



**HAL**  
open science

# Plasticité cérébrale et récupération fonctionnelle après réimplantation d'un bras chez l'adolescent dans un contexte d'amputation traumatique : étapes clés

Pia Wattinne

## ► To cite this version:

Pia Wattinne. Plasticité cérébrale et récupération fonctionnelle après réimplantation d'un bras chez l'adolescent dans un contexte d'amputation traumatique : étapes clés. Médecine humaine et pathologie. 2020. dumas-03187039

**HAL Id: dumas-03187039**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03187039>**

Submitted on 31 Mar 2021

**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.

Université de Picardie Jules Verne

UFR de Médecine d'Amiens

Année universitaire 2019 – 2020

Thèse numéro 2020 - 190

**THESE**

**PLASTICITE CEREBRALE ET RECUPERATION FONCTIONNELLE APRES  
REIMPLANTATION D'UN MEMBRE SUPERIEUR CHEZ L'ADOLESCENT DANS  
UN CONTEXTE D'AMPUTATION TRAUMATIQUE : ETAPES CLES.**

Présentée et soutenue publiquement le 13 Novembre 2020

Par **Pia WATTINNE**

En vue de l'obtention du

**Diplôme d'Etat de Docteur en Médecine**

**Spécialité : Médecine Physique et de Réadaptation**

Devant le Jury composé de :

Monsieur le Professeur Pierre-Louis DOUTRELLOT	Président de Jury
Monsieur le Professeur Fabrice WALLOIS	Rapporteur
Monsieur le Professeur Richard GOURON	Rapporteur
Monsieur le Docteur Olivier BALEDENT	Rapporteur
Madame le Docteur Céline KLEIN	Rapporteur
Madame le Docteur Séverine FRITOT	Directrice de Thèse



**A Monsieur le Professeur Pierre-Louis DOUTRELOT**

Professeur des Universités-Praticien Hospitalier

(Médecine Physique et de Réadaptation)

Centre d'Activité MPR Neurologique

Pôle "Autonomie"

Je vous remercie de me faire l'honneur de présider ce Jury et de juger mon travail.

Je vous exprime ma profonde gratitude pour votre accompagnement au cours de l'internat et votre disponibilité. Merci pour le temps que vous m'avez accordé tout au long de mon cursus, pour les connaissances que vous m'avez permis d'acquérir et pour votre humour impérissable. Veuillez recevoir le témoignage de ma reconnaissance et de mon profond respect.



**A Monsieur le Professeur Fabrice WALLOIS**

Professeur des Universités-Praticien Hospitalier

(Physiologie)

Responsable du Groupe de Recherches sur l'Analyse Multimodale de la Fonction Cérébrale

Chef du Service d'Explorations Fonctionnelles du Système Nerveux Pédiatrique

Chevalier dans l'Ordre des Palmes Académiques

Officier dