consistent with clinical observations [11]. The standard deviations are related to the diversity of motion performance between the participants. Figure 3 gives an example of how these data will be used in the clinic. It shows which markers are involved and at what level according to Equations (2) for the zygomaticus motion in a free of PF population.

Central markers are involved in multiple ways. M0 and B0 are the most mobile for lower face tasks. For the middle face, procerus and canine tasks involve the displacement of the greatest number of markers. These tasks reflect global facial mobility. Of note, the upper face tasks involve significant cocontractions of the lower face muscles whereas lower face tasks are performed without much cocontractions of the upper face muscles. This suggests that it is “easier” to perform lower face tasks as it is the most mobile and active part of the face: a maximum of 17.6 mm ROM for markers B in the zygomaticus task and 8.6 mm for markers F in the frontalis task. Inflating and sucking the chest involve all the

lower facial muscles. These tasks involve the largest 3D displacements. Cheek sucking (buccinator) is difficult to perform without pursing the lips, leading mentalis markers (M) to become primary markers for this task, unlike the inflating task (orbicularis oris).

Few numerical data from the literature are truly comparable. Some show data in the frontal plane only [13, 15, 17] or for specific vector characteristics [14] or separately for each participant [17, 27] or results after scaling each face to an average facial size [19]. Coulson et al present ROM results of main markers for zygomaticus, frontalis, canine, and OP tasks [10]. Their order of magnitude for the mean is overall lower than our results (from 2 mm for the canine task up to 4 mm for the zygomaticus task). This may be due to the various types and sizes of markers (7 mm versus 2 mm) and the accuracy of positioning. In any case, the standard deviations of all comparable data are similar (from 2.5 to 4.2 mm) for a similar number of participants (42 versus 53). The same observations can be made with the study by Sforza et al., from their reported ROM for the zygomaticus and OP tasks [42]. To some extent, the device first designed by Frey et al. gives similar results with the computation of the third dimension from two 2D analysis [43].

The present work goes further than previous studies, as it presents the mobility of the face through a 3D analysis of 10 groups of muscles. Beyond the markers of interest, all the associated facial motions have been investigated here.

4.2. Symmetry Analysis. The symmetry of the face was quantified through asymmetry indices as performed in clinical grading scales [6]. Figure 4 shows the pairs of marker asymmetry at rest. The face at rest is generally symmetric, and the standard deviations reflect natural differences between the participants. The highest values were found for pairs of markers for which N0 is not the central reference (F: $3 \pm 2.1\%$, S: $4.4 \pm 3.4\%$, M: $2.9 \pm 2.3\%$).

For contraction tasks, the indices presented the asymmetry for pairs of markers of interest in Figure 5. Asymmetry indices IdAsym at maximal contraction are twice greater than at rest ($5.9 \pm 0.8\%$ versus $2.6 \pm 0.9\%$). This reflects the natural asymmetry of human facial contractions. Differences between rest and contraction asymmetry indices range from 1% for procerus and mentalis tasks to 5% for triangular, buccinator, and orbicularis oris tasks. Cheek movements involve a high 3D mobility of soft tissues, and the depressor anguli oris task is the most difficult task to perform. SD are representative of the population heterogeneity. Our definition of asymmetry indices was similar to that proposed by Sforza et al. [42] although these authors put forward a mean value for a group of markers for each task. For the zygomaticus task, its mean value was 5.57%, similar to our results (5.12%).

In view of these results, the IdAsym threshold of 10% seems an indicator of abnormal facial symmetry. Thus, these indices indicate objective values on local asymmetry, to be compared with clinical grading scales.

Traditional mirror techniques are inappropriate for our final purpose; as for paretic patients, the unaffected hemiface is influenced by the movements of the affected hemiface in both intended and unintentional movements [19, 39].

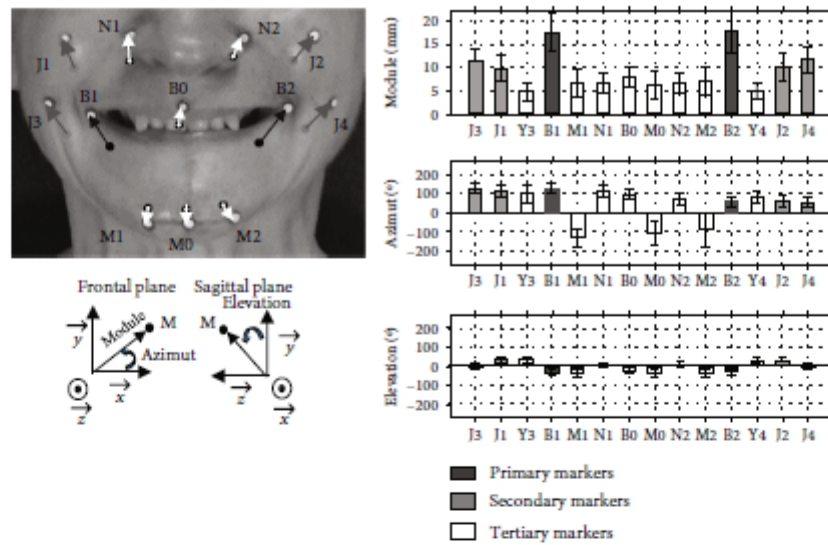


FIGURE 3: Analysis of the zygomaticus motion. The bar graphs represent the mean \pm standard deviation of the free PFP participants for the primary, secondary, and tertiary markers determined as in (2) in spherical coordinates, $n' = 106$.

Hyperactive reactions due to facial synkinesia or facial spasms [40], as well as flaccid area behavior, require the definition of adapted asymmetry indices. We propose a Procruste index computed for each task. This method is well known in geometric shape analysis [41] and has been developed for the assessment of bilateral symmetry [44] by comparing the original configuration with a mirror reflection configuration. Previous works proposed an asymmetry index focused on the lower face [36, 45] or on the whole face [19]. We propose a Procruste index IdPro without any projection of one side to another but comparing left and right 3D specific shapes including central markers. Figure 6 provides data for each task taking into account all primary, secondary, and tertiary markers of each side. All mean values are comprised between 1.61 and 4.65 mm. The difference between rest and maximum contraction of this index is twice less that of the previous local index (26% versus 56%) with similar SD. IdPro index is more representative of facial asymmetry as it compares volumes, whereas IdAsym index compares vector modules. In view of these results, the IdPro threshold of 6 mm seems an indicator of abnormal facial symmetry. Facial synkinesia can also be quantified through an analogous Procruste study as proposed on clinical grading scales [6].

Finally, Figure 7 illustrates the relevance of this index in defining a pathological smile. The IdPro index at rest (4 mm) is in agreement with the mean value of Figure 6 (3.0 ± 1.8 mm), and in contraction, this index is 8.7 times higher (28 mm versus 3.3 ± 2.0 mm). This is in agreement with the literature showing greater asymmetry in maximal contraction than at rest for patients with facial paresis [35].

4.3. Protocol Assessment. The objective to measure the facial motions resulted in the definition of 10 tasks, each of them

focusing on a facial muscle activation reflecting facial nerve function. In the literature, the number of markers varies from a few dots distributed on anatomical points [15, 17, 26, 27] to high number of dots ($nd = 64$ [35], $nd = 109$ [46]). We chose 25 markers (drawn dots)—seven central and 18 lateral—to cover all the areas observed in the clinic without excessively complicating the practical experimental protocol. The size, type, and location of the markers were drawn from over 10 years of clinical experience for a senior facial paresis clinical expert (MB). The location of the lateral markers was derived from the clinical observation of the most mobile areas and from the morphology of the face. Drawing the facial dots directly on the skin reduced preparation time and probably provided better accuracy than 3D hemispherical or spherical markers and minimized the tracking error, although this comparison was not formally performed.

The VICON Cara helmet was developed for facial motion tracking toward the design of video games. To our knowledge, no medical application had been developed to date. This tool enables multiple assessments with the same environment, and its wearability brings new flexibility to enable wide clinical measurement campaigns. The reference frame is on the helmet, free from head motion. Furthermore, the exact positioning of the helmet is not a problem, as we aim to quantify ROM from one evaluation to the next.

In the literature, performed tasks have been selected to demonstrate the precision of the measurement tool [15] or to focus on specific movements, primarily to assess the effects of surgical procedures. The most studied facial expressions have been smiling, raising eyebrows, and dosing the eyes [12, 14, 35]. To our knowledge, no studies have investigated buccinator and orbicularis oris muscle groups, involved in cheek and mouth functions. Mentalis and

TABLE 4: Upper face database.

Frontalis			Corrugator						
Primary markers	Secondary markers	Tertiary markers	Primary markers	Secondary markers	Tertiary markers				
F3	8.60 ±2.71	F2	6.15 ±2.53	F1	4.19 ±2.47	F3	9.73 ±2.16	Y3	3.45 ± 2.20
F4	8.73 ±2.65			S0	4.32 ±1.72	F4	9.68 ±2.61	Y4	3.43 ±2.28
S1	10.25 ±2.74			B0	3.53 ±1.11	S1	7.10 ±1.83	F2	3.38 ±1.84
S2	10.40 ±2.58			M0	4.72 ±1.58	S2	7.36 ±2.05		
Y1	9.22 ±2.54			B1	4.13 ±1.32	Y1	7.96 ±2.39		
Y2	9.45 ±2.59			B2	4.14 ±1.38	Y2	7.37 ±2.56		
				M1	4.68 ±1.58				
				M2	4.73 ±1.59				
				J3	4.01 ±1.39				
				J4	3.96 ±1.46				

Orbicularis oculi					
Primary markers	Secondary markers	Tertiary markers			
F3	9.45 ±2.66	S1	8.01 ±2.53	F1	3.98 ±2.21
F4	9.22 ±3.01	S2	8.20 ±2.66	F2	5.03 ±2.35
J1	9.39 ±2.99	J3	6.61 ±2.71	S0	3.47 ±1.76
J2	8.98 ± 2.80	J4	6.06 ±2.32	B0	3.36 ± 2.30
Y1	11.57 ±2.55			M0	3.52 ±1.94
Y2	11.40 ±2.77			N1	5.67 ±2.52
Y3	10.30 ±1.83			N2	5.21 ±2.47
Y4	10.22 ±1.83			B1	4.65 ±3.18
				B2	4.19 ±2.65
				M1	3.44 ±1.85
				M2	3.42 ±1.78

Data presented as mean ± standard deviation of modules (mm), $n' = 106$.

depressor anguli oris are also relatively unexplored. This protocol is therefore more complete than most the prior literature in the field.

A scaling to the average facial size has occasionally been proposed in the literature to eliminate the effect of differences in facial dimensions, using either a mean ratio between facial height and width [42] or an averaged Procruste distance of the face [19]. We did not adopt such a scaling, as muscle contraction-induced motions correlate not only with muscle dimensions but also with muscle activation [47]. No *a priori* relations between face dimensions and muscle ROM can be set, and scaling may add processing errors. We elected to handle facial morphological differences by working on a sufficient number of subjects to cover a large population of middle-aged adults. The standard deviations that were derived here appear to be greater than with an *a priori* scaling but may be more representative of the variety of facial muscle ROM.

The convenience sample of free from PFP subjects was selected to be balanced between men and women (26 men, $n = 53$) and middle-aged (43 ± 14) to be comparable with

the PFP population. Previous studies have shown that age has an impact on facial dimensions and that male has greater facial motions than female [42, 43].

Another challenge was the definition of relevant indices capable of quantifying PFP in the clinical setting. Some authors proposed specific distances, angles, or ROM as a function of a specific facial area: mouth [15] and lower or upper face [14, 18]. Others proposed the marker excursion of all markers studied [10, 43]. Symmetry was mostly quantified following the mirror principle from one side to another [33, 34]. Our results determine the main markers involved for each movement, sorted according to their degree of motion (see Tables 4–6). The module and the arguments give the magnitude and orientation of each vector (see Figure 3). This direction of movement is essential as for PFP patients; the unaffected hemiface may be influenced by the movements of the affected hemiface in both intended and unintentional movements [19, 39]. Regarding asymmetry indices, our contribution proposes a Procruste study related to each task. Finally, we propose two reference thresholds as indicators of abnormal facial asymmetry.

TABLE 5: Middle face database.

	Procerus			Canine		
	Primary markers	Secondary markers	Tertiary markers	Primary markers	Secondary markers	Tertiary markers
F3	8.43 ±2.79	F1 5.46 ±2.47	F0 3.62 ±1.92	N1 10.01 ±2.31	F2 5.97 ±2.24	F0 3.45 ±1.59
F4	8.19 ±2.91	F2 6.66 ± 2.70	S0 4.81 ± 1.70	N2 9.74 ±2.26	B0 6.47 ±3.06	F1 4.94 ±1.96
S1	8.49 ±2.52	B0 6.28 ±3.31	M0 4.84 ±2.77	J1 10.24 ±3.36	F3 5.88 ±2.66	S0 4.34 ±1.41
S2	8.66 ±2.68	B1 7.30 ±3.65	M1 4.75 ±2.48	J2 9.60 ±3.01	F4 5.63 ±2.62	M0 4.75 ±3.03
N1	9.04 ±3.12	B2 7.50 ±3.41	M2 4.70 ±2.59		S1 6.90 ±2.19	M1 4.68 ±2.99
N2	9.05 ±3.05	J3 7.26 ±2.63			S2 7.05 ±2.43	M2 4.64 ±2.97
J1	10.14 ±3.12	J4 7.00 ±2.34			B1 7.00 ±3.47	Y1 5.12 ±2.39
J2	9.80 ±2.94	Y1 7.78 ±2.66			B2 6.99 ±3.46	Y2 5.19 ±2.53
		Y2 7.32 ±2.53			J3 7.01 ±3.41	
		Y3 6.23 ±2.12			J4 6.73 ±2.73	
		Y4 6.05 ±2.22			Y3 5.84 ± 2.70	
					Y4 5.47 ±2.27	

Data presented as mean ± standard deviation of modules (mm), $n = 106$.

TABLE 6: Lower face database.

	Buccinator			Orbicularis oris		
	Primary markers	Secondary markers	Tertiary markers	Primary markers	Secondary markers	Tertiary markers
M0	16.53 ±6.99		B0 6.95 ±2.68	B1 15.05 ± 3.60	B0 9.80 ±3.78	M0 7.28 ±3.79
B1	12.24 ±2.88		J1 4.00 ±1.61	B2 15.19 ±3.45	J1 7.99 ±3.22	N1 3.83 ±2.02
B2	12.80 ±3.18		J2 4.31 ±1.91	J3 13.02 ±3.54	J2 7.85 ±2.97	N2 3.45 ±2.09
M1	15.42 ±6.47			J4 12.90 ±3.28		M1 6.98 ±3.35
M2	15.61 ±6.69					M2 6.96 ±3.55
J3	12.31 ±3.75					
J4	12.22 ±3.78					

	Zygomaticus			Triangular		
	Primary markers	Secondary markers	Tertiary markers	Primary markers	Secondary markers	Tertiary markers
B1	17.53 ±4.17	J1 9.91 ±2.79	B0 7.89 ±2.11	B1 10.54 ±4.34	M0 7.18 ±3.84	B0 4.46 ±2.06
B2	17.64 ±4.39	J3 11.43 ±2.59	M0 6.35 ±2.99	B2 10.46 ±4.42	J3 5.95 ± 2.80	
		J2 10.15 ±2.91	N1 6.74 ±2.21		J4 5.90 ±2.59	
		J4 11.56 ±2.73	N2 6.67 ±2.26		M1 6.43 ±3.39	
			M1 6.62 ± 2.90		M2 6.39 ±3.38	
			M2 6.88 ±2.91			
			Y3 5.01 ±1.89			
			Y4 5.01 ±1.86			

	Mentalis		
	Primary markers	Secondary markers	Tertiary markers
M0	12.05 ±3.64		B0 4.38 ± 2.20
M1	10.86 ±3.49		B1 5.49 ±2.97
M2	10.69 ± 3.60		B2 5.34 ±2.89
			J3 3.62 ±1.85
			J4 3.65 ±1.86

Data presented as mean ± standard deviation of modules (mm), $n = 106$.

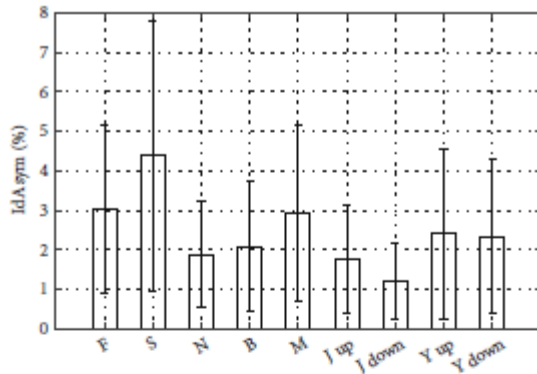


FIGURE 4: Asymmetry indices at rest for each pair of markers (see Table 2). Data presented as mean \pm standard deviation (%), $n = 106$.

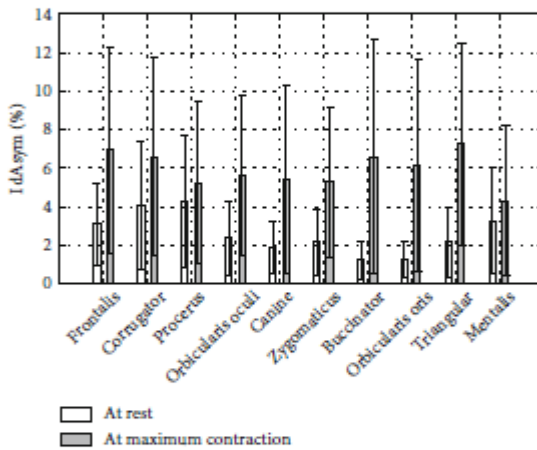


FIGURE 5: Asymmetry at rest and maximal contraction per task for pairs of markers of interest (see Table 1). Data presented as mean \pm standard deviation (%), $n = 106$.

5. Limitations and Strengths of the Study

5.1. Protocol Safety and Feasibility. The first concern was to evaluate how consistent the assessment protocol would be with evaluation of PFP patients in the clinical setting. The total time required for the clinic visit is estimated to be 45 minutes, including 15 minutes of marker setting and 20 minutes of motion recordings. The helmet was well accepted by our healthy participants (1.2 kg). Only one of them, with a history of chronic headache, reported light headache due to light intensity, which was adjusted accordingly during the retest evaluation.

The second concern was about the accuracy of marker positioning. Table 3 displays the mean of the 3D error modules between evaluations A and B. The mean total error is 2.65 ± 0.60 mm. Four key factors may be involved: marker shape and size (\varnothing 2 mm), reference frame readjustment,

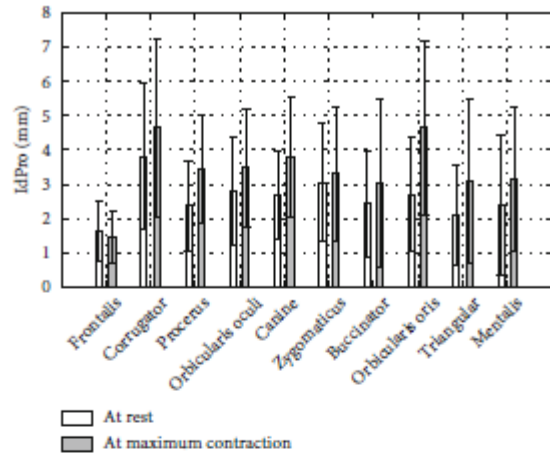


FIGURE 6: Procrustes indices per task. Data presented as mean \pm standard deviation (mm). Volumes of central and primary/secondary/tertiary side markers reported in Tables 4–6, $n = 106$.

evaluator thoroughness, and skin properties. The first two are intrinsic to the process, the third depends on the degree of experience of the evaluator, and the last one on the facial features of the subject. The same order of magnitude was observed for marker pairs in a previous study [15]. Positioning errors from one evaluation to another are greater for markers located on soft tissues (B, M) or far from anatomical landmarks (J) than for markers easy to ascertain (F, S, N, Y). Vimercati et al. report the same conclusions for markers located at the apex of the cheek bone and at the mandibular joint [15]. In the literature, errors have been expressed through a statistical intraclass correlation [15], by identifying specific distances and angles [14, 16] or by the percentage of position error of each marker in the frontal plane [14]. These experimental protocols removed all markers and recorded motions in a time interval of a few minutes and without removing the rigid support on which the reference frame was based [14–16]. This seems impractical in the clinic as the patient often returns to the clinic several months after the previous visit. The process has to be reproducible from one examination to another. To our knowledge, no study reports 3D absolute positioning errors with the whole process replicated one week apart.

5.2. Limitations. The limits of our study relate to the facial complexity. The uniqueness of each face requires a specific positioning of the markers by a senior expert. Another limit is the time consumption of our data analysis, which was estimated around one hour in total, including the 40-minute clinical time with the patient. Our tested population should also be extended both in terms of number and of diversity (including Hispanic, Black, and Caucasian populations) to include ethnic differences [48].

5.3. Future Developments. Future work will complete this database, providing synkinesia indices and evaluating

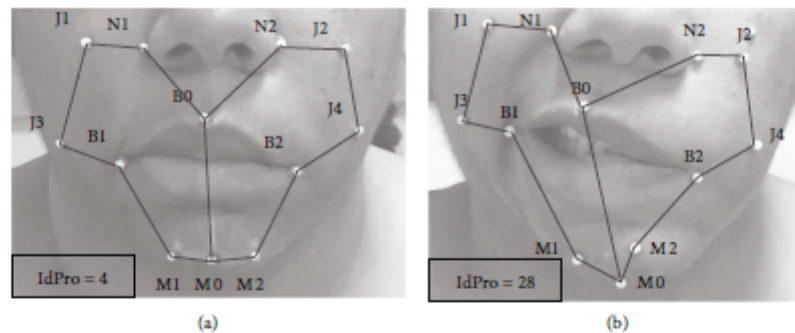


FIGURE 7: Example of Procruste indices (mm) in a patient with left chronic PFP: (a) rest; (b) maximal contraction of the zygomaticus.

spontaneous facial movements by measuring contraction velocities [14, 19] and nonvoluntary emotion-induced movements. This protocol is currently being investigated for PFP patients (clinical phase of the government-funded VISAGE project, $n = 82$) with the objective of quantifying the effect of two rehabilitation programs on the recovery of facial motion in chronic stages. We will carry out a correlation study between the 3D findings and conventional clinical grading scales.

Finally, the emergence of 3D cameras will bring easier to implement devices in the next decade. Future comparisons could be made with our findings [49].

6. Conclusions

An objective and reliable tool allowing to quantify facial motions usable in the clinical setting is actually lacking. Previous 3D capture motion devices were difficult to utilize for both experimental and data processing time-consumption reasons. We used a wearable instrumented helmet specially designed for tracking facial motions and proposed an experimental protocol to assess 10 facial muscle groups with associated asymmetry indices. To our knowledge, this work provides the most complete database of nonparetic facial motions from rest to maximal voluntary contraction. Measurements of local asymmetry of pairs of markers and overall asymmetry based on volume Procruste indices complete this facial mobility study. By comparing PFP recordings to this normative database, the proposed protocol will allow quantifying the severity of PFP disorders and assessing therapeutic options such as rehabilitation programs, botulinum toxin injections, or facial surgeries.

Data Availability

The PC_VISAGE data used to support the findings of this study may be released upon application to the DRCI-URC AP-HP CHU Henri Mondor, who can be contacted at marjolaine.baude@aphp.fr.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no conflicts of interest.

References

- [1] J. A. Owusu, C. M. Stewart, and K. Boahene, "Facial nerve paralysis," *The Medical Clinics of North America*, vol. 102, no. 6, pp. 1135–1143, 2018.
- [2] K. Sekikawa, H. Moriyama, H. Miyaso et al., "Evaluation of Yanagihara facial nerve grading system based on a muscle fiber analysis of human facial muscles," *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, vol. 276, no. 7, pp. 2055–2060, 2019.
- [3] L. Cattaneo and G. Pavesi, "The facial motor system," *Neuroscienze and Biobehavioral Reviews*, vol. 38, pp. 135–159, 2014.
- [4] E. Peitersen, "Bell's palsy: the spontaneous course of 2,500 peripheral facial nerve palsies of different etiologies," *Acta oto-laryngologica*, vol. 122, pp. 4–30, 2002.
- [5] J. Finsterer, "Management of peripheral facial nerve palsy," *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, vol. 265, no. 7, pp. 743–752, 2008.
- [6] S. E. Coulson, G. R. Croxson, R. D. Adams, and N. J. O'dwyer, "Reliability of the 'Sydney,' 'Sunnybrook,' and 'House Brackmann' facial grading systems to assess voluntary movement and synkinesis after facial nerve paralysis," *Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, vol. 132, no. 4, pp. 543–549, 2005.
- [7] A. Y. Fattah, J. Gavilan, T. A. Hadlock et al., "Survey of methods of facial palsy documentation in use by members of the Sir Charles Bell Society," *The Laryngoscope*, vol. 124, no. 10, pp. 2247–2251, 2014.
- [8] B. Hontanilla and D. Marre, "Eyelid reanimation with gold weight implant and tendon sling suspension: evaluation of excursion and velocity using the FACIAL CLIMA system," *Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery*, vol. 66, no. 4, pp. 518–524, 2013.
- [9] T. Bao, D. Yu, Q. Luo, H. Wang, J. Liu, and H. Zhu, "Quantitative assessment of symmetry recovery in navigation-assisted surgical reduction of zygomaticomaxillary complex fractures," *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, vol. 47, no. 2, pp. 311–319, 2019.
- [10] S. E. Coulson, G. R. Croxson, and W. L. Gilleard, "Quantification of the three-dimensional displacement of normal facial movement," *The Annals of Otolaryngology, Rhinology, and Laryngology*, vol. 109, no. 5, pp. 478–483, 2000.
- [11] Y. Zhao, G. Feng, H. Wu et al., "Prognostic value of a three-dimensional dynamic quantitative analysis system to measure facial motion in acute facial paralysis patients," *Head & Face Medicine*, vol. 16, no. 1, p. 15, 2020.

- [12] M. Baude, E. Hutin, and J.-M. Gracies, "A bidimensional system of facial movement analysis conception and reliability in adults," *BioMed Research International*, vol. 2015, 8 pages, 2015.
- [13] C. J. Linstrom, "Objective facial motion analysis in patients with facial nerve dysfunction," *The Laryngoscope*, vol. 112, no. 7, pp. 1129–1147, 2002.
- [14] B. Hontanilla and C. Aubá, "Automatic three-dimensional quantitative analysis for evaluation of facial movement," *Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery*, vol. 61, no. 1, pp. 18–30, 2008.
- [15] S. L. Vimercati, C. Rigoldi, G. Albertini, M. Crivellini, and M. Galli, "Quantitative evaluation of facial movement and morphology," *The Annals of Otolaryngology, Rhinology, and Laryngology*, vol. 121, no. 4, pp. 246–252, 2012.
- [16] G. Feng, Y. Zhao, X. Tian, and Z. Gao, "A new 3-dimensional dynamic quantitative analysis system of facial motion: an establishment and reliability test," *PLoS One*, vol. 9, no. 11, article e113115, 2014.
- [17] J. J. Jorge Jr., P. R. Palarissi, G. C. Borges et al., "Avaliação objetiva computadorizada dos parâmetros normais de contração dos músculos faciais," *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, vol. 78, no. 2, pp. 41–51, 2012.
- [18] C.-H. J. Tzou, I. Pona, E. Placheta et al., "Evolution of the 3-dimensional video system for facial motion analysis: ten years' experiences and recent developments," *Annals of Plastic Surgery*, vol. 69, no. 2, pp. 173–185, 2012.
- [19] C. A. Trotman, J. Faraway, and T. A. Hadlock, "Facial mobility and recovery in patients with unilateral facial paralysis," *Orthodontics & Craniofacial Research*, vol. 23, no. 1, pp. 82–91, 2020.
- [20] K. Yuen, I. Inokuchi, M. Maeta, S. I. Kawakami, and Y. Masuda, "Evaluation of facial palsy by moiré topography index," *Otolaryngology—Head and Neck Surgery*, vol. 117, no. 5, pp. 567–572, 1997.
- [21] D. Cassi, G. Battistoni, M. Magnifico, C. Di Blasio, G. Pedrazzi, and A. Di Blasio, "Three-dimensional evaluation of facial asymmetry in patients with hemifacial microsomia using stereophotogrammetry," *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, vol. 47, no. 1, pp. 179–184, 2019.
- [22] Q. Liao, X. Jin, and W. Zeng, "Enhancing the symmetry and proportion of 3D face geometry," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 18, no. 10, pp. 1704–1716, 2012.
- [23] M. Frey, P. Giovanoli, M. Slameczka, and E. Stüssi, "Three-dimensional video analysis of facial movements: a new Method to assess the quantity and quality of the smile," *Plastic and Reconstructive Surgery. Global Open*, vol. 104, no. 7, pp. 2032–2039, 1999.
- [24] F.-R. Sarhan, *Quantification des mouvements de la mimique faciale par motion capture sur une population de volontaires sains*, 2017.
- [25] K. Ben Mansour, F.-R. Sarhan, C. Neiva et al., "Analysis of mimic facial movements based on motion capture," *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, vol. 17, no. suppl, pp. 78–79, 2014.
- [26] S. E. Coulson, G. R. Croxson, and W. L. Gilleard, "Three-dimensional quantification of 'still' points during normal facial movement," *The Annals of Otolaryngology, Rhinology, and Laryngology*, vol. 108, no. 3, pp. 265–268, 1999.
- [27] M. Frey, A. Jenny, P. Giovanoli, and E. Stüssi, "Development of a new documentation system for facial movements as a basis for the international registry for neuromuscular reconstruction in the face," *Plastic and Reconstructive Surgery. Global Open*, vol. 93, no. 6, pp. 1334–1349, 1994.
- [28] V. F. Ferrario, C. Sforza, A. Miani, and G. Tartaglia, "Craniofacial morphometry by photographic evaluations," *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 103, no. 4, pp. 327–337, 1993.
- [29] N. Dagnes, F. Marcolin, E. Vezzetti et al., "Optimal marker set assessment for motion capture of 3D mimic facial movements," *Journal of Biomechanics*, vol. 93, pp. 86–93, 2019.
- [30] A. Bandini, S. Rezaei, D. L. Guarin et al., "A new dataset for facial motion analysis in individuals with neurological disorders," *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, vol. 25, no. 4, pp. 1111–1119, 2021.
- [31] D. Mosmuller, R. Tan, F. Mulder, Y. Bachour, H. de Vet, and P. Don Griot, "The use and reliability of SymNose for quantitative measurement of the nose and lip in unilateral cleft lip and palate patients," *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, vol. 44, no. 10, pp. 1515–1521, 2016.
- [32] M. Harastani, A. Benterkia, F. M. Zadeh, and A. Nait-Ali, "Methamphetamine drug abuse and addiction: effects on face asymmetry," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 116, article 103475, 2020.
- [33] Z. Xue, L. Wu, T. Qiu, Z. Li, X. Wang, and X. Liu, "Three-dimensional dynamic analysis of the facial movement symmetry of skeletal class III patients with facial asymmetry," *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, vol. 78, no. 2, pp. 267–274, 2020.
- [34] J. Djordjevic, P. Pirtiniemi, V. Hanila et al., "Three-dimensional longitudinal assessment of facial symmetry in adolescents," *European Journal of Orthodontics*, vol. 35, no. 2, pp. 143–151, 2013.
- [35] C. A. Trotman, J. Faraway, T. Hadlock, C. Banks, N. Jowett, and H. J. Jung, "Facial soft-tissue mobility: baseline dynamics of patients with unilateral facial paralysis," *Plastic and Reconstructive Surgery. Global Open*, vol. 6, no. 10, article e1955, 2018.
- [36] B. S. Khambay, C. J. Lowney, T.-C. Hsung, and D. O. Morris, "Fluctuating asymmetry of dynamic smiles in normal individuals," *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, vol. 48, no. 10, pp. 1372–1379, 2019.
- [37] H. O. Taylor, C. S. Morrison, O. Linden et al., "Quantitative facial asymmetry: using three-dimensional photogrammetry to measure baseline facial surface symmetry," *The Journal of Craniofacial Surgery*, vol. 25, no. 1, pp. 124–128, 2014.
- [38] L. H. S. Cevidanes, A. Alhadidi, B. Paniagua et al., "Three-dimensional quantification of mandibular asymmetry through cone-beam computerized tomography," *Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, vol. 111, no. 6, pp. 757–770, 2011.
- [39] J. M. VanSwearingen, J. F. Cohn, and A. Bajaj-Luthra, "Specific impairment of smiling increases the severity of depressive symptoms in patients with facial neuromuscular disorders," *Aesthetic Plastic Surgery*, vol. 23, no. 6, pp. 416–423, 1999.
- [40] A. Bajaj-Luthra, J. M. VanSwearingen, R. Thornton, and P. Johnson, "Quantitation of patterns of facial movement in patients with ocular to Oral synkinesis," *Plastic and Reconstructive Surgery. Global Open*, vol. 101, no. 6, pp. 1473–1480, 1998.
- [41] F. L. Bookstein, "Shape and the information in medical images: a decade of the morphometric synthesis," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 66, no. 2, pp. 97–118, 1997.

- [42] C. Sforza, D. Galante, Y. F. Shirai, and V. F. Ferrario, "A three-dimensional study of facial mimicry in healthy young adults," *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, vol. 38, no. 6, pp. 409–415, 2010.
- [43] P. Giovanoli, C.-H. J. Tzou, M. Ploner, and M. Frey, "Three-dimensional video-analysis of facial movements in healthy volunteers," *British Journal of Plastic Surgery*, vol. 56, no. 7, pp. 644–652, 2003.
- [44] K. V. Mardia, F. L. Bookstein, and I. J. Moreton, "Statistical assessment of bilateral symmetry of shapes," *Biometrika*, vol. 87, no. 2, pp. 285–300, 2000.
- [45] C. A. Hood, M. Bock, M. T. Hosey, A. Bowman, and A. F. Ayoub, "Facial asymmetry -3D assessment of infants with cleft lip & palate: 3D assessment of infants with cleft lip & palate," *International Journal of Paediatric Dentistry*, vol. 13, no. 6, pp. 404–410, 2003.
- [46] N. Dagnes, K. Ben-Mansour, F. Marcolin et al., "What is the best set of markers for facial movements recognition?," *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, vol. 61, pp. e455–e456, 2018.
- [47] W. Melzer, A. Herrmann-Frank, and H. C. Lüttgau, "The role of Ca²⁺ ions in excitation-contraction coupling of skeletal muscle fibres," *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Reviews on Biomembranes*, vol. 1241, no. 1, pp. 59–116, 1995.
- [48] C. H. J. Tzou, P. Giovanoli, M. Ploner, and M. Frey, "Are there ethnic differences of facial movements between Europeans and Asians?," *British Journal of Plastic Surgery*, vol. 58, no. 2, pp. 183–195, 2005.
- [49] B. Pan, L. Yu, and Q. Zhang, "Review of single-camera stereo-digital image correlation techniques for full-field 3D shape and deformation measurement," *Science China Technological Sciences*, vol. 61, no. 1, pp. 2–20, 2018.

Baude *et al.*, BMC Neurology, 2023

Baude *et al.* BMC Neurology (2023) 23:148
<https://doi.org/10.1186/s12883-023-03096-8>

BMC Neurology

STUDY PROTOCOL

Open Access



Guided Self-rehabilitation Contract vs conventional therapy in chronic peripheral facial paresis: VISAGE, a multicenter randomized controlled trial

Marjolaine Baude^{1,2*} , Marina Guihard¹, Caroline Gault-Colas², Ludovic Bénichou³, André Coste⁴, Jean-Paul Méningaud⁵, David Schmitz⁶, Pierre-André Natella⁶, Etienne Audureau^{6,7,8} and Jean-Michel Gracies^{1,2}

Abstract

Background One year after persistent peripheral facial paresis (PFP), prescriptions of conventional rehabilitation are often downgraded into maintenance rehabilitation or discontinued, the patient entering what is seen as a chronic stage. This therapeutic choice is not consistent with current knowledge about behavior-induced plasticity, which is available all life long and may allow intense sensorimotor rehabilitation to remain effective. This prospective, randomized, multicenter single-blind study in subjects with chronic unilateral PFP evaluates changes in facial motor function with a Guided Self-rehabilitation Contract (GSC) vs. conventional therapy alone, carried out for six months.

Methods Eighty-two adult subjects with chronic unilateral PFP (> 1 year since facial nerve injury) will be included in four tertiary, maxillofacial surgery (2), otolaryngology (1) and rehabilitation (1) centers to be randomized into two rehabilitation groups. In the experimental group, the PM&R specialist will implement the GSC method, which for PFP involves intensive series of motor strengthening performed daily on three facial key muscle groups, *i.e.* Frontalis, Orbicularis oculi and Zygomatici. The GSC strategy involves: I) prescription of a daily self-rehabilitation program, II) teaching of the techniques involved in the program, III) encouragement and guidance of the patient over time, in particular by requesting a quantified diary of the work achieved to be returned by the patient at each visit. In the control group, participants will benefit from community-based conventional therapy only, according to their physician's prescription. The primary outcome measure is the composite score of Sunnybrook Facial Grading System. Secondary outcome measures include clinical and biomechanical facial motor function quantifications (Créteil Scale and 3D facial motion analysis through the Cara system), quality of life (Facial Clinimetric Evaluation and Short-Form 12), aesthetic considerations (FACE-Q scale) and mood representations (Hospital Anxiety and Depression scale). Participants will be evaluated every three months by a blinded investigator, in addition to four phone calls (D30/D60/D120/D150) to monitor compliance and tolerance to treatment.

Discussion This study will increase the level of knowledge on the effects of intense facial motor strengthening prescribed through a GSC in patients with chronic peripheral facial paresis.

Trial registration ClinicalTrials.gov, [NCT04074018](https://clinicaltrials.gov/ct2/show/study/NCT04074018). Registered 29 August 2019.

*Correspondence:

Marjolaine Baude
marjolaine.baude@aphp.fr

Full list of author information is available at the end of the article



© The Author(s) 2023. **Open Access** This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>. The Creative Commons Public Domain Dedication waiver (<http://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/>) applies to the data made available in this article, unless otherwise stated in a credit line to the data.

Protocol version Version N°4.0—04/02/2021.

Keywords Facial paralysis, Rehabilitation, Neuronal plasticity, Efferent pathways, Guided self-rehabilitation contract, Motion capture, Three-dimensional, Creteil scale, Sunnybrook facial grading system, Patient health questionnaire

Background

Peripheral facial palsy (PFP) is a common disorder, which often affects adults between 40 and 50, with no gender predominance. PFP results from an injury to the facial nerve, from its pontine nucleus to its neuromuscular junctions; its severity depends on lesion location, cause and degree of injury. Seventy percent of cases are idiopathic, called Bell's palsy, with a lifetime incidence of 1 in 60 people [1], representing an incidence of 15 to 50 new cases for 100 000 persons per year [1, 2]. In 70–90% of cases, recovery to baseline occurs within 6–9 months [3–6]. The other 10–30% enter a chronic stage with one of two clinical forms: a non-overactive form with flaccidity of the paretic hemiface, described as a global loss of tone, and an overactive form mixing paresis and facial involuntary muscle overactivity in the affected hemiface [7]. Muscle overactivity may occur at rest through involuntary tonic contractions of some facial muscles, called facial dystonia, or through small brief contractions known as facial spasms. Muscle overactivity may also occur during movements, manifesting as facial cocontractions known as synkinesis. These persistent motor signs strongly impede quality of life, aesthetically and psychologically [8, 9].

Regarding clinical evaluation of PFP, heterogeneity in assessments makes comparisons between various interventions difficult [10]. The classic House-Brackmann Grading Scale is still used in clinical practice but no longer recommended due to inadequate psychometric characteristics, regarding its validity in particular [10, 11]. In 2015, the *Sunnybrook Facial Grading System* (SFGS) was suggested as a new standard in reporting outcomes of facial nerve injuries [10, 12]. Additional criteria for grading were later added to improve its reliability [13]. Nevertheless, evaluations through SFGS have four important limitations: i) the scale remains an ordinal grading system with few grades, lacking accuracy and thus jeopardizing responsiveness; ii) it investigates only five facial muscle groups, among over twenty muscle groups on each hemiface, omitting platysma for example; iii) it does not assess spontaneous and/or conversational facial movements even though this is the main function of the facial nerve, i.e. to reflect our emotions; iv) it is not systematically video-recorded, precluding retrospective checking and visual follow-ups. Recently, a Delphi study on consensus research priorities for facial palsy insisted on standardization of clinical assessments as a high

priority for both patients and healthcare professionals [14].

In terms of rehabilitation, evidence from randomized controlled trials (RCT) is still insufficient, partly because of this lack of precise and objective quantification tools for facial motor function. Most publications on facial rehabilitation pertain to acute and subacute stages of PFP and involve prescriptions for physical therapy and/or speech therapy [15]. The rehabilitation techniques used are varied and heterogeneous, and consensus is lacking. A longstanding, classic principle has been to avoid muscle strengthening exercises and facial muscle electrical stimulation, especially in acute stages, for fear of generating muscle overactivity [15]. Yet, RCTs involving active motion exercises in acute stages have shown improved recovery, particularly in severe cases, with no increase—or even a decrease—in synkinesis [16, 17]. As for electrical neurostimulation of the facial nerve, despite also being controversial in acute stages [18], both classic and recent evidence from controlled literature favors either no effect or a positive effect with respect to synkinesis [19–21].

To our knowledge, there is no RCT analyzing motor strengthening in chronic stages (>1 year since injury), when motor impairments are often considered permanent [20]. In other fields of neurorehabilitation, a considerable body of evidence shows that high intensity of rehabilitation (the opposite of "maintenance therapy") is associated with improvement of motor function in chronic stages, via enhanced brain plasticity [22–25], specifically *behavior-induced plasticity*. The reality and potentially powerful effects of behavior-induced neural plasticity have been first demonstrated in the early twentieth century by Pavlov—under the misleading name of *conditional reflexes*—and its synaptic mechanisms have been elucidated by Kandel [26]. Behavior-induced plasticity involves changes in synaptic sensitivity, in neuronal connections or in cell numbers resulting from changes in environmental conditions, including behavioral changes, such as engagement into an intensive facial rehabilitation program. Such program may have the capacity to place cortical, sub-cortical, brainstem and peripheral nervous system regions under sufficient constraint, so as to strengthen and facilitate the command to facial muscles [25, 27]. Behavior-induced plasticity may take over after the end of the period of lesion-induced plasticity, which typically runs for few months after the lesion [28]. One

way to achieve sufficient amounts of physical treatment might be to adequately *motivate and guide* the patient to practice self-rehabilitation. It has been confirmed that programs of exercises given by the therapist to be performed at home are appreciated by patients not only for the structure they give to everyday life, but also as they represent in themselves a source of motivation and hope, particularly when these programs are associated with ongoing professional support [29, 30].

The government-funded VISAGE project is a French multicentric RCT in which 82 patients with chronic stable unilateral PFP of any cause will be randomized into two six-month rehabilitation programs – motor strengthening through Guided Self-rehabilitation Contract vs. conventional therapy – to compare their effects on facial motor recovery. Once past the stages of lesion-induced nervous system plasticity, we hypothesize that behavior-induced plasticity will be stimulated through intensive motor strengthening rehabilitation work in chronic PFP using a Guided Self-rehabilitation Contract.

Objectives

The primary objective of this study is to evaluate changes in subjective facial motor function after six months of Guided Self-rehabilitation Contract compared to conventional therapy alone, in chronic stages following facial nerve injury. Secondary objectives include the evaluation of differences in changes between the two treatment groups in: i) specific PFP-related quality of life; ii) overall quality of life; iii) aesthetic considerations; iv) mood; v) objective 3D facial motor function.

Methods/design

Ethical approval and trial registration

The VISAGE study has been designed in accordance with the Helsinki Declaration. The study protocol, patient information letter, and informed consent form have been approved by the Institutional Review Board 'Est-III' (Nancy, France) on October 3rd 2018. The VISAGE study is registered in the ClinicalTrials.gov database (NCT04074018).

Research design

VISAGE is a single-blind, prospective, controlled, randomized multicenter study in 82 participants with chronic unilateral peripheral facial palsy (> 1 year since facial nerve injury). The trial will be run in four tertiary centers, including maxillofacial surgery (2), otolaryngology (1) and neurorehabilitation (1) units. For all participants, the study will begin at inclusion (Day-30). At that time point, the investigator will implement computerized randomization to assign a group treatment to the patient, between Guided Self-rehabilitation Contract (GSC) and

conventional therapy (CONV) alone, for six months. A delay of one month between inclusion (D-30) and the first assessment (D1) is anticipated to account for the time to find a therapist and to ensure timely rehabilitation onset (D1) for the participants in the CONV group. In the GSC group, the participants will be free to continue potential preexistent conventional therapy if there was any. The total duration of subject participation in the study is seven months. Study data will be analyzed through intention-to-treat and per-protocol analyses.

Interventions

Conventional therapy

In the Conventional Physical Therapy group (CONV), the study PM&R specialist prescribes physiotherapy and/or speech therapy sessions at inclusion (D-30), for a six-month period starting at D1. For this purpose, a list of physical and speech therapists specialized in PFP rehabilitation and working in the Greater Paris area is provided to each subject. Each therapist of that list has personally agreed to potentially take care of patients of the VISAGE study in due course. Such community-based therapy sessions are universally and indefinitely covered by public health insurance in France. Whichever the study group, subjects already undergoing community-based rehabilitation during the six months of the study. Indeed, the discontinuation of previous rehabilitation might lead to nocebo effects, which is well known in rehabilitation RCT studies [31, 32]. The treatment of the control group is intended to reflect the usual management of patients with chronic peripheral facial palsy. The physiotherapists caring for the patients in the control group are all trained in the rehabilitation of facial palsy and accustomed to treating this disorder. As mentioned above, there is no standardized rehabilitation protocol and the techniques are diverse and heterogeneous among therapists. Each practitioner in the control group therefore chooses the frequency of the rehabilitation sessions, the techniques used and the duration of each rehabilitation session. Such information will be noted however, by the study examiners to quantify and qualify the control group rehabilitation.

Guided self-rehabilitation contract

In the GSC group, patients will be free to follow any conventional community-based therapy sessions, as in the CONV group. In addition, in the evaluation center, the study PM&R physician will provide three one-hour rehabilitation clinic visits at D1, D90 and D180, with the following objectives:

- Explain the principles of the Guided Self-Rehabilitation Contract to the patient. The GSC is a diary-based

program centered on a moral contract in which each party, study participant and PM&R physician or GSC therapist, commits to the other on the following actions. The PM&R physician or GSC therapist commits to:

- *Prescribe and teach* a daily program of facial muscle strengthening exercises customized to the participant (see Figs. 1 and 2), and adjust the techniques according to clinical progress. Here, the study PM&R physician will provide a manual to the subject, which contains the prescribed program, with illustrations of the training exercises. Three facial muscle groups are targeted, selected because of the low risk of apraxia for the command to these muscles in the general population [33] and their localization (one for each third of the face): Frontalis, Orbicularis oculi and Zygomaticus. For each muscle group, the training program consists of three daily series of bilateral unassisted repeated efforts or movements of maximum amplitude until *fatigue* (e.g. 20 to 40 facial contractions per series, depending on fatigability). We have thus chosen to strengthen these three facial muscle groups that are crucial for facial motor function: raising eyebrows (expressiveness), closing eyes (eye protection) and smiling (communication, emotional expression, interaction with others). In practice, these muscles are easy to reach using voluntary command and therefore to rehabilitate. Each of them is located on one of the three vertical thirds of the face: during these efforts, several facial nerve branches covering the entire face are therefore stimulated from the top to the bottom of the face. Each branch of the facial nerve innervating several facial muscles, we postulate—and see in routine practice—that participants will also improve on neighboring muscles not directly targeted by the strengthening.
- *Request a diary* from the patient at each visit, in which the daily number of efforts or movements performed in each series in the interval between two visits with the PM&R physician should be recorded (Fig. 3). The PM&R physician stresses to the subject that such *self-monitoring* through the quantified written diary actually *belongs* to the therapy, in other words that the same physical exercises without maintaining the diary are likely to not carry the same efficacy [34–43]. Indeed, written feedback from patient to therapist/physician improves compliance to the self-rehabilitation program and thus the efficacy of this program [34–39]. Most importantly, the diary provides the patient with positive reinforcement, with poten-

tially enhanced motor circuit excitability and even antidepressant effects [40–42, 44]. Regardless of self-monitoring, quantitative feedback on performance provided to the patient has been shown to improve rehabilitation effectiveness during the subacute phase of stroke [43].

- *Verify* patient compliance to the prescribed program by ensuring that the self-rehabilitation diary is well kept. The study physician will count the number of filled out days in the diary and divide it by the number of elapsed days since the last visit. In return, the subject commits to performing the prescribed daily self-rehabilitation program, including in particular the production of the written diary of exercises and to return it at each visit.

Outcome measures

To evaluate motor function beyond one year after facial nerve injury, the primary outcome measure will be the composite score of the Sunnybrook Facial Grading System. This scale, created by Ross et al. in 1996, assesses resting symmetry compared to the normal side for each third of the face through rating of resting symmetry, of symmetry of voluntary movements on a five-grade scale during five facial movements, and associated synkinesis. A composite score is then calculated, ranging from 0 (total paralysis) to 100 (normal) [12]. The French version of the SFGS was recently validated [45]. As stated above, the choice not to use House-Brackmann evaluation scales [11, 46] is in accordance with the fact that these scales are no longer recommended in research [10, 47, 48].

Secondary outcome measures will include:




1. Specific PFP-related quality of life evaluated through the Facial Clinimetric Evaluation (FaCE), a self-questionnaire validated in French [49]. The FaCE studies specific quality of life for PFP patients through 15 items evaluating six domains [50].
2. Overall perceived quality of life evaluated through the Short Form version 12 (SF 12): this is a self-questionnaire comprising 12 items evaluating quality of life. The scoring system is ordinal. Two scores are calculated, a Physical Composite Score (PCS on 26) and a Mental Composite Score (MCS on 30) [51]; the SF 12 was validated in French in 1998 [52].
3. Aesthetic self-assessment collected using the FACE-Q scale; this is a ten-item self-questionnaire questioning the patient on facial aesthetics [53, 54]. The scoring system is ordinal from 1 (« very unsatisfied») to 4 (« very satisfied»); it has been validated in 2022 [55].

Guided Self-rehabilitation Program

Name, first name:

Date:

For the three facial muscle groups indicated below, perform series of maximal three-second contractions, if possible in front of a mirror, with a very short break of less than a second between two consecutive contractions. Each series of contractions is carried out until a feeling of clear fatigue. **Write down the number of efforts performed during each series in the diary.**

<p>1) Frontalis:</p> <p>Three fatiguing series by day</p> <ul style="list-style-type: none"> - Raise eyebrows as strong/<u>far</u> as possible during three seconds, - Release one second, - Resume. <p><i>Note the number of efforts performed at each series in the <u>diary</u>.</i></p>	
<p>2) Orbicularis oculi:</p> <p>Three fatiguing series by day</p> <p>Close your eyes as strong/<u>far</u> as possible during three seconds,</p> <ul style="list-style-type: none"> - Release one second, - Resume. <p><i>Note the number of efforts performed at each series in the <u>diary</u>.</i></p>	
<p>3) Zygomaticus:</p> <p>Three fatiguing series by day</p> <p>Smile showing your teeth as strong/<u>far</u> as possible during three seconds,</p> <ul style="list-style-type: none"> - Release one second, - Resume. <p><i>Note the number of efforts performed at each series in the <u>diary</u>.</i></p>	

Stamp & signature:

Fig. 1 Prescription of the Guided Self-rehabilitation Contract

4. Anxiety and depressive disorders using the Hospital Anxiety and Depression Scale (HADS): [56]; this self-questionnaire includes 14 items rated from 0 to 3. Seven items are related to anxiety and seven to depressive features, leading to 2 final scores (/21). Scores of 7 or less indicate a lack of symptoms, 8 to 10 suggest questionable symptomatology and 11 and more attest to definite symptomatology. The scale

has been validated in French in various patient populations [57].

5. Evaluation of compliance to and amount of self-rehabilitation in the GSC group, through the filling ratio of the diary over six months.
6. Evaluation of the amount and type of conventional therapy in both groups, through collected data on the mean frequency and techniques used over six months.

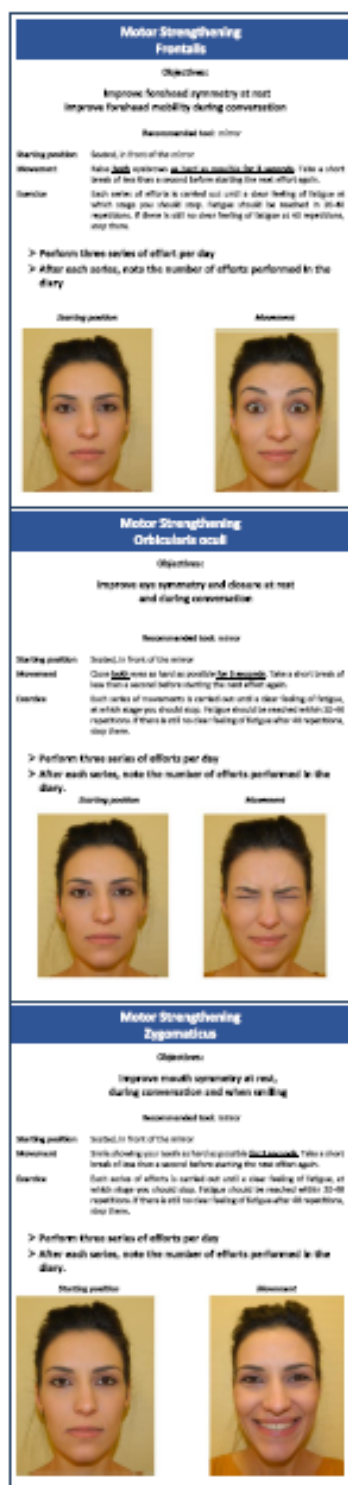


Fig. 2 Self-rehabilitation techniques included in the Guided Self-Rehabilitation Contract

- Subjective facial motor function quantification during the Créteil Scale. The Créteil Scale (CS) has been developed by Gracies and Baude in 2012 [58] to assess 12 groups of facial muscles: frontalis, corrugator, procerus, orbicularis oculi, canine, zygomaticus, risorius, buccinator, orbicularis oris, depressor anguli oris, mentalis, and platysma. For each of these 12 muscle groups, the scale quantifies five fundamental components of facial nerve injury, at rest, during maximal effort and during spontaneous conversation: 1) *Motor strength* of the 12 facial muscle groups rated through a 9-grade scoring system from 0 (no contraction) to 3 (normal contraction); 2) Localization and intensity of involuntary *synkinesis* generated during maximal voluntary effort directed to each of the facial muscle groups; 3) Localization and frequency of involuntary *spasms* during a 30-s resting period and during a 30-s spontaneous conversation period, rated through an ordinal 7-grade scoring system; 4) A *paresis-related symmetry score*, quantifying symmetry at rest and during conversation searching for lacks of contraction of each muscle group; 5) A *dystonia-related symmetry score*, quantifying symmetry at rest and during conversation searching for overactivity in each muscle group. This study will explore the validity, intra- and inter-rater reliability of the Créteil Scale, as well as its responsiveness to rehabilitation in a chronic stage.
- Objective 3D facial motor function quantification through 3D wearable (helmet) facial motion analysis through the Cara™ system. Asymmetry ratios and Procuste analysis will be performed at rest (during a 30-s period), during twelve maximal movement efforts and during spontaneous smile [59]. Measurement of the amount of synkinesis during voluntary movement, of spasms and dystonia at rest will also be performed using Procuste distances: synkinesis (quality, frequency and severity) will be assessed during each maximal voluntary movement (12 movements in total) and during one spontaneous smile; spasms will be assessed during a 30-s period of rest, as well as dystonia.

Setting and recruitment

This multicenter trial involves four French centers: the Neurorehabilitation and the Maxillo-facial & Plastic Surgery departments at *Henri Mondor* University Hospitals, Créteil, the Maxillo-facial Surgery & Stomatology department at *Saint-Joseph* Hospital, Paris and the ENT, Stomatology & Head—Neck Surgery department at *Centre Hospitalier Intercommunal*, Creteil. Each of these centers admits > 20 cases/year of patients with unilateral

Diary – EXP group

DATE	Frontalis <i>Raise eyebrows strongly</i>			Orbicularis oculi <i>Close your eyes strongly</i>			Zygomaticus <i>Smile strongly showing your teeth</i>		
	Number of efforts until fatigue at each series								
	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
D1									
D2									
D3									
D4									
D5									
...									

Fig. 3 Template of diary for the Guided Self-rehabilitation Contract

peripheral facial paresis and should recruit over 20 participants in the study. A three-year period is planned for the study, each center starting the study once the total expected number of participants to be enrolled are lined up. Therefore, the objective is to run the protocol simultaneously for all participants of a given center.

Procedures

This is a single-blind controlled trial, with randomization into two parallel groups, inclusion and randomization being computerized online (Cleanweb Telemedicine Technologies, France) in each investigator center. Clinical assessments, video recordings and 3D analyses of included subjects will be performed in a single investigating center: the Neurorehabilitation department at Henri Mondor University Hospitals, Créteil, France (evaluation center).

Screening visits will take place during regular clinic visits in each center. Participants meeting the selection criteria (see Table 1) will be invited to participate in the protocol. Written descriptive documentation will be provided and potential study subjects will be given at least two weeks to decide about participation. Informed consent will be signed and collected at D-30 of the study.

Randomization will be performed on inclusion day (D-30) by the chief investigator of each center, between the Conventional therapy group (CONV) and the Guided Self-rehabilitation Contract (GSC) group (see Randomization procedure below). Each participant will thus be randomly assigned to one of the two arms and will receive a rehabilitation program depending on the randomized arm, to be carried out over six months. In order to minimize any placebo effect for the conventional treatment group, the study coordinator will not disclose details of the Guided Self-rehabilitation Contract to the physicians

and physiotherapists who treat participants in the CONV group, nor to the CONV participants themselves.

Facial rehabilitation will begin the day after the first evaluation (D1).

In practice, two PM&R neurorehabilitation study physicians, a blinded assessor and an unblinded rehabilitation prescriber and coach, will separately meet each participant at D1, D90 and D180, for an assessment visit and a rehabilitation visit: 1) during the assessment visit, the blinded evaluator will run the clinical scales, self-questionnaires, and the 3D facial analysis (except for D90); 2) during the rehabilitation clinic visit, the unblinded PM&R physician will organize the rehabilitation. After receiving the result of the randomization at D-30, he/she will: 1) inform the participant on the arm that has been randomized; 2) teach the GSC, for those participants randomized in the GSC group; 3) find a community-based therapist through a dedicated listing, for those participants randomized in the CONV group; 4) give a rehabilitation booklet to the participant, according to the arm being randomized; 5) schedule the first visit (D1). Table 2 displays the study schedule.

Randomization procedure

The randomization list will be computer-generated by a statistician from the Clinical Research Unit of *Henri Mondor University Hospitals* (Créteil, France) independent of the study, and uploaded in an online case report form (electronic CRF, eCRF—Cleanweb Telemedicine Technologies, France). The chief investigator of each center will connect to the eCRF via a web browser, fill in the participant characteristics and assign participants to their study group online. A unique allocation study number will be assigned to each study participant in sequential order (R00X format). Randomization will be

Table 1 Inclusion and exclusion criteria

SELECTION CRITERIA	
Inclusion criteria:	
-	Chronic and stable unilateral peripheral facial palsy, i.e., more than one year since the onset of the symptom, whatever its cause
-	Age \geq 18
-	Outpatient
-	Sufficient motivation level to participate in a 6-month facial rehabilitation program, based on the opinion of the investigator
-	Signed consent
-	Medically insured
Exclusion criteria:	
-	Evolving tumor causing the peripheral facial palsy
-	Facial botulinum toxin injection less than six months before enrollment in the study, or planned during the study period
-	Facial surgery less than two years before enrollment into the study or planned during the study period
-	V-VII or XII-VII anastomosis or muscle transfer prior to enrollment into the study or planned during the study
-	Nonsurgical aesthetic treatments – hyaluronic acid / lipofilling / laser / tensor thread – less than two years before enrollment in the study or planned during the study period
-	Recurrent facial palsy
-	Participation in another interventional research protocol on the face (aesthetic, rehabilitative, or surgical)
-	Intercurrent disorder that could hinder the ability to participate in the rehabilitation program
-	Preexisting cognitive, mental or psychological disorder preventing participation in the rehabilitation program or in the follow-up assessments, based on the opinion of the investigator
-	Patient under legal protection

Table 2 Study schedule: enrolment, interventions and assessments

	D-30	D1	D30 \pm 3 days	D60 \pm 3 days	D90 \pm 2 weeks	D120 \pm 3 days	D150 \pm 3 days	D180 \pm 2 weeks
Signature of consent form	x							
Inclusion criteria checking	x							
Randomization	x							
Clinical examination	x	x			x			x
Teaching and then supervision of the guided self-rehabilitation contract (GSC group)		x			x			
Sunnybrook Facial Grading Scale	x	x			x			x
Créteil Scale		x			x			x
FaCE		x			x			x
FACE-Q		x			x			x
HADS		x			x			x
SF-12		x						x
3D facial motion analysis		x						x
Collection of adverse events					x			x
Phone calls			x	x		x	x	
Review of the diary (GSC group)					x			x

perform at D-30, and each participant will be assigned to one of the two treatment groups: CONV group (Conventional Therapy) or GSC group (Guided Self-rehabilitation Contract). A confirmation email will be sent to the unblinded investigator of the coordinating center. As assessment visits will be conducted in only one of

the four inclusion centers, randomization will not be stratified by center. Randomization will be stratified according to the initial voluntary symmetry score of the Sunnybrook Facial Grading Scale (ranging from 5 to 25), performed at D-30. To ensure comparability of patients with respect to their level of motor function (severity)

at inclusion two ranges of score will be selected: [5-15] and [16-25] for stratified randomization. Blinding will be preserved until the database is frozen.

Study population

Eligible patients must be diagnosed with stable, chronic,—i.e. that occurred at least one year before inclusion—unilateral peripheral facial paresis, whatever its cause. To participate in the study, subjects must meet all other inclusion criteria and none of exclusion criteria listed in Table 1. Patients may be enrolled in this study as early as one year after onset for the following reasons: there is no consensus on the transition time to the chronic form of facial paralysis, mentioned from 6 months to two years depending on reports [60, 61]; it is often considered that most of the neurological recovery occurs within the first year after the onset even though there is no scientific evidence to date; in the same way it is considered that the further away from the onset of the facial paresis, the less the amount of conventional rehabilitation; patients are generally offered to start botulinum toxin injections from one year post onset of paresis and once these are started, it is rare for the patient to be willing to stop them, even temporarily. In Beurskens et al., 2006, it was also considered that patients 9–12 months from onset were in the chronic stage [62].

Data management

All information required by the protocol will be entered in the eCRF. Data will be collected as they are obtained. Any missing data will be coded. Every site will have access to the eCRF via a web-based data collection system. Investigators will be given a document offering guidance on using this tool. Each investigator will be responsible for the accuracy, quality and relevance of all the data entered. An audit trail of all changes will be saved. The computer file used for this research is implemented in accordance with French (amended "Informatique et Libertés" law governing data protection) and European (General Data Protection Regulation – GDPR) regulations. The sponsor has obtained the authorization of the CNIL ("Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés", French Data Protection Agency) before implementing any of the data processing required to conduct the research. If a subject stops participating or withdraws consent, the data collected up to the date of cessation will be analyzed. If a subject is lost to follow-up, the investigator should make every effort to reconnect with the patient. Subjects who have prematurely stopped their participation in the research will not be replaced.

Data monitoring

A Clinical Research Associate (CRA) appointed by the sponsor will be responsible for the proper processing of the study, for collecting, documenting, recording and reporting all handwritten data, in accordance with the Standard Operating Procedures applied within the 'DRCI' (Clinical Research and Innovation Department at *Assistance Publique-Hôpitaux de Paris*) and in accordance with Good Clinical Practices as well as with the statutory and regulatory requirements. Computerized quality control will be put in place for missing data detection and consistency of data timing. In case of incorrect filling out of the e-CRF, the investigator will be asked to correct.

Harms

In this study involving human participants (as defined in category 2 of art. L1121-1 of the French Public Health Code), adverse events (serious or not) will not be notified to the sponsor. Notification will be implemented within the framework of the vigilance set up in usual care procedures. No data monitoring committee is needed.

Audit

In accordance with Good Clinical Practice, the sponsor is responsible for obtaining the agreement of all parties involved in the research to ensure direct access to all research sites, source data, source documents and reports for quality control and audit purposes by the sponsor. Investigators will make the documents and individual data available to persons in charge of monitoring and quality control, in the event of an audit, in accordance with the legislative and regulatory provisions in force.

Statistical methods

Sample size

The required number of subjects has been determined to be 82, from preliminary data in literature: to our knowledge the sole RCT about rehabilitation in subacute/chronic stages of PFP (participants enrolled from 9 months into the onset of paresis) using SFGS included 50 participants, among whom only 24 benefited from rehabilitation (waiting list without any rehabilitation in the other group) [62].

In contrast with that trial, participants of the control group of the present study will benefit from an intervention (physiotherapy and/or speech therapy), which will be associated with the potential to improve clinical status. We thus hypothesize that there will be a minor improvement of +10 points in the Sunnybrook composite score in that group. Based on that hypothesis and

to demonstrate an improvement of +20 points (with a standard deviation up to 13) for the experimental group, considering a 5% alpha risk (bilateral test) and a statistical power of 90%, we will include 41 patients per group for 36 analyzed (assuming a 10% loss of follow-up).

Regarding the secondary objectives, it should be noted that this sample size will be comparable to other reliability and validity studies for the FaCE scale ($n=67$ to 122 patients; [47, 48, 59–61] and larger than the initial Sunnybrook validation study ($n=19$; 12). Regarding reliability parameters such as the intraclass correlation coefficients (ICC) and for ICC values expected to be >70%, the suggested sample size will allow estimating ICCs with an accuracy of $\pm 15\%$ for two measures and $\pm 10\%$ for three measures and more [63]. Strategies for achieving adequate participant accrual to reach the target sample size will involve communication on the study with ENT specialists, speech therapists and physiotherapists in the greater Paris area.

Statistical analysis

Descriptive statistical analysis will be carried out to evaluate randomization groups in terms of demographic, and initial clinical and kinematic characteristics, including PFP cause, delay since injury, side of paresis, previous drug treatments, and comorbidities. Quantitative data will be described using means (\pm SD) or medians (with IQR), depending on the normality of distributions, and qualitative data will be reported as numbers or percentages.

Changes in the Sunnybrook Composite score between D1 and D180 will be evaluated by Student's *t* test. No interim analysis has been planned. The primary outcome analysis will be performed using Intention to treat (ITT) analysis. Comparative analysis of quantitative values at J90 and J180 – including primary and secondary outcomes—will be performed with Student's *t* tests for independent samples or with Mann–Whitney non-parametric tests, depending on conditions. Changes in quantitative values from inclusion to each assessment visit (D90-D1, D180-D1) will be compared taking into account the baseline data in case of baseline intergroup differences despite randomization. Within-group changes will be tested through Student's *t*-tests for matched data or Wilcoxon Rank sum tests, depending on the conditions. Multiple linear regression models will be tested to identify independent predictors associated with the changes in quantitative parameters over time, including longitudinal analysis of random effects (mixed models).

Comparative analysis of binary parameters will be run through Chi-square or Fisher's exact tests, depending on conditions. Multivariable analysis will be generated

through logistic regression models. Intra- and inter-rater reliability studies will use frequencies of agreement, intraclass correlation coefficients, Cohen and Fleiss kappa coefficients and coefficients of variation. Spearman or Pearson coefficients will be calculated between scores on the various scales, depending on conditions. Complementary analyses on the primary outcome and all analyses regarding secondary outcomes will be performed in both ITT and per protocol (PP) populations to describe the excluded patients of the PP population and to evaluate the robustness of the results.

All missing or invalid data will be systematically sought for verification in patient charts. In addition to the analysis performed on complete cases without missing data for the primary outcome, sensitivity analysis will be performed using various methods of replacement of missing data, including the LOCF method (Last Observation Carry Forward), the worst-case assumption, and multiple account assignment by chained equations (MICE). Participants who terminate the study prematurely will not be replaced. All analyses will be performed with Stata software v14.1 (StataCorp, College Station, TX, USA).

Safety

Assistance Publique—Hôpitaux de Paris (APHP), sponsor of this research, has contracted an insurance for the duration of the study, in compliance with the law on biomedical research, guaranteeing its own civil liability, as well as that of any investigator or staff involved in conducting the research.

Discussion

To our knowledge, this study will be the first controlled study evaluating a facial motor strengthening program, through the strategy of Guided Self-rehabilitation Contracts, in the challenging treatment of chronic facial paresis. The study also represents uncommon involvement of a neurorehabilitation team, classically involved with central motor disorders, into the field of peripheral facial paresis. There are a number of arguments that support the plausibility that motor strengthening might help patients: (i) recover better emotional facial animation and (ii) reduce facial muscle overactivity.

Why facial motor strengthening in chronic facial paresis?

The goal of a motor strengthening program for facial paresis is to provide for a fitter *peripheral* execution—through restored facial nerve function—of the emotional command to facial muscles. The important study by Beurskens and Heymans, 2006 showed that re-intensification of motor work could achieve improvements in a chronic facial paresis population [62].

In terms of peripheral transmission of the emotional motor command, the phenomenon of activity-dependent plasticity of peripheral *synapses* has long been demonstrated by Klein and Kandel's work [64]. As for *conduction* along peripheral axons, this is also a plastic phenomenon that acutely responds to intense work along the peripheral nerve [65] and studies also support chronic, training-induced, activity-dependent remyelination of peripheral neurons [63, 66]. The latter studies thus support the hypothesis that involving the facial nerve in chronic repeated work might improve conduction along its axons and thus improve the peripheral expression of emotional command.

In terms of muscle overactivity and excitability of the peripheral motoneurone, a number of studies show that increased descending muscle activation through strength training actually *reduces* motoneuronal overactivity, with increased post activation depression after long-term motor training [67]. In passing, the opposite is also true, as hyperexcitability of the peripheral motoneurone is known to be a subacute effect of *reduced* descending activation [68–70]. It is therefore unlikely that strength training programs might increase facial motoneuronal excitability; it is in fact possible to hypothesize that this rehabilitation technique might reduce facial motoneuronal excitability and thus facial muscle overactivity.

Characteristics of the two rehabilitation groups

Several differences may be anticipated between the two rehabilitation treatments. Neither quality nor quantity of rehabilitation have been imposed on the therapists involved in the control group, in order to best reflect real life. It is thus likely that frequency, techniques, duration of rehabilitation sessions will be highly heterogeneous in the control group. We have planned to collect these rehabilitation parameters (D90 and D180) in order to estimate the work carried out in that control group. Technically, in the rehabilitation techniques used in current practice, motor strengthening efforts are rarely recommended and used, particularly at maximal intensity as mentioned above, because of the concern or belief that this might trigger muscle overactivity. As a consequence, the amount of rehabilitative work classically performed typically avoids intensity and may thus be insufficient to exploit behavior-induced nervous system plasticity. From a psychological point of view, patient responsabilization and implication in the rehabilitation program to achieve higher work intensity levels constitute the essence of the Guided Self-rehabilitation Contract strategy. The patient has an active responsibility to accomplish the prescribed daily work and to notify it in the quantitative diary, in stark contrast with the common passive expectation of community therapy sessions in current practice.

Overall, this study should increase the level of knowledge on the effects of facial motor strengthening through Guided Self-rehabilitation Contracts in chronic stages. It will also improve the level of knowledge on facial motion quantification at rest and during voluntary and emotional facial contractions. The validation of a new clinical scale (the Créteil Scale) and of a wearable 3D motion analysis system of facial movements will help to better quantify PFP.

Trial status

VISAGE trial has begun recruitment in March 2021. As of December 2022, 33/82 patients (40,2%) have been included.

Abbreviations

APHP	Assistance Publique—Hôpitaux de Paris
CNIL	Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés
CPT	Conventional Physical Therapy
DRCI	Département de la Recherche Clinique et de l'Innovation
FACE	Facial Clinimetric Evaluation
GSC	Guided Self-rehabilitation Contract
HADS	Hospital Anxiety and Depression Scale
PFP	Peripheral Facial Paresis
SFGS	Sunnybrook Facial Grading System

Supplementary Information

The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.1186/s12883-023-03096-8>.

Additional file 1: Appendix A. Study information and consent form.

Additional file 2: Appendix B. Rehabilitation booklet of the guided-self rehabilitation group.

Additional file 3: Appendix C. Rehabilitation booklet of the conventional therapy group.

Acknowledgements

We acknowledge all patients and therapists who support the study.

Authors' contributions

MB planned the study, wrote the grant application, and the protocol for the Ethics Committee for this project. MB is the principal investigator of this study. MB participated in data collection and drafted the manuscript. MB, EA and JMG contributed to developing the protocol, drafting the manuscript, and checked the final draft of the manuscript. All authors read and approved the final manuscript.

Authors' information

*Visage Group collaborators and centers:

- Dr Marjolaine Baude, Hôpitaux Universitaires Henri Mondor, Service de Rééducation Neurolocomotrice, Créteil; marjolaine.baude@aphp.fr;
- Dr Ludovic Bénichou, Hôpital Saint-Joseph, Service de Chirurgie Maxillo-faciale, Paris; lbenichou@hpsj.fr;
- Pr André Coste, Intercommunal Centre de Créteil, Service d'Oto-Rhino-Laryngologie, Créteil; andre.coste@chicreteil.fr;
- Pr Jean-Paul Méningaud, Hôpitaux Universitaires Henri Mondor, Service de Chirurgie Plastique, Créteil; meningaud@me.com.

Coordinating center roles and responsibilities:

The coordinating center is the following: Service de Rééducation Neurolocomotrice (Neurorehabilitation department), Hôpitaux Universitaires Henri Mondor, Créteil, France. This center is responsible for drafting the protocol for ethical

and regulatory procedures, for training other centers on clinical scales, for all clinical evaluations of patients and for producing and sorting 3D data.

Funding

The study is funded by a grant from the Hospital Clinical Research Program- PHRC 2016 (French Ministry of Health) and sponsored by Assistance Publique—Hôpitaux de Paris (APHP), covering fees to assessing investigators, PM&R specialists for rehabilitation consultations, study coordinators, as well as research assistants and statisticians. Funder and sponsor had no influence on the study design. Funder has no influence on collection, management, analysis, and interpretation of data; writing of the report; and the decision to submit the report for publication.

Contact information for the trial sponsor: dr-secretariat-promotion@aphp.fr.

Availability of data and materials

The dataset supporting this article is available at Henri Mondor University Hospitals, at the Clinical Research Unit, 1 rue Gustave Eiffel, 94000 Créteil, France.

Protocol amendments

Any substantial modification of the protocol by the coordinating investigator must be transmitted to the sponsor for approval. After this approval, the sponsor must obtain a favorable opinion from the IRB prior to its implementation. Relevant parties (investigators, REC/IRBs, trial participants) will be contacted for communicating important protocol modifications by the coordinating investigator and/or the Clinical Research Unit by postal or electronic mail depending on the situation.

Confidentiality of data

Personal information about potential and enrolled participants will be collected, shared, and maintained in order to protect confidentiality before, during, and after the trial using a secured online database (eCRF) and an internal hospital server containing the password-protected database.

Dissemination policy

The sponsor AP-HP is the owner of the data. The data cannot be used or disclosed to a third party without its prior permission. Investigators and sponsor will communicate on trial results to participants, professionals and public through publications and oral and/or writing communications. The Coordinator investigator of each center including at least one patient will be eligible to authorship. Manuscripts related to the study results will be reviewed by a professional writer. The VISAGE project is registered on the APHP clinical research registry, free online access: <https://www.aphp.fr/registre-des-essais-cliniques>.

Declarations

Ethics approval and consent to participate

This study is conducted in accordance with the 'Helsinki Declaration'. Study protocol, patient information letter, and informed consent form were approved by an International Review Board Est-III (Nancy, Besançon, Dijon, Strasbourg, France) on October 3rd 2018. This study was registered before enrolling the first participant at the Clinical Trials Register (www.clinicaltrials.gov) with the identifier NCT04074018.

Consent for publication

We will use our institutional consent form to confirm that we have obtained consent of the participant (or legal guardian) to report and publish individual patient data. We confirm that the images depicted in Figs. 1 and 2 are from our own and that the subject gave its consent for publication of these identifying images.

Competing interests

The authors declare that they have no competing interests.

Author details

¹BIOTN Research Unit 7377, Université Paris-Est Créteil (UPEC), 94000 Créteil, France. ²Service de Rééducation Neurolocomotrice, AP-HP, Hôpitaux Universitaires Henri Mondor, 1 Rue Gustave Eiffel, 94000 Créteil, France. ³Hôpital Paris Saint-Joseph, Service de Chirurgie Maxillo-Faciale Stomatologie, 75015 Paris, France. ⁴Centre Hospitalier Intercommunal Créteil, Service d'ORL, Stomatologie Et Chirurgie Cervico-Faciale, 94000 Créteil, France. ⁵AP-HP, Service de Chirurgie Plastique, Reconstructrice, Esthétique Et Maxillo-Faciale, Hôpitaux Universitaires Henri Mondor, 94000 Créteil, France. ⁶AP-HP, Unité de Recherche Clinique, Hôpitaux Universitaires Henri Mondor, 94000 Créteil, France. ⁷AP-HP,

Service de Santé Publique, Hôpitaux Universitaires Henri Mondor, 94000 Créteil, France. ⁸DHU A-TVH, IRMB- EA 7376 CEpiA (Clinical Epidemiology And Ageing Unit), Université Paris Est-Créteil, 94000 Créteil, France.

Received: 29 August 2022 Accepted: 27 January 2023

Published online: 10 April 2023

References

- de Almeida JR, Guyatt GH, Sud S, Dorion J, Hill MD, Kolber MR, et al. Management of Bell palsy: clinical practice guideline. *CMAJ*. 2014;186(12):917–22.
- Devriese PP, Schumacher T, Scheide A, de Jongh RH, Houtkooper JM. Incidence, prognosis and recovery of Bell's palsy. A survey of about 1000 patients (1974–1983). *Clin Otolaryngol Allied Sci*. 1990;15(1):15–27.
- Sullivan FM, Swan IRC, Donnan PT, Morrison JM, Smith BH, McKinstry B, et al. Early treatment with prednisolone or acyclovir in Bell's palsy. *N Engl J Med*. 2007;357(16):1598–607.
- Peitersen E. Bell's Palsy: the spontaneous course of 2,500 peripheral facial nerve palsies of different etiologies. *Acta Otolaryngol (Stockh)*. 2002;5494–30.
- Adour KK, Byl FM, Hilsinger RL, Kahn ZM, Sheldon ML. The true nature of Bell's palsy: analysis of 1,000 consecutive patients. *Laryngoscope*. 1978;88(5):787–801.
- Hohman MH, Hadlock TA. Etiology, diagnosis, and management of facial palsy: 2000 patients at a facial nerve center. *Laryngoscope*. 2014;124(7):E283–293.
- Salles AG, da Costa EF, Ferreira MC, do Nascimento Remigio AF, Moraes LB, Gemperli R. Epidemiologic overview of synkinesis in 353 patients with longstanding facial paralysis under treatment with botulinum toxin for 11 years. *Plast Reconstr Surg*. 2015;136(6):1289–98.
- Díaz-Aristizabal U, Valdés-Vilches M, Fernández-Ferreras TR, Calero-Muñoz E, Bienzobas-Allue E, Aguilera-Ballester L, et al. Effect of botulinum toxin type A in functionality, synkinesis and quality of life in peripheral facial palsy sequelae. *Neurol Barc Spain*. 2021;50213–4853(21):00032–3.
- Rath B, Linder T, Comblath D, Hudson M, Fernandopulle R, Hartmann K, et al. All that palsies is not Bell's—the need to define Bell's palsy as an adverse event following immunization. *Vaccine*. 2007;26(1):1–14.
- Fattah AY, Gurusinghe 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(2):569–79.
- House JW, Brackmann DE. Facial nerve grading system. *Otolaryngol Head Neck Surg*. 1985;93(2):146–7.
- Ross BG, Fradet G, Nedzelski JM. Development of a sensitive clinical facial grading system. *Otolaryngol Head Neck Surg*. 1996;114(3):380–6.
- Neely JG, Cherian NG, Dickerson CB, Nedzelski JM. Sunnybrook facial grading system: reliability and criteria for grading. *Laryngoscope*. 2010;120(5):1038–45.
- Hamlet C, Rumsey N, Williamson H, Johnson K, Ndaka C. Consensus research priorities for facial palsy: A Delphi survey of patients, carers, clinicians and researchers. *J Plast Reconstr Aesthetic Surg*. 2018;71(12):1777–84.
- Gatignol P, Lannadère E, Bernat L, Tankré F, Lamas G. Advantage of facial rehabilitation after facial palsy. *Rev Médicale Suisse*. 2011;7(311):1908–10 1912–3.
- Wen C, Zhang B. Effect of rehabilitation training a different degree in the treatment of idiopathic facial palsy: a randomized controlled comparison. *Zhongguo Linchuang Kangfu*. 2004;8(13):2446–7.
- Nicastro M, Mancini P, De Seta D, Bertoli G, Prosperini L, Toni D, et al. Efficacy of early physical therapy in severe Bell's palsy: a randomized controlled trial. *Neurorehabil Neural Repair*. 2013;27(6):542–51.
- Fargher KA, Coulson SE. Effectiveness of electrical stimulation for rehabilitation of facial nerve paralysis. *Phys Ther Rev*. 2017;22(3–4):169–76.
- Mosforth J, Taverner D. Physiotherapy for Bell's palsy. *Br Med J*. 1958;2(5097):675–7.
- Teixeira LJ, Valbuza JS, Prado GF. Physical therapy for Bell's palsy (idiopathic facial paralysis). *Cochrane Database Syst Rev*. 2011;12:CD00628.
- Tuncay F, Borman P, Tazer B, Ünlü I, Samim E. Role of electrical stimulation added to conventional therapy in patients with idiopathic facial (Bell) palsy. *Am J Phys Med Rehabil*. 2015;94(3):222–8.

22. Kwakkel G, Wagenaar RC, Twisk JW, Lankester GJ, Koetsier JC. Intensity of leg and arm training after primary middle-cerebral-artery stroke: a randomised trial. *Lancet Lond Engl*. 1999;354(9174):191–6.
23. Daly JJ, Ruff RL. Construction of efficacious gait and upper limb functional interventions based on brain plasticity evidence and model-based measures for stroke patients. *Sci World J*. 2007;7:2031–45.
24. Harada T, Miyai I, Suzuki M, Kubota K. Gait capacity affects cortical activation patterns related to speed control in the elderly. *Exp Brain Res*. 2009;193(3):445–54.
25. Meïmoun M, Bayle N, Baude M, Gracies JM. Intensity in the neurorehabilitation of spastic paresis. *Rev Neurol (Paris)*. 2015;171(2):130–40.
26. Kandel ER, Tauc L. Mechanism of prolonged heterosynaptic facilitation. *Nature*. 1964;202:145–7.
27. Binder MD, Hirokawa N, Windhorst U, éditeurs. *Behavioral Plasticity*. In: *Encyclopedia of Neuroscience*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2009 [cité 28 Nov 2022]. 372–372. https://doi.org/10.1007/978-3-540-29678-2_594
28. Desmurget M, Bonnetblanc F, Duffau H. Contrasting acute and slow-growing lesions: a new door to brain plasticity. *Brain J Neurol*. 2007;130(Pt 4):898–914.
29. Wiles R, Ashburn A, Payne S, Murphy C. Discharge from physiotherapy following stroke: the management of disappointment. *Soc Sci Med* 1982. 2004;59(6):1263–73.
30. Pradines M, Ghedira M, Portero R, Masson I, Marciniak C, Hicklin D, et al. Ultrasound structural changes in triceps surae after a 1-year daily self-stretch program: a prospective randomized controlled trial in chronic hemiparesis. *Neurorehabil Neural Repair*. 2019;33(4):245–59.
31. Testa M, Rossetini G. Enhance placebo, avoid nocebo: How contextual factors affect physiotherapy outcomes. *Man Ther*. 2016;24:65–74.
32. Koog YH, Lee JS, Wi H. Clinically meaningful nocebo effect occurs in acupuncture treatment: a systematic review. *J Clin Epidemiol*. 2014;67(8):858–69.
33. Baude M, Lagnau P, Gault-Colas C, Gracies JM. Degree of praxis of command for facial muscles in healthy individuals to develop a new clinical scale for facial motor function in peripheral facial paresis. *APRM*. 2018;61:e26.
34. Noland MP. The effects of self-monitoring and reinforcement on exercise adherence. *Res Q Exerc Sport*. 1989;60(3):216–24.
35. Knight C, Rutterford NA, Alderman N, Swan LJ. Is accurate self-monitoring necessary for people with acquired neurological problems to benefit from the use of differential reinforcement methods? *Brain Inj*. 2002;16(1):75–87.
36. Nippita S, Oviedo JD, Velasco MG, Westhoff CL, Davis AR, Castaño PM. A randomized controlled trial of daily text messages versus monthly paper diaries to collect bleeding data after intrauterine device insertion. *Contraception*. 2015;92(6):578–84.
37. Abrams P, Paty J, Martina R, Newgreen DT, van Maanen R, Paireddy A, et al. Electronic bladder diaries of differing duration versus a paper diary for data collection in overactive bladder. *NeuroUrol Urodyn*. 2016;35(6):743–9.
38. Saw AE, Main LC, Gastin PB. Monitoring athletes through self-report: factors influencing implementation. *J Sports Sci Med*. 2015;14(1):137–46.
39. VanWormer JJ, Martinez AM, Martinson BC, Crain AL, Benson GA, Cosentino DL, et al. Self-weighing promotes weight loss for obese adults. *Am J Prev Med*. 2009;36(1):70–3.
40. Ackerman AM, Shapiro ES. Self-monitoring and work productivity with mentally retarded adults. *J Appl Behav Anal*. 1984;17(3):403–7.
41. Hanel F, Martin G. Self-monitoring, self-administration of token reinforcement, and goal-setting to improve work rates with retarded clients. *Int J Rehabil Res*. 1980;3(4):505–17.
42. Lenderking WR, Hu M, Tennen H, Cappelleri JC, Petrie CD, Rush AJ. Daily process methodology for measuring earlier antidepressant response. *Contemp Clin Trials*. 2008;29(6):867–77.
43. Dobkin BH, Plummer-D'Amato P, Elashoff R, Lee J, SIRROWS Group. International randomized clinical trial, stroke inpatient rehabilitation with reinforcement of walking speed (SIRROWS), improves outcomes. *Neurorehabil Neural Repair*. 2010;24(3):235–42.
44. Sidarta A, Vahdat S, Bernardi NF, Ostry DJ. Somatic and reinforcement-based plasticity in the initial stages of human motor learning. *J Neurosci Off J Soc Neurosci*. 2016;36(46):11682–92.
45. Waubant A, Franco-Vidal V, Ribadeau DA. Validation of a French version of the Sunnybrook facial grading system. *Eur Ann Otorhinolaryngol Head Neck Dis*. 2022;139(3):119–24.
46. Vrabec JT, Backous DD, Djallilian HR, Gidley PW, Leonetti JP, Marzo SJ, et al. Facial nerve grading system 20. *Otolaryngol Head Neck Surg*. 2009;140(4):445–50.
47. Kanerva M, Poussa T, Pitkäranta A. Sunnybrook and House-Brackmann facial grading systems: intrarater repeatability and interrater agreement. *Otolaryngol Head Neck Surg*. 2006;135(6):865–71.
48. Paolucci T, Cardarola A, Colonnelli P, Ferracuti G, Gonnella R, Murgia M, et al. Give me a kiss! An integrative rehabilitative training program with motor imagery and mirror therapy for recovery of facial palsy. *Eur J Phys Rehabil Med*. 2020;56(1):58–67.
49. Barry P, Mancini J, Alshukry A, Salburgo F, Lavielle JP, Montava M. Validation of French versions of the Facial Disability Index and the Facial Clinimetric Evaluation Scale, specific quality of life scales for peripheral facial palsy patients. *Clin Otolaryngol*. 2019;44(3):313–22.
50. Kahn JB, Gliklich RE, Boyev KP, Stewart MG, Metson RB, McKenna MJ. Validation of a patient-rated instrument for facial nerve paralysis: the FaCE scale. *Laryngoscope*. 2001;111(3):387–98.
51. Ware J, Kosinski M, Keller SD. A 12-Item Short-Form Health Survey: construction of scales and preliminary tests of reliability and validity. *Med Care*. 1996;34(3):220–33.
52. Gandek B, Ware JE, Aaronson NK, Apolone G, Bjorner JB, Brazier JE, et al. Cross-validation of item selection and scoring for the SF-12 Health Survey in nine countries: results from the IQOLA Project. *International Quality of Life Assessment*. *J Clin Epidemiol*. 1998;51(11):1171–8.
53. Klassen AF, Cano SJ, Scott A, Snell L, Pusic AL. Measuring patient-reported outcomes in facial aesthetic patients: development of the FACE-Q. *Facial Plast Surg FPS*. 2010;26(4):303–9.
54. Pusic AL, Klassen AF, Scott AM, Cano SJ. Development and psychometric evaluation of the FACE-Q satisfaction with appearance scale: a new patient-reported outcome instrument for facial aesthetics patients. *Clin Plast Surg*. 2013;40(2):249–60.
55. Gama JT, Rossetto LA, Brito NB, Veiga DF, Ferreira LM. Cross-cultural validation of the FACE-Q Satisfaction with Facial Appearance Overall Scale (FACE-Q SFAOS) in Brazilian rhytidoplasty patients. *Clin Sao Paulo Braz*. 2020;75:e1568.
56. Bjelland I, Dahl AA, Haug TT, Neckelmann D. The validity of the Hospital Anxiety and Depression Scale. An updated literature review. *J Psychosom Res*. 2002;52(2):69–77.
57. Lepine JP, Godchau M, Brun P, Lemprière T. Evaluation of anxiety and depression among patients hospitalized on an internal medicine service. *Ann Med Psychol (Paris)*. 1985;143(2):175–89.
58. Baude M, Hutin E, Behnegar A, Gracies JM. Self-rehabilitation program of fatiguing series of maximal contraction exercises in chronic peripheral facial paresis. *APRM*. 2012;55:e295.
59. Guihard M, Gracies JM, Baude M. Three-dimensional quantification of facial morphology and movements using a wearable helmet. *Messina G, éditeur. BioMed Res Int*. 2022;2022:2774713.
60. de Sanctis PC, Shitara D. Botulinum toxin type a to improve facial symmetry in facial palsy: a practical guideline and clinical experience. *Toxins*. 2021;13(2):159.
61. Cooper L, Lui M, Nduka C. Botulinum toxin treatment for facial palsy: a systematic review. *J Plast Reconstr Aesthetic Surg*. 2017;70(6):833–41.
62. Beurskens CHG, Heymans PG. Mime therapy improves facial symmetry in people with long-term facial nerve paresis: a randomised controlled trial. *Aust J Physiother*. 2006;52(3):177–83.
63. Zou GY. Sample size formulas for estimating intraclass correlation coefficients with precision and assurance. *Stat Med*. 2012;31(29):3972–81.
64. Klein M, Kandel ER. Presynaptic modulation of voltage-dependent Ca²⁺ current: mechanism for behavioral sensitization in *Aplysia californica*. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 1978;75(7):3512–6.
65. Vagg R, Mogyoros I, Kiernan MC, Burke D. Activity-dependent hyperpolarization of human motor axons produced by natural activity. *J Physiol*. 1998;507(Pt 3):919–25.
66. Volk GF, Steigerwald F, Vitek P, Finkensieper M, Kreysa H, Guntinas-Lichius O. Facial disability index and facial clinimetric evaluation scale: validation of the German versions. *Laryngorhinootologie*. 2015;94(3):163–8.

67. Obata H, Kim G, Ogawa T, Sekiguchi H, Nakazawa K. Effect of long-term classical ballet dance training on postactivation depression of the soleus hoffmann-reflex. *Mot Control*. 2022;26(2):169–80.
68. Lundbye-Jensen J, Nielsen JB. Central nervous adaptations following 1 wk of wrist and hand immobilization. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. 2008;105(1):139–51.
69. Lundbye-Jensen J, Nielsen JB. Immobilization induces changes in presynaptic control of group Ia afferents in healthy humans. *J Physiol*. 2008;586(17):4121–35.
70. Seynnes OR, Maffiuletti NA, Maganaris CN, de Boer MD, Pensini M, di Prampero PE, et al. Soleus T reflex modulation in response to spinal and tendinous adaptations to unilateral lower limb suspension in humans. *Acta Physiol Oxf Engl*. 2008;194(3):239–51.

Publisher's Note

Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Ready to submit your research? Choose BMC and benefit from:

- fast, convenient online submission
- thorough peer review by experienced researchers in your field
- rapid publication on acceptance
- support for research data, including large and complex data types
- gold Open Access which fosters wider collaboration and increased citations
- maximum visibility for your research: over 100M website views per year

At BMC, research is always in progress.

Learn more biomedcentral.com/submissions



Baude *et al.*, in preparation, 2024

Baude M, Guihard M, Gault-Colas C, Pradines M, Natella PA, Audureau E, Gracies JM. Validity of the Créteil Scale to rate chronic peripheral facial paresis - Comparison with the Sunnybrook Facial Grading Scale. 2024. in preparation.

Abstract

Background: In chronic peripheral facial paresis (PFP), various forms of muscle overactivity may superimpose on the initial paresis, potentially impeding quality of life.

Objectives: To explore correlations between two clinical scales of chronic PFP and quality of life, anxiety-depression and facial aesthetic self-appreciation.

Methods: In this prospective multicenter study, subjects with unilateral PFP > 12 months were evaluated using two clinical scales, the *Sunnybrook Facial Grading System* (SFGS) and the *Créteil Scale* (CS), the latter distinguishing quantifications of contractures, spasms and synkinesis at rest and during conversation, as well as of voluntary (motor strength) vs emotional (asymmetry due to paresis) facial motor control. Four self-administered questionnaires about quality of life (*Facial Clinimetric Evaluation*, FaCE; *Short-Form 12*, SF-12), anxiety and depression (*Hamilton Anxiety & Depression Scale*, HADS) and facial aesthetic self-rating (FACE-Q) were also evaluated. Correlations were explored.

Results: In 46 participants (women, 74%; age, 49.9±14.9; idiopathic PFP, 67%, delay post-injury 4.4±6.1 years, composite SFGS 40.7±12.9), CS motor strength score correlated with composite and moving symmetry scores of SFGS ($r=0.77$; $p<10^{-7}$ and $r=0.79$; $p<10^{-8}$) as well as with FaCE total ($r=0.38$; $p=0.049$) and SF12 physical scores ($r=-0.38$; $p=0.049$). The overall CS score of asymmetry due to paresis correlated with CS motor strength score ($r=0.63$, $p<10^{-4}$) and composite and moving symmetry scores of SFGS ($r=0.71$, $p<0.001$ and $r=0.78$, $p<10^{-8}$) as well as with FaCE total score ($r=0.48$; $p=0.006$). The number of synkinetic muscles on CS correlated with CS motor strength score ($r=-0.38$, $p<0.049$), CS intensity of synkinesis

($r=0.53$, $p=0.002$), the overall CS score of asymmetry due to contracture ($r=-0.42$, $p=0.024$) and the SFGS synkinesis score ($r=0.72$; $p<10^{-6}$). No SFGS score correlated with SF12.

Conclusions: CS and SFGS subscores strongly correlated in both paresis and overactivity domains. Unlike SFGS, the CS motor strength score correlated with overall quality of life.

Keywords: Facial asymmetry, facial palsy, facial paralysis, facial synkinesis, facial spasm, quality of life.

Highlights:

- In chronic peripheral facial paresis, various forms of muscle overactivity superimpose on the initial paresis.
- CS and SFGS subscores strongly correlated in both paresis and overactivity domains.
- The *Créteil Scale* separately quantifies the voluntary and the automatic/emotional commands to facial motoneurons.
- The *Créteil Scale* allows showing correlation between lack of descending access to the facial motoneuron and its overactivity.
- Unlike with SFGS scores, the CS motor strength score correlated with overall quality of life.

Declarations of interest: None.

Ethical approval and informed consent statements: This study is conducted in accordance with the 'Helsinki Declaration'. Study protocol, patient information letter, and informed consent form were approved by an International Review Board Est-III (Nancy, Besançon, Dijon, Strasbourg, France) on October 3rd 2018. This study was registered before enrolling the first participant at the Clinical Trials Registry (www.clinicaltrial.gov) with the identifier NCT04074018 (date of registration, August 29 2019).

1 Introduction

2 Peripheral facial palsy (PFP), linked to damage to the motor contingent of the facial nerve, can result
3 from a variety of causes ('idiopathic', viral, tumoral, interventional, otological, traumatic,
4 immunological or systemic)(1). In acute stages, facial asymmetry impacts on quality of life, anxiety
5 and depression levels, and on social interactions (2–6).

6 Among patients with 'idiopathic' PFP (Bell's palsy), 85% recover facial motor function at six months
7 (1,7–9). For the remaining 15%, recovery may be longer and less complete, while entering subacute
8 (4-12 months) and chronic stages (>12-24 months from the onset of symptoms)(10). For the majority
9 of patients, chronic stages are characterized by gradual emergence of various forms of facial muscle
10 overactivity, including hemifacial contracture, spasms and synkinesis, which may reflect facial
11 motoneuron hyperexcitability or abnormal nerve healing (10,11).

12 Here we define *four distinct neuromuscular components* of chronic PFP:

13 - *Paresis* occurs as an immediate consequence of facial nerve injury. It can be observed at rest or
14 during conversation as a lack of automatic/emotional muscle activation (facial muscle tone), as well
15 as during deliberate, voluntary motor command. Since the final pathway is common to both, one may
16 hypothesize a strong relationship between emotional and voluntary access to the facial motoneuron,
17 but this has not been demonstrated to date, likely for lack of sufficiently precise clinical or technical
18 methods.

19 After this onset of facial muscle hypoactivation, three additional components involving facial muscle
20 overactivity on the affected side emerge several weeks after injury, which may be detected at rest or
21 during automatic/emotional (conversation) or voluntary command:

22 - *Hemifacial contracture* is a permanent tonic contraction of one or more facial muscles, which may
23 deceive the clinician by partially reversing the initial facial hypotonia (e.g. going from a wide-open
24 eye in the acute stage to a shrunk palpebral fissure in chronic stages).

25 - *Hemifacial synkinesis* is an involuntary cocontraction of one or more facial muscles, when
26 emotional or voluntary command is intended for another muscle group. This is a particularly

27 bothersome form of overactivity for which we may suspect high connection to PFP-related quality
28 of life (11).

29 - *Hemifacial spasms* are brief (<100 ms) involuntary contractions of one or more facial muscles, at
30 rest or during conversation.

31 Numerous studies have attempted to find correlation between clinical severity of PFP and quality of
32 life, with often discordant results, suggesting that quality of life was only partially explained by facial
33 motor function (11–16). However, currently available clinical tools fall short of separately quantifying
34 paresis through each of the voluntary vs emotional commands, and the three overactivity components
35 at rest and during conversation. We have designed a scale with such objectives, named the *Créteil*
36 *Scale*.

37 The main objective of this study was to evaluate the concurrent validity of the Créteil Scale in chronic
38 facial paresis as against the Sunnybrook Facial Grading System (current gold standard), together with
39 its correlations with overall and PFP-specific quality of life, anxiety-depression scores as well as with
40 aesthetic self-appreciation scores. We may hypothesize that among the four above-defined clinical
41 phenomena present in chronic stages, facial paresis and synkinesis may have the highest impacts on
42 quality of life (10-16).

43 **Material and methods**

44 **Study design**

45 The present study is a part of *VISAGE*, a multidisciplinary trial involving four tertiary French centers
46 (Physical Medicine and Rehabilitation, n=1, Maxillo-facial & Plastic Surgery, n=2; Stomatology &
47 Head - Neck Surgery, n=1) designed as a single-blind, prospective, controlled, randomized study to
48 compare guided self-rehabilitation contracts with community-based specialized therapy in chronic
49 facial paresis (> 1 year since facial nerve injury). The trial protocol has been previously published (17).
50 Participants in this study were the first 46 subjects included in the trial who underwent their first
51 assessment visit (D1) from March 2021 to March 2024 (Figure 1). Clinical tests were carried out by
52 an assessor (MB) blinded to the randomization group.

53 **Selection criteria**

54 Eligible clinic patients must meet all inclusion criteria as follows: a) diagnosed with stable, chronic
55 peripheral facial paresis - *i.e.* more than one year since symptom onset, regardless of the cause; b) age
56 18 or over; c) motivation assessed as adequate to participate in a six-month facial rehabilitation
57 program, based on the opinion on the investigator; d) signed consent; e) medically insured. Exclusion
58 criteria comprised: a) evolving tumor as a cause of the peripheral facial paresis; b) recurrent facial
59 paresis; c) facial botulinum toxin injections less than six months before enrollment into the study, or
60 planned during the study period; d) facial surgery less than two years before enrollment into the study
61 or planned during the study period; e) V-VII or XII-VII anastomosis or muscle transfer prior to
62 enrollment into the study or planned during the study; f) nonsurgical aesthetic treatments –hyaluronic
63 acid/ lipofilling/ laser/ tensor thread – less than two years before enrollment in the study or planned
64 during the study period; g) participation in another interventional research protocol on the face,
65 whether aesthetic, rehabilitative or surgical; h) intercurrent disorder that could undermine the ability
66 to participate in the rehabilitation program; i) preexisting cognitive or psychological disorder
67 preventing participation in the rehabilitation program or in the follow-up assessments, based on the
68 opinion on the investigator; j) patient under legal protection.

69 **Outcome measures**

70 Baseline assessments were collected along two visits. The following data were collected: sex, date of
71 birth, weight, height, hand dominance, side and cause of the PFP, presence and forms of facial muscle
72 overactivity. The remainder of the data was divided into two parts:

73 - **Questionnaires:** Patients were to complete four self-administered questionnaires regarding the
74 symptoms present during the last week preceding the assessment visit, in the presence of the
75 investigator who could address any question. The following questionnaires were fulfilled in this
76 order: 1) Facial Clinimetric Evaluation; 2) FACE-Q; 3) Short-Form 12 and 4) Hamilton Anxiety and
77 Depression Scale (17).

78 - **Facial motor assessment scales:** Two motor assessment scales were used:

79 - 1) the Sunnybrook Facial Grading System (18), which includes an assessment of facial symmetry at
80 rest and during five voluntary facial movements. The SFGS scoring system was that used in the
81 article published by Neely et al in 2010 which proposed additional grading criteria for clinical
82 research studies (19);

83 - 2) the Créteil Scale (CS) (see Appendix). The Créteil Scale first involves an observation of the face
84 for 30 seconds of rest and then for 30 seconds during conversation, to assess the following in each
85 of the two conditions, in 12 predefined facial muscles:

86 - asymmetry due to contracture

87 - asymmetry due to automatic/emotional paresis

88 - frequency of spasm.

89 In the second part of the scale, maximal voluntary effort is requested from the participant on each of
90 the 12 predefined muscles to assess paresis via voluntary effort and the presence and severity of
91 synkinesis concomitant to each of these 12 maximal efforts in each of the 11 other muscles.

92 The scores derived from the Créteil Scale are as follows:

93 a. **Voluntary motor strength score** (paresis during voluntary command) of 12 facial muscles rated
94 through a 9-grade scoring system from 0 (no contraction) to 3 (normal);

95 b. **Number of synkinetic muscles** generated during each maximal voluntary effort;

96 c. **Synkinesis intensity score** in each muscle during each maximal voluntary effort, ranging from 0
97 to 3;

98 d. **Frequency of involuntary spasms** during the 30-second rest and the 30-second conversation
99 period, coded from 0 to 3;

100 e. **Paresis-related symmetry score at rest and during conversation** (paresis during
101 automatic/emotional command), quantifying symmetry related to visible lack of muscle
102 contraction, ranging from 0 to 3; an *overall* paresis-related symmetry score was derived by
103 averaging the rest and the conversational scores.

104 f. **Contracture-related symmetry score at rest and during conversation**, quantifying symmetry
105 related to muscle overactivity, ranging from 0 to 3. An *overall contracture-related symmetry*

106 *score* is derived by averaging the rest and the conversational scores. Except for the motor strength
107 score (9-grade scale), all other scores from 0 to 3 are rated along a 7-grade scale from 0 to 3 in
108 steps of 0.5.

109 Video recording of the Créteil Scale tests is systematically performed, using a camera placed on a
110 tripod on the examination table between investigator and patient. Although such video recording is not
111 required for SFGS, both scales were video-recorded in this study for future verifications.

112 **Ethical approval and consent to participate**

113 This study is conducted in accordance with the 'Helsinki Declaration'. Study protocol, patient
114 information letter, and informed consent form were approved by an International Review Board on
115 October 1st 2019. This study was registered before enrolling the first participant at the Clinical Trials
116 Register (www.clinicaltrials.gov) with the identifier NCT04074018.

117 **Theory/ calculation**

118 **Statistical analysis**

119 Descriptive statistical analysis was carried out to evaluate subjects in terms of demographic and clinical
120 characteristics, including PFP cause, delay since injury, [side](#) of paresis, previous drug treatments, and
121 comorbidities. Quantitative data were described using mean (SD) or median (Q1; Q3), depending on
122 the normality of distributions, and qualitative data were reported as numbers or percentages.

123 The Pearson or Spearman correlation coefficients were used to evaluate the strength of any relationship
124 between the various variables, depending on conditions of application. A network representation of
125 the correlations was used to illustrate the relationships between the variables. Scatter plots were used
126 between pairs of quantitative variables to visualize the strength of associations but also to detect bias.
127 The nullity test of correlation coefficients was also performed to study the significance of each
128 relationship. To account for the large number of statistical tests, degrees of significance were corrected
129 using Benjamini-Hochberg method (20). To indicate potential trends, explorations of correlations
130 without correction for multiple testing are also available in supplemental materials.

131 Defined subgroup analyses of patients using Welch Two Sample *t*-tests were performed according to
132 cause of PFP (idiopathic versus non-idiopathic), symptom duration, gender and, age. A biplot is a
133 graphical tool used to display data arranged in matrix form, combining principal component analysis
134 and a projection, which made it possible to represent patterns of participants in clusters.

135 Missing or invalid data were systematically sought for verification in patient charts. Various methods
136 of replacement of missing data were used like LOCF method (Last Observation Carry Forward), worst-
137 case assumption, and multiple account assignment by chained equations (MICE). All analyzes were
138 performed with Stata software v14.1 (StataCorp, College Station, TX, USA).

139 **Number of patients necessary**

140 The required number of subjects for the randomized control trial part of *VISAGE* was determined to
141 be 82, as explained in the protocol article. In the present study of preliminary baseline results, the
142 number of subjects required was set at 40, in line with the latest studies published in the field (14).

143 **Results**

144 **Participant Characteristics**

145 The sample corresponded to the first 46 patients enrolled into the *VISAGE* study. Demographics at
146 baseline (D1) are displayed in Table 1. Participants were well away from the acute phase, and all
147 presented signs of muscle overactivity on the paretic side: facial synkinesis (100%), facial contractures
148 (85%; more common in the idiopathic than in the non-idiopathic sample, see supplemental Table 1)
149 and facial spasms in 63% of cases. The composite score of the SFGS was moderate.

150 **Self-administered questionnaires and SFGS**

151 This data are available in Table 2. The study sample showed altered PFP-related quality of life
152 measured by the FaCE in each of its subscores, the least impaired subscores being oral and social
153 function. The aesthetic self-appreciation of the face was also altered. The SF-12 showed impact on
154 both mental and physical well-being. Anxiety and depression levels were both abnormally high on
155 HADS.

156 **Data from the Créteil Scale**

157 The Créteil Scale scores showed that patients had moderate paresis upon voluntary command
158 ($1.77 \pm 0.29 / 3$), a large number of synkinetic muscles (3.8 ± 1.1 per effort) and a relatively high intensity
159 of synkinesis. Scores of asymmetry during conversation were worse than at rest, both for paresis (upon
160 emotional/automatic command) and for contracture. In contrast, spasms when present at rest almost
161 disappeared during conversation.

162 **Correlations between grading scales and self-questionnaires**

163 Correlations between variables are displayed in the form of a correlation matrix (Figure 2) and a
164 correlation network (Figure 3), which provide visual representation of the detected correlations after
165 corrections for the large number of tests. Bivariate scatter plots are available in Figure 4 to illustrate
166 the most relevant study correlations.

167 **Correlations between *Créteil Scale* and SFGS scores**

168 The CS motor strength score (voluntary command) strongly correlated with the composite and moving
169 symmetry scores of SFGS ($r=0.77$; $p < 10^{-7}$ and $r=0.79$; $p < 10^{-8}$; Figure 4A). The overall (at rest and
170 during conversation) CS score of asymmetry due to paresis (automatic/emotional command) also
171 strongly correlated with the composite and the moving symmetry scores of SFGS ($r=0.71$, $p < 10^{-6}$ and
172 $r=0.78$, $p < 10^{-8}$). The number of synkinetic muscles on CS strongly correlated with the SFGS synkinesis
173 score ($r=0.72$; $p < 10^{-6}$). The SFGS resting symmetry score did not correlate with any other SFGS or CS
174 score.

175 **Correlations between Créteil Scale scores**

176 The CS motor strength score (voluntary command) correlated with the overall CS score of asymmetry
177 due to paresis (automatic/emotional command) $r=0.63$, $p < 10^{-4}$) as well as with the CS score of
178 asymmetry due to paresis at rest ($r=0.50$, $p < 0.004$) and at conversation ($r=0.62$, 10^{-4} ; Figures 4B and
179 4C). The number of synkinetic muscles on CS correlated with the CS motor strength score ($r=-0.38$,
180 $p=0.04$; Figure 4D), the CS intensity of synkinesis score ($r=0.53$, $p=0.002$), the overall CS score of
181 asymmetry due to contracture ($r=-0.42$, $p=0.024$) and the CS score of asymmetry due to overactivity

182 (contracture and spasm combined; $r=-0.41$, $p=0.041$). CS scores of asymmetry due to paresis (rest,
183 conversation and overall) strongly correlated with each other, as did the CS scores of asymmetry due
184 to contracture. Spasm frequency, at rest or at conversation, did not correlate with any other score.

185 **Correlations between Creteil Scale and self-questionnaires**

186 The CS motor strength score (voluntary command) correlated with the FaCE total score ($r=0.38$;
187 $p=0.049$) and facial movement subscore ($r=0.48$; $p=0.008$; Figure 4E) as well with the SF12 physical
188 score ($r=-0.38$; $p=0.049$; Figure 4F). The overall CS score of asymmetry due to paresis
189 (automatic/emotional command) correlated with the FaCE total score ($r=0.48$; $p=0.006$), facial
190 movement and lacrymal control subscores ($r=0.58$; $p<10^{-3}$; $r=0.42$; $p=0.024$).

191 **Correlations between SFGS and self-questionnaires**

192 The composite score and moving symmetry scores of SFGS correlated with the FaCE total score
193 ($r=0.42$, $p=0.023$ and $r=0.46$, $p=0.009$), the FaCE facial movement score ($r=0.51$, $p=0.003$ and $r=0.56$,
194 $p=0.001$) and the FaCE lacrymal control score ($r=0.40$, $p=0.031$ and $r=0.38$, $p=0.048$). Both resting
195 symmetry and synkinesis scores of SFGS did not correlate to any self-questionnaire of the study.

196 **Analysis by subgroup**

197 Participants with idiopathic PFP had a higher CS number of synkinetic muscles ($p=0.005$), a lower CS
198 score of asymmetry by contracture at conversation ($p=0.030$), a higher SFGS synkinesis score
199 ($p=0.030$) and a higher level of anxiety ($p=0.047$), and then those with other causes (see supplemental
200 material 2). Patients with more chronic PFP (> 2 years vs ≤ 2 years) had higher SF12-MCS scores
201 ($p=0.022$), and lower CS overall and conversational scores of asymmetry by paresis ($p=0.043$ and
202 $p=0.049$). Women suffered lower aesthetic self-appreciation of their face ($p=0.014$), lower SF12-MCS
203 score ($p=0.049$) and lower CS score of asymmetry due to contracture during conversation ($p=0.043$).
204 There were no difference according to age.

205 **Discussion**

206 This prospective study in chronic peripheral facial paresis (PFP) explored the validity of the Créteil
207 Scale, a new tool designed to achieve two important distinctions: quantifications of the paresis tested

208 by voluntary command vs paresis noted upon automatic/emotional command, as well as separate
209 assessments of the three main forms of overactivity that affect patients: contracture, synkinesis and
210 spasms, both at rest and during conversation. The findings demonstrate the concurrent validity of the
211 Créteil Scale against the current gold standard (Sunnybrook Facial Grading System). PFP-related
212 quality of life correlated with both scales with the physical score of non-specific quality of life (SF12)
213 correlated with the Créteil Scale only.

214 *Study sample*

215 The sample studied in this correlation study was well representative of patients with chronic facial
216 nerve injury, with a predominant idiopathic cause (21). Mean time since injury was longer in the
217 present study than in other studies that have investigated correlations between clinical and quality-of-
218 life scales or anxiety-depression levels before/after botulinum toxin injections, scores on self-
219 administered questionnaires and clinical scales were similar (21,22).

220 *Study criteria and methodology*

221 To our knowledge, this was the only study to quantify a population of patients with chronic PFP in
222 such a comprehensive manner. In addition to the motor performances visualized during clinical
223 examination, four questionnaires were used to investigate specific quality of life related to PFP,
224 physical well-being, psychological well-being, levels of anxiety and depression, and levels of aesthetic
225 appreciation of the face. This study is also the first to integrate the *FACE-Q* questionnaire as a tool
226 assessing aesthetic impacts of PFP in chronic stages, and to explore correlations with clinical scales
227 and other questionnaires.

228 In fact, the face is nowadays considered as the most important body part from a psychological point
229 of view and facial symmetry has become one of the main criteria of beauty (23). Peripheral facial
230 paresis can bring the patient to inhibit communication with others (which can lead to social exclusion),
231 with facial muscle activation further increasing facial asymmetry compared to rest, as was found here
232 (24).

233 The absence of missing data and the fact that this study is part of a larger research project with a
234 prospective randomized controlled design support robustness of the present findings.

235 ***Validity of the Créteil Scale***

236 The Créteil Scale scores correlated well with the SFGS, which is considered as the gold standard for
237 facial nerve injury rating since 2015, in particular with the SFGS composite and moving symmetry |
238 scores, demonstrating good concurrent validity for the CS motor strength score (voluntary command),
239 the CS number of synkinetic muscles score, the CS synkinesis intensity score and CS scores of
240 asymmetry due to paresis (automatic/emotional command). Of note, there was no correlation with the
241 SFGS resting symmetry score, which is otherwise known for its low inter-observer reliability and low
242 responsiveness (18). In practice, the SFGS resting symmetry score did not differentiate between
243 asymmetry due to paresis and asymmetry due to contracture. In addition, the small number of regions
244 studied at rest (cleft palpebral, nasolabial fold and oral commissure) and the low number of items
245 proposed per region may not sufficiently distinguish between various patterns of paresis. The CS
246 scores of asymmetry due to contracture and spasm frequency did not correlate with SFGS subscores,
247 but the latter did not allow contractures to be specifically quantified.

248 Unlike the SFGS, the Créteil Scale scores of paresis mildly correlate with the physical score of the
249 non-specific quality of life score SF12. It also correlated with the Facial Clinimetric Evaluation
250 (FaCE), the standard scale for quality-of-life assessment specific to PFP, in particular the CS scores of
251 paresis, motor strength score and scores of asymmetry due to paresis. By focusing on 12 separate
252 muscles and using symmetry scores in seven grades, the accuracy of the CS scores of asymmetry
253 probably better enables to quantify severity of paresis than currently available tools.

254 ***Paresis as a trigger for overactivity?***

255 The finding that the *number of synkinetic muscles* on CS correlated with *CS motor strength*
256 *score* ($r=-0.38$, $p<0.049$) may be interesting from a physiological point of view, above and
257 beyond the hypothesis of aberrant facial reinnervation. For limb motoneurons, it is well
258 established that non-use of motoneurons may induce forms of motoneuronal overactivity, in
259 other words that there is a likely causal relationship between under-activation of a motoneuron
260 and its natural response to increase its intrinsic excitability level (25–27). The fact that the

261 number of synkinetic muscles increased with increasing levels of paresis may reflect similar
262 mechanisms, whereby patients with severe PFP tend to decrease use of their facial command
263 - even though the lesion is downstream of the motoneuron - thereby augmenting the chances
264 of motoneuronal hyperexcitability as a consequence.

265 *Measuring Facial Paresis - upon voluntary command or upon automatic/emotional command?*

266 The difference in score between the *motor strength* scores that tested movement amplitude
267 upon maximal voluntary effort and scores of asymmetry due to paresis during conversation is
268 likely to be a sign that, like in the quantified assessment of other neurological disorders in
269 neurorehabilitation, placing maximal constraint on the nervous system to is the best strategy
270 to achieve assessment sensitivity (28). We see this finding as a strong argument to carefully
271 measure motor strength scores when assessing PFP, as these may provide the closest insight
272 into the extent of the nerve damage.

273 *Importance of the analysis during conversation*

274 Voluntary facial motor control pathways are rarely used outside motor testing at the clinic and recent
275 recommendations fail to include assessment of automatic/emotional motor control as part of PFP rating
276 (29). This is unfortunate, as clinicians then abstain from rating automatic and emotional pathways
277 although they prevail in daily cervico-facial motor control.

278 To our knowledge, the Créteil Scale is the only clinical scale that offers quantified assessment of
279 asymmetry by paresis, contracture and spasm during spontaneous conversation. In practice, the
280 evaluator asks the patient a couple of open-ended questions, related to the day, including fun ones if
281 possible, and records facial patient response for 30 seconds.

282 In this study, the CS score of asymmetry due to paresis during conversation was correlated with the
283 FaCE total score as well as with its facial movement and lacrymal scores, showing that
284 automatic/emotional facial motor expression impact on quality of life. Furthermore, the CS score of
285 asymmetry due to contracture during conversation correlated with the CS number of synkinetic
286 muscles, potentially reflecting facial motoneuron hyperexcitability as a common mechanism (30).

287 Facial analysis during conversation provides access to automatic and emotional facial motor control,
288 and therefore seems particularly interesting as it is linked to specific quality of life of PFP patients.

289 ***Relevance of contracture assessment***

290 The Créteil Scale is the only clinical tool quantifying post-PFP facial contracture at the chronic stage
291 in 12 facial regions, during a 30-second recording at rest followed by 30 seconds of spontaneous
292 conversation. The CS scores of asymmetry due to contracture (at rest, during conversation and overall)
293 strongly correlated with each other and inversely correlated with the CS number of synkinetic muscles.
294 On the other hand, they did not correlate with any other questionnaire or SFGS scores, which may
295 relate the fact that this component is not explicitly evaluated in the proposed questionnaires, nor is it
296 sought in the SFGS. The narrowing of the palpebral fissure and the nasolabial fold sought in the resting
297 symmetry score of SFGS, which indicate hemifacial contracture, are mixed in the scoring with the
298 widened palpebral fissure and the less bridged nasolabial fold, which indicate paresis. The SFGS score
299 thus does not differentiate contracture from paresis. The correlation network (Figure 3) nevertheless
300 shows this component to correlate with the other forms of overactivity that is spasms and synkinesis.
301 The development of a subjective patient-centered questionnaire to assess this component specifically
302 could be of interest. Finally, it would be relevant to study the CS score of asymmetry by contracture
303 longitudinally on a wider sample of patients, for example by including acute-stage patients without
304 any overactivity and to follow them clinically over time to detect the emergence of such overactive
305 clinical signs.

306 **Study limitations**

307 ***Questioning the value of spasm frequency assessment***

308 The CS spasm frequency scores did not correlate with any other score in the present study. This could
309 be due to spasms being a phenomenon separate from all others, and additionally not impacting quality
310 of life. Another interpretation may be insufficient sensitivity of spasm scoring in the present study.
311 The total number of spasms over 30 seconds has been separately recorded (not included in this study);
312 this quantitative parameter will possibly prove more sensitive than the ordinal rating used here.

313 Interestingly, spasms almost disappeared during conversation. It is possible that the descending facial
314 activation linked to conversational activity may be associated with motoneuronal membrane or axonal
315 depolarization to a level at which voltage-dependent inward currents potentially responsible for spasms
316 may no longer be operative (31). To explore this conjecture would obviously require specific
317 physiological investigation. Finally, in most cases spasms are not subjectively felt by patients
318 (although this would also require a specific investigation), which may explain the absence of
319 correlations with the questionnaires. Clinically, spasms are easily visible and individualized by the
320 clinician, and their quantification appears important for the therapist to maintain. The effects of
321 therapies, such as rehabilitation programs or botulinum toxin, might later show the importance of this
322 score. To date, there is no questionnaire about direct consequences of spasms. It was recently proposed
323 to transpose a questionnaire validated in essential hemifacial spasm - an entity *distinct from* PFP and
324 its neuromuscular components - called *Hemifacial Spasm 30* (HFS-30), into assessment of PFP (22).
325 Improvement in total HFS-30 score was shown one and four months after botulinum toxin injections
326 (22). However, the pathophysiology of *essential hemifacial spasm* may differ from that of PFP-
327 induced spasms (32).

328 Of note, the SFGS resting symmetry score in this study did not correlate with any other data. Its
329 relevance may appear questionable, as it is also the least reliable of the four SFGS scores.

330 ***Lack of correlations of SFGS and Creteil Scale scores with anxiety and depression levels***

331 Anxiety levels correlated with the total and facial movement scores of FaCE, as well as with the
332 aesthetic self-appreciation of the face through the FACE-Q. The level of depression also correlated
333 with FACE-Q and, negatively related to the FaCE total and social scores. However, there was no
334 correlation between the nine Créteil Scale scores and the four SFGS scores with anxiety and depression
335 levels in this study. This may be due to low correlations and insufficient study power to demonstrate
336 them here: In the non-adjusted matrix (see supplemental material), the *anxiety* score of HADS did
337 correlate with the CS overall score of asymmetry due to contracture and to the CS score of asymmetry
338 due to paresis during conversation.. In contrast, the depression level seemed to be more in relation with
339 the degree of paresis, especially at rest. The statistical correction necessary to take into account of the
340 high number of correlations in the present study made these relationships lose significance; they could

341 nevertheless be considered as trends, which could be verified with larger numbers of evaluations (Day
342 90 and Day 180 of VISAGE study to analyze later).

343 *Perspectives*

344 The data collected in this study, in particular from the clinical scales (Créteil Scale and SFGS), will be
345 correlated with biomechanical indices from 3D facial evaluations in order to pursue the investigation
346 of the Créteil Scale validity. Correlation will be explored between both Créteil Scale scores and SFGS
347 and asymmetry indices and procruste indices calculated from recording sequences of the face at rest
348 (30 seconds), during 10 distinct voluntary movements of maximum amplitude, and the recording of a
349 spontaneous smile (33).

350 Consolidation of the validation of the Créteil Scale and its dissemination will be completed with the
351 continuation of the VISAGE project. A study of intra- and inter-rater reliability (n=4 raters) will also
352 be carried out to determine the respective intra-class correlation coefficients of the scale scores, as well
353 as the minimum gross differences within and between raters.

354 Lastly, the sensitivity to change of Créteil Scale scores will be analyzed between D1 and D180, *i.e.* 6
355 months of facial rehabilitation, in the same cohort of patients.

356 **Conclusions**

357 This study is the first to incorporate the use of the *Créteil Scale*, comprising nine scores, showing
358 concurrent and competing validities that seem relevant in comparison with the SFGS and FaCE
359 reference scales. This study is also the first to combine a large amount of clinical data with data from
360 various questionnaires in a population of patients with chronic unilateral peripheral facial paresis of
361 any cause. It is part of a larger prospective study, aiming to clinically and biomechanically characterize
362 the various neuromuscular composing processes that occur in chronic stages after a facial nerve lesion.

363 Overall, the present findings show that the Créteil Scale correlates well with the SFGS, but differs
364 from it in its assessment of additional neuromuscular components of PFP, such as contracture and
365 spasms. Finally, the FACE-Q scale appears to be an interesting assessment tool for PFP patients, given
366 the high correlations obtained with the other scores from the questionnaires. Upcoming explorations

367 of correlation between the clinical data presented here and biomechanical data obtained in the VISAGE
368 study will enable us to investigate the construct validity of the Créteil scale and to further characterize
369 the neuromuscular components of PFP.

370

371 **Acknowledgments section:** We are grateful to the participants who helped us carry out the study.

372 **Author's contributions:** MB and JMG designed the protocol and were major contributors in writing
373 the manuscript. MB was responsible for recruitment, inclusions, and blinded assessments. CGC was
374 responsible for randomization and the rehabilitation consultations. PAN took care of ethical and
375 regulatory issues. EA performed the statistical analysis. All authors read and approved the final
376 manuscript.

377 **Funding statement:** The study is funded by a grant from the *Programme Hospitalier de Recherche*
378 *Clinique* - PHRC 2016 (French Ministry of Health) and sponsored by Assistance Publique-Hopitaux
379 de Paris (AP-HP), covering fees to assessing investigators, PM&R specialists for rehabilitation
380 consultations, study coordinators, as well as clinical research assistants and statisticians. Funder and
381 sponsor had no influence on the study design. Funder had no influence on collection, management,
382 analysis, interpretation of data writing of the report, and the decision to submit the report for
383 publication. *Contact information for the trial sponsor:* drc-secretariat-promotion@aphp.fr.

384

385

386 **References**

- 387 1. Hohman MH, Hadlock TA. Etiology, diagnosis, and management of facial palsy: 2000 patients at a facial
388 nerve center. *The Laryngoscope*. 2014; 124(7):E283-293.
- 389 2. Fu L, Bundy C, Sadiq SA. Psychological distress in people with disfigurement from facial palsy. *Eye Lond*
390 *Engl*. 2011; (10):1322-6.
- 391 3. Lee SY, Kong IG, Oh DJ, Choi HG. Increased risk of depression in Bell's palsy: Two longitudinal follow-
392 up studies using a national sample cohort. *J Affect Disord*. 2019; 251:256-62.
- 393 4. Saadi R, Shokri T, Schaefer E, Hollenbeak C, Lighthall JG. Depression Rates After Facial Paralysis. *Ann*
394 *Plast Surg*. 2019; 83(2):190-4.
- 395 5. VanSwearingen JM, Cohn JF, Turnbull J, Mrzai T, Johnson P. Psychological distress: linking impairment
396 with disability in facial neuromotor disorders. *Otolaryngol Head Neck Surg Off J Am Acad Otolaryngol-*
397 *Head Neck Surg*. 1998; 118(6):790-6.
- 398 6. Ng JH, Ngo RYS. The use of the facial clinimetric evaluation scale as a patient-based grading system in
399 Bell's palsy. *The Laryngoscope*. mai 2013;123(5):1256-60.
- 400 7. Sullivan FM, Swan IRC, Donnan PT, Morrison JM, Smith BH, McKinstry B, et al. Early treatment with
401 prednisolone or acyclovir in Bell's palsy. *N Engl J Med*. 2007; 357(16):1598-607.
- 402 8. Peitersen E. Bell's Palsy: The Spontaneous Course of 2,500 Peripheral Facial Nerve Palsies of Different
403 Etiologies. *Acta Otolaryngol (Stockh)*. 2002;(549):4-30.
- 404 9. Adour KK, Byl FM, Hilsinger RL, Kahn ZM, Sheldon MI. The true nature of Bell's palsy: analysis of 1,000
405 consecutive patients. *The Laryngoscope*. 1978;88(5):787-801.
- 406 10. Salles AG, da Costa EF, Ferreira MC, do Nascimento Remigio AF, Moraes LB, Gemperli R. Epidemiologic
407 Overview of Synkinesis in 353 Patients with Longstanding Facial Paralysis under Treatment with
408 Botulinum Toxin for 11 Years. *Plast Reconstr Surg*. déc 2015;136(6):1289-98.
- 409 11. Van Veen MM, Quatela O, Tavares-Brito J, Robinson M, Baiungo JH, Werker PMN, et al. Patient-perceived
410 severity of synkinesis reduces quality of life in facial palsy: A cross-sectional analysis in 92 patients. *Clin*
411 *Otolaryngol*. mai 2019;44(3):483-6.
- 412 12. Díaz-Aristizabal U, Valdés-Vilches M, Fernández-Ferreras TR, Calero-Muñoz E, Bienzobas-Allué E,
413 Aguilera-Ballester L, et al. Effect of botulinum toxin typeA in functionality, synkinesis and quality of life
414 in peripheral facial palsy sequelae. *Neurol Barc Spain*. 12 mars 2021;S0213-4853(21)00032-3.
- 415 13. Fujiwara K, Fukuda A, Morita S, Yanagi H, Hoshino K, Nakamaru Y, et al. Psychological evaluation for
416 patients with non-cured facial nerve palsy. *Auris Nasus Larynx*. févr 2022;49(1):53-7.
- 417 14. Bruins TE, Van Veen MM, Werker PMN, Dijkstra PU, Broekstra DC. Associations Between Clinician-
418 Graded Facial Function and Patient-Reported Quality of Life in Adults With Peripheral Facial Palsy: A
419 Systematic Review and Meta-analysis. *JAMA Otolaryngol Neck Surg*. 2021;147(8):717.
- 420 15. Tavares-Brito J, van Veen MM, Dusseldorp JR, Bahmad F, Hadlock TA. Facial Palsy-Specific Quality of
421 Life in 920 Patients: Correlation With Clinician-Graded Severity and Predicting Factors. *The Laryngoscope*.
422 janv 2019;129(1):100-4.
- 423 16. Bylund N, Hultcrantz M, Jonsson L, Marsk E. Quality of Life in Bell's Palsy: Correlation with Sunnybrook
424 and House-Brackmann Over Time. *The Laryngoscope*. 2021;131(2):E612-8.

- 425 17. Baude M, Guihard M, Gault-Colas C, Bénichou L, Coste A, Méningaud JP, et al. Guided Self-rehabilitation
426 Contract vs conventional therapy in chronic peripheral facial paresis: VISAGE, a multicenter randomized
427 controlled trial. *BMC Neurol.* 10 avr 2023;23(1):148.
- 428 18. Ross BG, Fradet G, Nedzelski JM. Development of a sensitive clinical facial grading system. *Otolaryngol-
429 -Head Neck Surg Off J Am Acad Otolaryngol-Head Neck Surg.* mars 1996;114(3):380-6.
- 430 19. Neely JG, Cherian NG, Dickerson CB, Nedzelski JM. Sunnybrook facial grading system: reliability and
431 criteria for grading. *The Laryngoscope.* mai 2010;120(5):1038-45.
- 432 20. Ghosh D. Wavelet-based Benjamini-Hochberg procedures for multiple testing under dependence. *Math
433 Biosci Eng MBE.* 24 sept 2019;17(1):56-72.
- 434 21. Bruins TE, van Veen MM, Kleiss IJ, Broekstra DC, Dijkstra PU, Ingels KJAO, et al. Interpreting Quality-
435 of-Life Questionnaires in Patients with Long-Standing Facial Palsy. *Facial Plast Surg Aesthetic Med.*
436 2022;24(2):75-80.
- 437 22. Amar J, Tankere F, Picard D, Alciato L, Carré F, Foirest C. Impact of Botulinum Toxin Injections on Quality
438 of Life of Patients with Long-Standing Peripheral Facial Palsy. *Toxins.* 8 mars 2024;16(3):140.
- 439 23. Slade PD, Russell GF. Experimental investigations of bodily perception in anorexia nervosa and obesity.
440 *Psychother Psychosom.* 1973;22(2):359-63.
- 441 24. Bradbury ET, Simons W, Sanders R. Psychological and social factors in reconstructive surgery for hemi-
442 facial palsy. *J Plast Reconstr Aesthetic Surg JPRAS.* 2006;59(3):272-8.
- 443 25. Lundbye-Jensen J, Nielsen JB. Immobilization induces changes in presynaptic control of group Ia afferents
444 in healthy humans. *J Physiol.* 1 sept 2008;586(17):4121-35.
- 445 26. Lundbye-Jensen J, Nielsen JB. Central nervous adaptations following 1 wk of wrist and hand
446 immobilization. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. juill 2008;105(1):139-51.
- 447 27. Seynnes OR, Maffiuletti NA, Maganaris CN, de Boer MD, Pensini M, di Prampero PE, et al. Soleus T reflex
448 modulation in response to spinal and tendinous adaptations to unilateral lower limb suspension in humans.
449 *Acta Physiol Oxf Engl.* nov 2008;194(3):239-51.
- 450 28. Hermsdörfer J, Marquardt C, Wack S, Mai N. Comparative analysis of diadochokinetic movements. *J
451 Electromyogr Kinesiol Off J Int Soc Electrophysiol Kinesiol.* août 1999;9(4):283-95.
- 452 29. Berner JE, Kamalathevan P, Kyriazidis I, Nduka C. Facial synkinesis outcome measures: A systematic
453 review of the available grading systems and a Delphi study to identify the steps towards a consensus. *J Plast
454 Reconstr Aesthetic Surg JPRAS.* juin 2019;72(6):946-63.
- 455 30. Cossu G, Valls-Solé J, Valdeoriola F, Muñoz E, Benítez P, Aguilar F. Reflex excitability of facial
456 motoneurons at onset of muscle reinnervation after facial nerve palsy. *Muscle Nerve.* mai
457 1999;22(5):614-20.
- 458 31. Lin CS, Mogyoros I, Kuwabara S, Cappelen-Smith C, Burke D. Accommodation to depolarizing and
459 hyperpolarizing currents in cutaneous afferents of the human median and sural nerves. *J Physiol.* 1 déc
460 2000;529 Pt 2(Pt 2):483-92.
- 461 32. Tan EK, Fook-Chong S, Lum SY, Lim E. Botulinum toxin improves quality of life in hemifacial spasm:
462 validation of a questionnaire (HFS-30). *J Neurol Sci.* 15 avr 2004;219(1-2):151-5.
- 463 33. Guihard M, Gracies JM, Baude M. Three-Dimensional Quantification of Facial Morphology and
464 Movements Using a Wearable Helmet. *BioMed Res Int.* 2022;2022:2774713.
- 465

466 **Figure legends**

467 **-Figure 1: Visit schedule at Day 1 of the study including two consecutive clinic visits.**
468 Abbreviations: *FaCE*, Facial Clinimetric Evaluation; *HADS*, Hamilton Anxiety and Depression Scale;
469 *SF-12*, Short-Form 12; *SFGS*, Sunnybrook Facial Grading System.

470

471 **-Figure 2: Correlation matrix between self-administered questionnaires and clinical scales**
472 **variables.** Corrections for multiple tests were applied (Hochberg). Values of correlation coefficients
473 are displayed for significant correlations only (Pearson or spearman depending on the conditions of
474 application). The color code at the right of the matrix indicates the direction of the correlation.
475 Abbreviations: *Cont*, contracture; *Conv*, conversation; *CS*, Créteil Scale; *FaCE*, Facial Clinimetric
476 Evaluation; *HADS*, Hamilton anxiety and depression scale; *MCS*, Mental Component Summary; *Nb*,
477 number; *PCS*, Physical Component Summary; *Rest*, resting; *SF-12*, Short-Form 12; *SFGS*,
478 Sunnybrook Facial Grading System; *Synkin*, synkinesis.

479

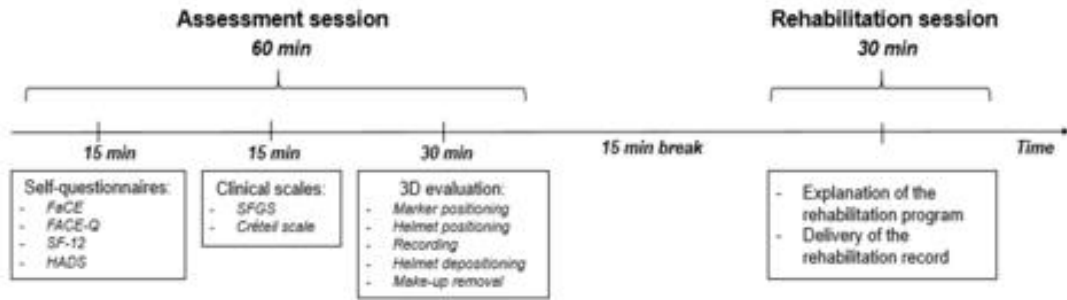
480 **-Figure 3: Bivariate correlation diagrams between the Créteil Scale (CS) motor strength score**
481 **and: 3A, the Facial Clinimetric Evaluation scale (FaCE); 3B, the Physical Component Summary**
482 **of the Short-Form 12 (PCS-SF12); 3C, the Composite score of the Sunnybrook Facial Grading**
483 **System (CS-SFGS); 3D, the Créteil Scale asymmetry score by paresis at rest; 3E, the Créteil**
484 **Scale asymmetry score by paresis at conversation; 3F, the CS number of synkinesis score.** Blue
485 lines correspond to the 'Loess' model showing the smoothed relationship between the two variables.

486

487 **-Figure 4: Correlation network.** Closest variables are the most correlated, red lines indicate negative
488 correlation, blue lines positive correlation. The thicker the line between two variables, the greater the
489 correlation. Abbreviations: *Cont*, contracture; *Conv*, conversation; *CS*, Créteil Scale; *FaCE*, Facial
490 Clinimetric Evaluation; *MCS*: Mental Component Summary; *Rest*, resting; *PCS*: Physical Component
491 Summary; *SF-12*, Short-Form 12; *SFGS*, Sunnybrook Facial Grading System; *Synkin*, synkinesis.

493 **Figures**

494 **Figure 1**



495

496 **Figure 2**

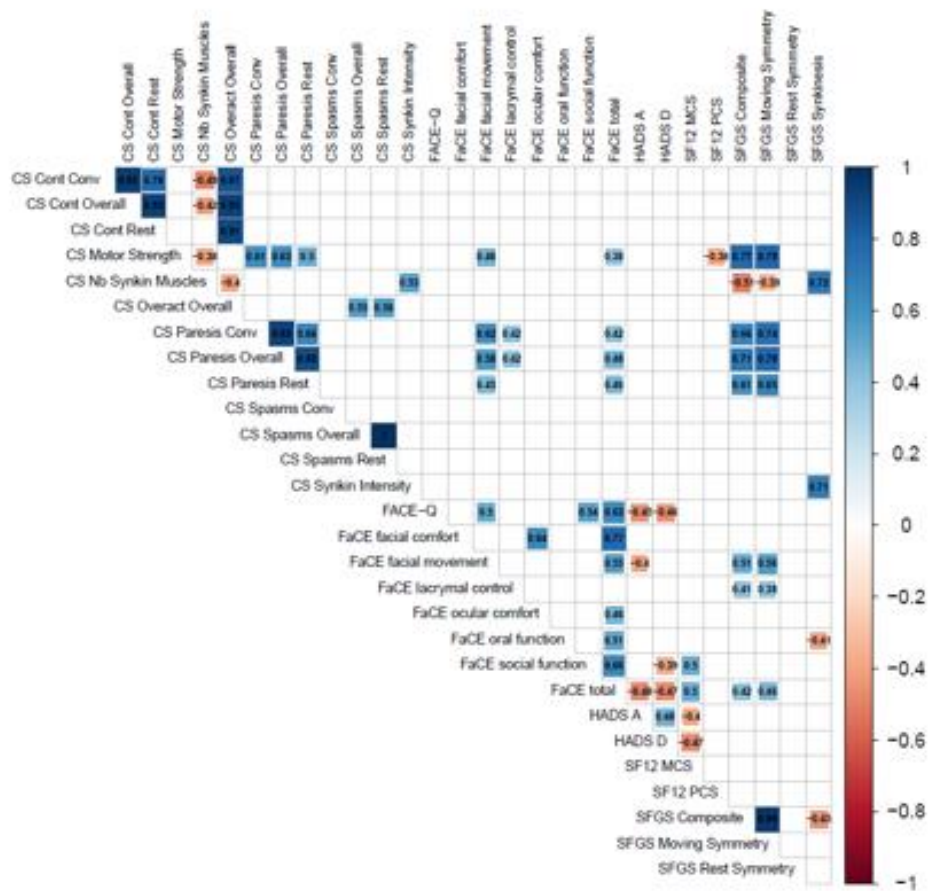


Table 1 – Characteristics of study population

Number	46
Women	34 (73.9)
Age (years)	49.9 (14.9)
Right-handed	44 (95.7)
Cause of peripheral facial paresis	
Idiopathic	31 (67.4)
Herpes Zoster	5 (10.9)
Immunologic	5 (10.9)
Post-surgical	3 (6.5)
Post-traumatic	2 (4.3)
Left side of facial paresis	25 (54.3)
Time since injury (years)	4.4 (6.1)
Overactivity signs	46 (100)
Spasms	29 (63.0)
Contractures	39 (84.8)
Synkinesis	46 (100)

Legend of Table 1: Quantitative data described using mean (SD) or median (Q1;Q3), depending on the normality of distributions; qualitative data reported as numbers or percentages. |

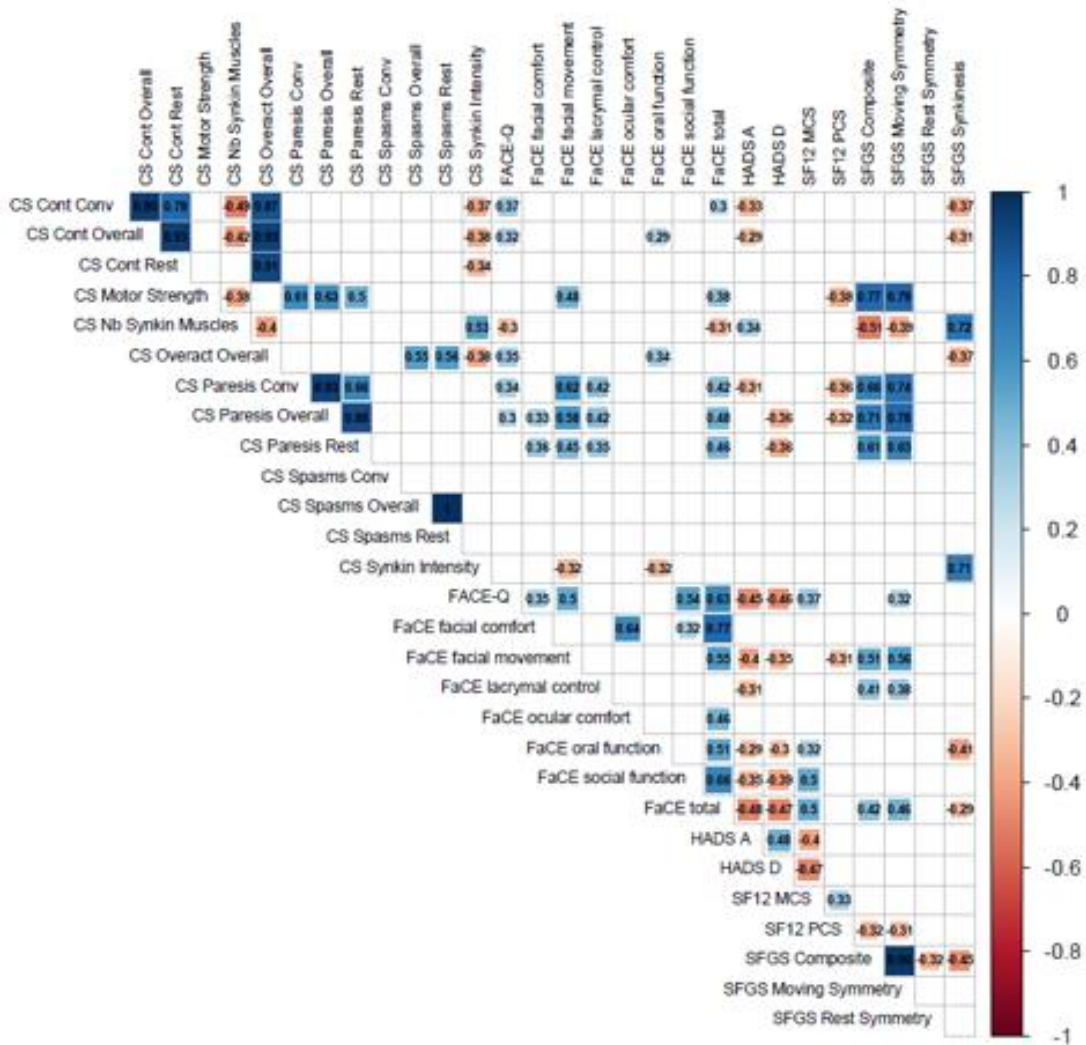
Table 2 - Values of clinical scales and self-questionnaires at Day 1

Facial Clinimetric Evaluation	52.1 (13.1)
Facial movement	40.9 (18.0)
Facial comfort	41.5 (21.5)
Oral function	70.4 (22.3)
Ocular comfort	54.3 (34.6)
Lacrymal control	55.4 (32.0)
Social function	62.2 (21.1)
FACE-Q	21.0 (5.4)
Short-Form 12	
Physical component summary	17.5 (2.1)
Mental component summary	21.1 (2.6)
Echelle Hamilton Anxiety Depression	
Anxiety score	7.0 (2.8)
Depression score	5.0 (2.9)
Sunnybrook Facial Grading System	
Composite score	39.1 (13.7)
Resting Symmetry score	13.7 (2.5)
Voluntary movement score	61.6 (12.0)
Synkinesis score	8.8 (2.9)
Créteil Scale	
Motor strength	1.77 (0.29)
Number of synkinetic muscles	3.79 (1.11)
Intensity of synkinesis	1.61 (0.24)
Asymmetry scores at rest by:	
Paresis	2.64 (0.20)
Spasms (frequency)	2.80 (0.24)
Contracture	2.59 (0.26)
Asymmetry scores during conversation by:	
Paresis	2.33 (0.27)
Spasms (frequency)	2.99 (0.04)
Contracture	2.34 (0.28)

Legend of Table 2: Quantitative data described using Mean(SD) or Median(Q1;Q3), depending on the normality of distributions; qualitative data reported as numbers or percentages.

Supplemental material 1:

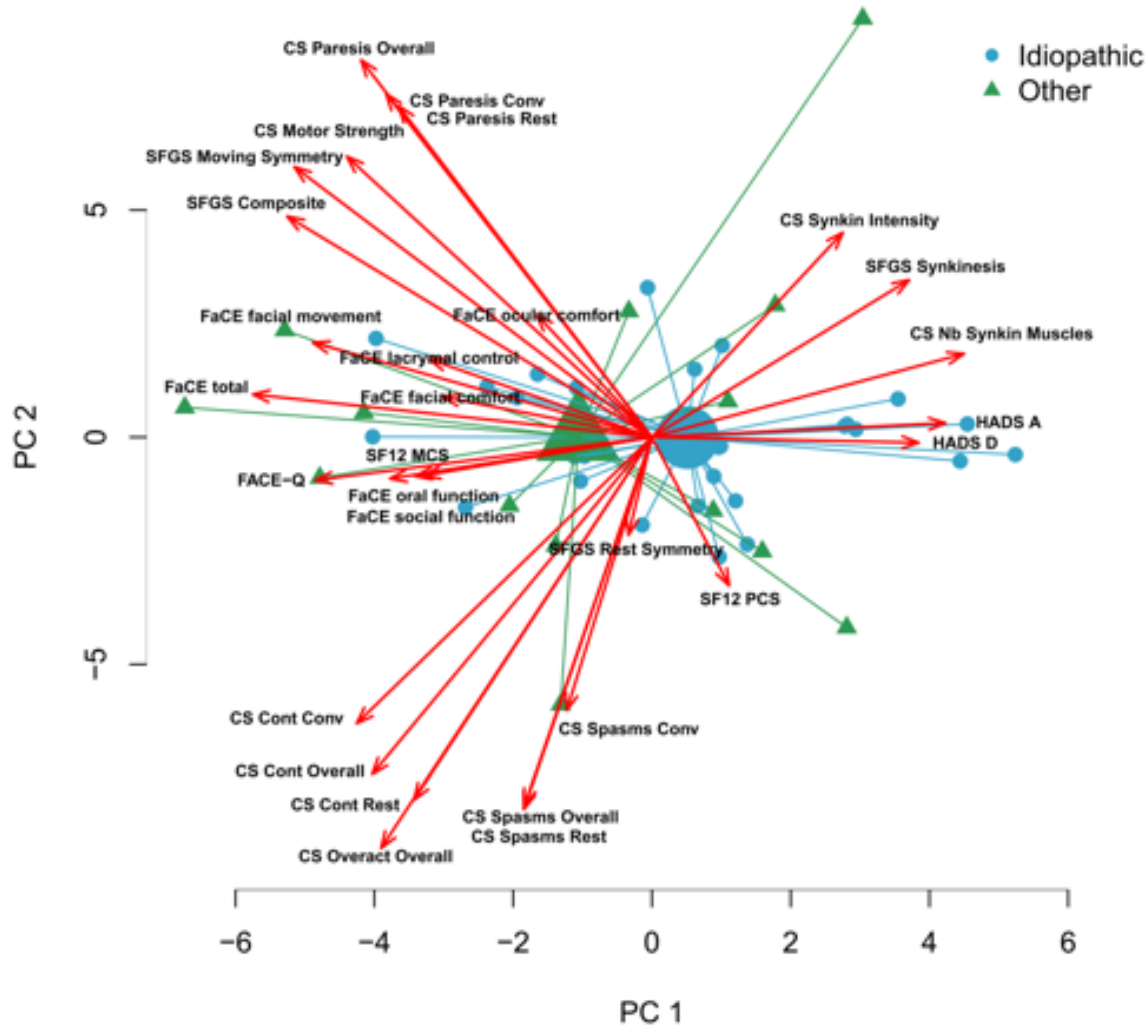
Title: Correlation matrix between self-administered questionnaires and clinical scales variables without correction for multiple testing.



Legend: Value of the correlation coefficient is displayed only when correlation is statistically significant at the $p < 0.05$ level (Pearson or Spearman depending on the conditions of application). Color indicates direction and magnitude of correlation according to the color code indicated on the right.

Supplemental material 2:

Title: Biplot between self-administered questionnaires and clinical scales variables according to the cause of the peripheral facial paresis (*idiopathic vs. non-idiopathic*).



Legend: This figure shows the biplot representation of the 29 variables assessed in correlation analyses, allowing for visualization of the relations between variables (represented as arrows) while simultaneously displaying the patients (represented as circles/triangles), based on their individual characteristics. Results are projected onto the two first components/dimensions (PC1, PC2) generated by principal component analysis. Colours for observations correspond to the cause of the PFP (idiopathic cause in blue and non-idiopathic cause in green). This representation confirmed the correlations previously identified (e.g. between CS synkin intensity/CS Cont Conv/CS Cont Rest, or between SFGS Composite/SFGS moving symmetry/CS motor strength), as shown by arrows pointing in similar or inverted parallel directions, corresponding to positive or negative correlations, respectively. Patients with idiopathic causes (colored in blue) mostly projected on the right area of the plot, indicating higher values in CS number of synkinetic muscles, SFGS synkinesis score, HAD-A and -D scores, and lower values in CS score of asymmetry by contracture at conversation and FaCE total and subscores, compared to patients with PFP from other causes.

Supplemental material 3:

Title: Clinical data by cause (idiopathic vs others)*

Characteristic	N	Overall N = 46 ¹	Idiopathic N=31 ¹	Other N=15 ¹	p-value ²
Age	46	48.0 [38.0;60.8]	47.0 [37.5;58.0]	49.0 [40.0;60.0]	0.61
Gender, women	46	34 (73.9%)	24 (77.4%)	10 (66.7%)	0.49
Time since lesion, years	46	2.13 [1.18;5.1]	2.38 [1.12;5.4]	1.80 [1.33;3.35]	>0.99
Facial Palsy < 2y		23 (50.0%)	15 (48.4%)	8 (53.3%)	0.75
Facial Palsy ≥ 2y		23 (50.0%)	16 (51.6%)	7 (46.7%)	
Scores					
FaCE total	46	52.1 ±13.1	50.5 ±10.9	55.2 ±16.8	0.34
FaCE facial comfort	46	41.5 ±21.5	40.6 ±20.4	43.3 ±24.2	0.71
FaCE facial movement	46	40.9 ±18.0	40.1 ±18.3	42.8 ±17.8	0.63
FaCE lacrymal control	46	55.4 ±32.0	51.6 ±28.8	63.3 ±37.6	0.30
FaCE oral function	46	70.4 ±22.3	69.8 ±18.2	71.7 ±29.7	0.82
FaCE social function	46	62.2 ±21.1	57.9 ±18.5	71.3 ±23.8	0.069
FaCE ocular comfort	46	54.3 ±34.6	61.7 ±30.3	39.2 ±38.9	0.061
FACE-Q	46	21.0 ±5.4	20.4 ±5.2	22.3 ±5.6	0.26
SF12 PCS	46	17.5 ±2.08	17.7 ±2.03	16.9 ±2.15	0.23
SF12 MCS	46	21.1 ±2.65	20.9 ±2.70	21.5 ±2.59	0.48
HADS anxiety	46	7.0 ±2.84	7.5 ±2.99	5.9 ±2.22	0.047
HADS depression	46	5.0 ±2.99	5.5 ±2.74	4.07 ±3.35	0.18
SFSG Composite score	46	39.1 ±13.7	36.6 ±11.0	44.2 ±17.5	0.14
SFSG Resting symmetry score	46	13.7 ±2.46	14.0 ±2.01	13.0 ±3.16	0.26
SFSG Voluntary movement symmetry score	46	61.6 ±12.0	60.1 ±10.1	64.5 ±15.1	0.32
SFSG Synkinesis score	46	8.8 ±2.99	9.5 ±2.72	7.3 ±3.11	0.033
CS Asymmetry by paresis at rest	46	2.64 ±0.20	2.64 ±0.18	2.65 ±0.25	0.85
CS Asymmetry by paresis at conversation	46	2.33 ±0.27	2.31 ±0.25	2.38 ±0.31	0.48
CS Asymmetry by paresis	46	2.47 ±0.21	2.46 ±0.19	2.50 ±0.26	0.55
CS Asymmetry by contracture at rest	46	2.59 ±0.26	2.57 ±0.25	2.63 ±0.29	0.52
CS Asymmetry by contracture at conversation	46	2.34 ±0.28	2.28 ±0.23	2.48 ±0.32	0.034
CS Asymmetry by contracture	46	2.45 ±0.26	2.40 ±0.23	2.54 ±0.30	0.14
CS Asymmetry by spasms at rest	46	2.80 ±0.24	2.83 ±0.16	2.74 ±0.35	0.33
CS Asymmetry by spasms at conversation	43	2.99 ±0.04	3.00 ±0.01	2.97 ±0.07	0.17
CS Asymmetry by spasms	43	69.4 ±3.26	69.9 ±1.96	68.5 ±4.96	0.33
CS Overactivity (spasms + contracture)	43	2.67 ±0.17	2.66 ±0.13	2.70 ±0.23	0.59
CS Motor strength	46	1.77 ±0.29	1.73 ±0.27	1.86 ±0.33	0.21
CS Number of syncinetic muscles	46	3.79 ±1.11	4.14 ±0.89	3.06 ±1.20	0.005
CS Intensity of synkinesis	46	1.61 ±0.24	1.66 ±0.18	1.51 ±0.32	0.12

¹Median [25%;75%]; n (%); Mean ±SD²Wilcoxon rank sum test; Fisher's exact test; Pearson's Chi-squared test; Welch Two Sample t-test

Supplemental material 4:

Title: Clinical data by time since PFP lesion

Characteristic	N	Overall N = 46 ¹	Facial Palsy < 2y N=23 ¹	Facial Palsy >= 2y N=23 ¹	P- value ²
Age, years	46	48.0 [38.0;60.8]	50.0 [39.5;59.5]	43.0 [37.5;59.0]	0.65
Gender, women		34 (73.9%)	16 (69.6%)	18 (78.3%)	0.50
<i>Scores</i>					
FaCE total	46	52.1 ±13.1	52.8 ±14.9	51.3 ±11.4	0.70
FaCE facial comfort	46	41.5 ±21.5	42.4 ±21.9	40.6 ±21.5	0.78
FaCE facial movement	46	40.9 ±18.0	43.5 ±18.8	38.4 ±17.2	0.34
FaCE lacrymal control	46	55.4 ±32.0	60.9 ±28.0	50.0 ±35.4	0.25
FaCE oral function	46	70.4 ±22.3	70.1 ±20.9	70.7 ±24.0	0.94
FaCE social function	46	62.2 ±21.1	60.9 ±22.8	63.6 ±19.7	0.67
FaCE ocular comfort	46	54.3 ±34.6	59.2 ±29.0	49.5 ±39.4	0.34
FACE-Q	46	21.0 ±5.4	21.3 ±6.3	20.7 ±4.33	0.67
SF12 PCS	46	17.5 ±2.08	16.8 ±2.11	18.2 ±1.85	0.022
SF12 MCS	46	21.1 ±2.65	20.6 ±2.54	21.5 ±2.74	0.25
HADS anxiety	46	7.0 ±2.84	7.3 ±3.07	6.7 ±2.62	0.44
HADS depression	46	5.0 ±2.99	5.1 ±3.43	4.87 ±2.55	0.77
SFGS Composite score	46	39.1 ±13.7	40.2 ±14.9	38.0 ±12.7	0.60
SFGS Resting symmetry score	46	13.7 ±2.46	13.9 ±2.11	13.5 ±2.79	0.55
SFGS Voluntary movement symmetry score	46	61.6 ±12.0	63.0 ±13.0	60.2 ±11.0	0.44
SFGS Synkinesis score	46	8.8 ±2.99	8.9 ±2.83	8.7 ±3.20	0.81
CS Asymmetry by paresis at rest	46	2.64 ±0.20	2.69 ±0.15	2.59 ±0.23	0.089
CS Asymmetry by paresis at conversation	46	2.33 ±0.27	2.41 ±0.22	2.25 ±0.30	0.049
CS Asymmetry by paresis	46	2.47 ±0.21	2.54 ±0.16	2.41 ±0.24	0.043
CS Asymmetry by contracture at rest	46	2.59 ±0.26	2.58 ±0.26	2.60 ±0.26	0.82
CS Asymmetry by contracture at conversation	46	2.34 ±0.28	2.36 ±0.27	2.32 ±0.28	0.64
CS Asymmetry by contracture	46	2.45 ±0.26	2.45 ±0.26	2.44 ±0.26	0.86
CS Asymmetry by spasms at rest	46	2.80 ±0.24	2.76 ±0.28	2.85 ±0.18	0.22
CS Asymmetry by spasms at conversation	43	2.99 ±0.04	2.99 ±0.05	2.99 ±0.02	0.55
CS Asymmetry by spasms	43	69.4 ±3.26	68.9 ±3.96	70.0 ±2.28	0.29
CS Overactivity (spasms + contracture)	43	2.67 ±0.17	2.66 ±0.19	2.68 ±0.15	0.75
CS Motor strength	46	1.77 ±0.29	1.82 ±0.30	1.72 ±0.28	0.24
CS Number of syncinetic muscles	46	3.79 ±1.11	3.79 ±1.07	3.79 ±1.17	0.98
CS Intensity of synkinesis	46	1.61 ±0.24	1.61 ±0.20	1.61 ±0.29	0.97

¹Median [25%;75%]; n (%); Mean ±SD²Wilcoxon rank sum test; Pearson's Chi-squared test; Welch Two Sample t-test

Supplemental material 5:

+ Title: Clinical data by gender

Characteristic	N	Overall N = 46 ¹	Men N=12 ¹	Women N=34 ¹	p-value ²
Age, years	46	48.0 [38.0;60.8]	49.0 [40.0;56.8]	47.0 [37.3;60.8]	0.64
Time since lesion, years	46	2.13 [1.18;5.1]	1.59 [1.10;2.73]	2.64 [1.31;6.8]	0.18
Facial Palsy < 2y		23 (50.0%)	7 (58.3%)	16 (47.1%)	0.50
Facial Palsy >= 2y		23 (50.0%)	5 (41.7%)	18 (52.9%)	
Scores					
FaCE total	46	52.1 ±13.1	57.9 ±17.8	50.0 ±10.6	0.17
FaCE facial comfort	46	41.5 ±21.5	45.8 ±28.5	40.0 ±18.7	0.52
FaCE facial movement	46	40.9 ±18.0	42.4 ±19.9	40.4 ±17.5	0.77
FaCE lacrymal control	46	55.4 ±32.0	64.6 ±31.0	52.2 ±32.2	0.25
FaCE oral function	46	70.4 ±22.3	76.0 ±20.3	68.4 ±22.9	0.29
FaCE social function	46	62.2 ±21.1	72.4 ±25.2	58.6 ±18.6	0.10
FaCE ocular comfort	46	54.3 ±34.6	49.0 ±38.2	56.3 ±33.6	0.57
FACE-Q	46	21.0 ±5.4	25.1 ±6.4	19.6 ±4.19	0.014
SF12 PCS	46	17.5 ±2.08	18.3 ±1.67	17.2 ±2.15	0.068
SF12 MCS	46	21.1 ±2.65	22.6 ±3.03	20.5 ±2.33	0.049
HADS anxiety	46	7.0 ±2.84	6.3 ±2.46	7.3 ±2.96	0.30
HADS depression	46	5.0 ±2.99	4.75 ±3.74	5.1 ±2.73	0.78
SFGS Composite score	46	39.1 ±13.7	41.5 ±13.3	38.3 ±14.0	0.48
SFGS Resting symmetry score	46	13.7 ±2.46	14.2 ±1.95	13.5 ±2.62	0.38
SFGS Voluntary movement symmetry score	46	61.6 ±12.0	64.0 ±12.1	60.7 ±12.0	0.43
SFGS Synkinesis score	46	8.8 ±2.99	8.3 ±2.96	8.9 ±3.03	0.57
CS Asymmetry by paresis at rest	46	2.64 ±0.20	2.66 ±0.18	2.64 ±0.21	0.68
CS Asymmetry by paresis at conversation	46	2.33 ±0.27	2.43 ±0.25	2.30 ±0.27	0.13
CS Asymmetry by paresis	46	2.47 ±0.21	2.53 ±0.18	2.45 ±0.22	0.21
CS Asymmetry by contracture at rest	46	2.59 ±0.26	2.63 ±0.22	2.58 ±0.27	0.54
CS Asymmetry by contracture at conversation	46	2.34 ±0.28	2.48 ±0.26	2.29 ±0.27	0.043
CS Asymmetry by contracture	46	2.45 ±0.26	2.54 ±0.24	2.42 ±0.26	0.15
CS Asymmetry by spasms at rest	46	2.80 ±0.24	2.89 ±0.15	2.77 ±0.26	0.084
CS Asymmetry by spasms at conversation	43	2.99 ±0.04	2.99 ±0.03	2.99 ±0.04	0.71
CS Asymmetry by spasms	43	69.4 ±3.26	70.4 ±2.01	69.1 ±3.55	0.15
CS Overactivity (spasms + contracture)	43	2.67 ±0.17	2.75 ±0.13	2.64 ±0.17	0.059
CS Motor strength	46	1.77 ±0.29	1.78 ±0.24	1.77 ±0.31	0.87
CS Number of syncinetic muscles	46	3.79 ±1.11	3.57 ±1.18	3.87 ±1.09	0.45
CS Intensity of synkinesis	46	1.61 ±0.24	1.70 ±0.17	1.58 ±0.26	0.081

¹Median [25%;75%]; n (%); Mean ±SD²Wilcoxon rank sum test; Pearson's Chi-squared test; Welch Two Sample t-test

□

Supplemental material 6:**Title: Clinical data by age**

Characteristic	N	Overall N = 46 ¹	Age < 50y N=26 ¹	Age ≥ 50y N=20 ¹	p-value ²
Gender, women		34 (73.9%)	19 (73.1%)	15 (75.0%)	0.88
Time since lesion, years	46	2.13 [1.18;5.1]	3.12 [1.39;5.8]	1.46 [1.06;3.56]	0.094
Facial Palsy < 2y		23 (50.0%)	11 (42.3%)	12 (60.0%)	0.23
Facial Palsy ≥ 2y		23 (50.0%)	15 (57.7%)	8 (40.0%)	
Scores					
FaCE total	46	52.1 ±13.1	53.7 ±11.7	50.0 ±14.8	0.37
FaCE facial comfort	46	41.5 ±21.5	44.2 ±17.8	37.9 ±25.6	0.35
FaCE facial movement	46	40.9 ±18.0	44.2 ±18.8	36.7 ±16.3	0.15
FaCE lacrymal control	46	55.4 ±32.0	59.6 ±27.5	50.0 ±37.2	0.34
FaCE oral function	46	70.4 ±22.3	69.2 ±22.1	71.9 ±22.9	0.70
FaCE social function	46	62.2 ±21.1	62.5 ±19.6	61.9 ±23.5	0.92
FaCE ocular comfort	46	54.3 ±34.6	60.6 ±34.8	46.3 ±33.5	0.16
FACE-Q	46	21.0 ±5.4	22.3 ±5.0	19.4 ±5.4	0.070
SF12 PCS	46	17.5 ±2.08	17.9 ±1.75	17.0 ±2.39	0.15
SF12 MCS	46	21.1 ±2.65	21.3 ±2.58	20.7 ±2.77	0.42
HADS anxiety	46	7.0 ±2.84	7.0 ±2.63	7.1 ±3.16	0.88
HADS depression	46	5.0 ±2.99	4.81 ±3.11	5.3 ±2.88	0.62
SFGS Composite score	46	39.1 ±13.7	40.5 ±11.0	37.4 ±16.8	0.48
SFGS Resting symmetry score	46	13.7 ±2.46	13.5 ±2.75	14.0 ±2.05	0.45
SFGS Voluntary movement symmetry score	46	61.6 ±12.0	62.6 ±9.9	60.2 ±14.4	0.52
SFGS Synkinesis score	46	8.8 ±2.99	8.7 ±2.13	8.9 ±3.90	0.87
CS Asymmetry by paresis at rest	46	2.64 ±0.20	2.68 ±0.16	2.59 ±0.24	0.17
CS Asymmetry by paresis at conversation	46	2.33 ±0.27	2.36 ±0.24	2.30 ±0.31	0.53
CS Asymmetry by paresis	46	2.47 ±0.21	2.50 ±0.17	2.43 ±0.26	0.28
CS Asymmetry by contracture at rest	46	2.59 ±0.26	2.65 ±0.20	2.53 ±0.32	0.15
CS Asymmetry by contracture at conversation	46	2.34 ±0.28	2.41 ±0.23	2.25 ±0.31	0.064
CS Asymmetry by contracture	46	2.45 ±0.26	2.51 ±0.20	2.37 ±0.30	0.077
CS Asymmetry by spasms at rest	46	2.80 ±0.24	2.79 ±0.20	2.82 ±0.29	0.73
CS Asymmetry by spasms at conversation	43	2.99 ±0.04	2.99 ±0.02	2.98 ±0.06	0.58
CS Asymmetry by spasms	43	69.4 ±3.26	69.4 ±2.43	69.5 ±4.23	0.96
CS Overactivity (spasms + contracture)	43	2.67 ±0.17	2.70 ±0.12	2.63 ±0.22	0.21
CS Motor strength	46	1.77 ±0.29	1.76 ±0.28	1.79 ±0.32	0.73
CS Number of syncinetic muscles	46	3.79 ±1.11	4.00 ±1.01	3.51 ±1.20	0.15
CS Intensity of synkinesis	46	1.61 ±0.24	1.60 ±0.17	1.62 ±0.32	0.83

¹Median [25%;75%]; n (%); Mean ±SD²Wilcoxon rank sum test; Pearson's Chi-squared test; Welch Two Sample t-test

Créteil Scale (CS)

1) MOTOR STRENGTH SCORES upon MAXIMAL VOLUNTARY MOVEMENT and associated SYNKINESIS RATING SCORES

Motor strength: Twelve cervico-facial muscles are tested, with the help of the examiner's mime. Each test should involve three consecutive bilateral efforts, each lasting at least three seconds, with a pause of at least one second between each effort. The **synkinesis** associated with each voluntary effort is rated according to the same ordinal system. The patient is asked to go **as far as possible** during each effort.

- **Frontalis** : 'Raise your eyebrows as high as possible'
- **Corrugator**: 'Frown hard'
- **Procerus**: 'Squint hard between your eyes' or 'It smells very bad'
- **Orbicularis oculi**: 'Close your eyes as tightly as possible'
- **Levator nasolabialis**: 'Detect a smell' » 'Frown the nose'
- **Zygomaticus major**: 'Smile as far as possible, showing all top teeth'
- **Risorius** : 'Mark a dimple on both sides of the mouth'
- **Buccinator**: 'Tuck your cheeks in hard'
- **Orbicularis oris**: 'Inflate your cheeks hard, preventing air from coming out'
- **Depressor anguli oris**: 'Bring the corners of your mouth down and out'
- **Mentalis**: 'Turn out your lower lip'
- **Platysma** : 'Protrude your neck muscles'

For each muscle, rating from 0 to 3 - Total score EC = /36; Average score /3

0 = definite absence of muscle contraction

0.5 = uncertain subcutaneous quivering

1 = definite subcutaneous quivering (visible movement but without displacement)

1.3 = displacement < 1/3 of expected amplitude

1.7 = displacement between 1/3 and 2/3 of expected amplitude

2 = displacement > 2/3 of expected amplitude but far from complete

2.3 = almost full range of motion

2.7 = movement apparently complete but small persistent asymmetry

3 = normal motor strength: no difference with healthy side

Specific recommendations for the following muscle groups:

Orbicularis oculi:

2.3 = total eyelid occlusion but of light or moderate strength: **well-protruding eyelashes** (Souques' sign)

2.7 = complete palpebral occlusion of good strength but not identical to healthy side: **eyelashes almost disappeared**

Zygomaticus major: assess upper lip only

1.3 = displacement uncovering part of front tooth only - canine not visible

1.7 = displacement uncovering beginning of canine

2 = displacement uncovering canine - premolar not visible

2.3 = displacement partially uncovering premolars

2.7 = displacement completely uncovering the premolars but wrinkles still asymmetrical

Orbicularis oris:

1.3 = partial lip closure - air still clearly escapes

1.7 = good lip closure but persistent air escape

2 = no air escape but no cheek swelling

2.3 = no air escape - minimal cheek swelling

2.7 = no air escape - frank but incomplete cheek inflating

2) **ASYMMETRY SCORES BY PARESIS, CONTRACTURE, AND SPASM FREQUENCY AT REST**

Based on a 30-second video-recording performed from the front, with patient seated with face as relaxed as possible (blinking allowed): the following three neuromuscular components of peripheral facial paresis are evaluated:

- **Paresis and contracture:** Twelve cervico-facial regions related to the 12 underlying muscles are tested. Symmetry is analyzed by taking into account the degree of motor weakness and/or contracture of each region in relation to the contralateral healthy side according to the following scoring system:

For each muscle, score from 0 to 3 - Total score EC = /36; mean score /3. Half points are accepted.
3 = perfect symmetry
2 = mild asymmetry
1 = clear asymmetry
0 = Major Asymmetry

- **Spasm frequency:** Twelve cervicofacial regions related to the 12 underlying muscles are tested. The number and location of spasms on the parietic hemiface is rated according to the following scoring system:

For each muscle, rating from 0 to 3 - Total score EC = /36; Average score/3
3 = no spasm
2.5 = between 1 and 5 spasms/30 sec
2 = between 6 and 10 spasms/30 sec
1.5 = between 11 and 15 spasms/30 sec
1 = between 16 and 20 spasms/30 sec
0.5 = between 21 and 25 spasms/30 sec
0 = > 25 spasms/30 sec

3) **ASYMMETRY SCORES BY PARESIS, CONTRACTURE AND SPASM IN CONVERSATION**

Based on a 30-second video-recording performed from the front, patient seated during an open conversation. The patient is asked a question just before the video begins. During the conversation he examiner will try to ask a funny question elicit a spontaneous smile. Same scoring system as at rest.

4) **CS EVALUATION GRID**

All rated scores are reported in the evaluation grid reported on the next page.

Créteil Scale											
Muscles	<i>At rest (30 secondes)</i>			<i>At conversation (30 secondes)</i>			At voluntary movement of maximal amplitude				
	ASYMMETRY SCORES (by)						MOTOR STRENGTH SCORE		SCORES OF SYNKINESIS		
	Paresis	Contracture	Spasm	Paresis	Contracture	Spasm	Right	Left	Number os synkinetic muscles	Synkinetic muscles (names)	Intensity of synkinesis
FRONTALIS											
CORRUGATOR											
PRO CERUS											
ORBICULARIS OCULI											
LEVATOR NASOLABIALIS											
ZYGOMATICUS MAJOR											
RISOR IUS											
BUCCINATOR											
ORBICULARIS ORIS											
DEPRESSOR ANGULIS ORIS											
MENTALIS											
PLATYSMA											
MEAN SCORES											

POSTER POUR LES JOURNEES DE L'ED SVS 2023



Objective quantification of facial muscle groups through a 3D helmet motion capture A normative database of facial motor function

Marjolaine BAUDE^{1,2}, MD, Marina GUIHARD¹, PhD, Pierre-André NATELLA³, MD, Etienne AUDUREAU^{3,4}, MD, PhD, Jean-Michel GRACIES^{1,2}, MD, PhD
 1 BIOTN laboratory, research unit 7377, Paris Est Créteil University, Créteil, France; 2 Rehabilitation Unit of Henri Mondor Hospitals, AP-HP, Créteil, France; 3 Public Health Unit of Henri Mondor Hospitals, AP-HP, Créteil, France; 4 Clinical Research Unit of Henri Mondor Hospitals, AP-HP, Créteil, France.

Background: There is to date no normative database to know the facial displacements due to contraction of facial muscles in an objective way. We aim to develop a procedure using a new tridimensional motion capture device. We tracked ten facial muscle group displacements from rest to maximal contraction.

Objectives:
 For 10 facial muscle groups, frontalis, corrugator, procerus, orbicularis oculi, canine, zygomaticus, buccinators, orbicularis oris, depressor anguli oris and mentalis, the aims of the study were as follows:

- To validate the marker placement protocol through:
 - interrater reliability of the reference NO placement (5 raters, 1 subject);
 - test-retest reliability of marker positioning (1 rater, 53 subjects).

To quantify the displacement of each marker from rest to maximal facial contraction. Beside the clinical markers of interest, primary, secondary and tertiary markers of interest were to be identified for some important facial muscle groups.

To quantify facial symmetry through asymmetry and Procruste indices.

To evaluate acceptability (time allocated to each step) and tolerance (adverse effects).

Methods:
 Preliminary phase of the VISAGE trial (PHRC). 53 adults free from facial nerve injury (27 women; age 43±14) were included from January to February 2021. Two 3D analyses of the face were performed on each participant one week apart (n=106), using *Cara™ helmet* (VICON).

- Each analysis consisted in five successive steps:
- 1) placement of 25 bi-dimensional markers on the face;
 - 2) positioning of the helmet equipped with four cameras;
 - 3) data acquisition (*Caralife™ software*):
 - a 10-second period of rest
 - voluntary maximal contraction of 10 facial muscle groups;
 - 4) data conversion (*Carapost™ software*);
 - 5) data processing (*Matlab™ software*).



Facial muscle groups anatomy
 From Jean-Pierre Alessi of Anatomie Tournis Editions, 2002



Proposed geometric model of the face using 27 two-mm bidimensional markers



Marker positioning of 27 two-mm bidimensional markers on the face



Subject equipped with the *Cara™ helmet* (VICON). Each camera records a frame of the face. The markers on the helmet represent the reference mark.

Results and Discussion:
 Test-retest reliability of each marker positioning was quantified by the 3D error modules between the two evaluations: mean total error = 2.6±0.6 mm, close to marker diameter (2 mm).

Interrater reliability of NO positioning was 0.7±0.2 mm, well below the marker diameter.

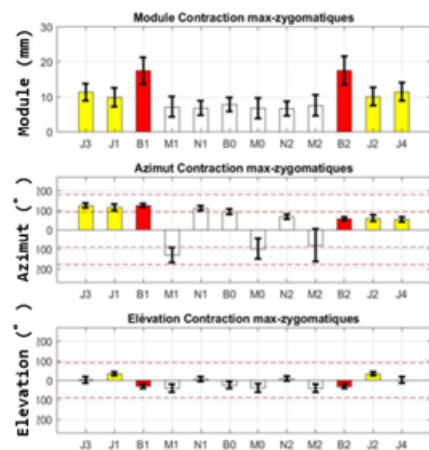
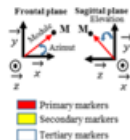
Concerning zygomaticus, we defined two primary (B1, B2) and four secondary (J1, J2, J3, J4) markers. Per marker, mean modules ± SD (mm) were respectively: 17.5±4.2, 17.6±4.4, 9.9±2.8, 10.1±2.9, 11.4±2.6 and 11.6±2.7.

Mean variations were similar for each side of the face. SD was essentially the reflection of the diversity of motion through the studied population.

The duration of the entire procedure was 70±18 min. It felt down to 53±7 min on the last analyses. Only two minor short-lived adverse effects were reported (mild headaches in subjects with a history of migraine).

Conclusions:
 This well-tolerated procedure allowed to quantify facial positions and movements and their asymmetry objectively and accurately during both rest and ten maximal facial motions through specific indices.

Its applicability and validation on 82 patients with peripheral facial paresis will be the next challenge through VISAGE randomized controlled trial.



Reference: Guihard M, Gracies JM, Baude M. Three-Dimensional Quantification of Facial Morphology and Movements Using a Wearable Helmet. *Biomed Res Int.* 2022 Feb 23;2022:2774713. doi: 10.1155/2022/2774713. PMID: 35252441; PMCID: PMC8890869.

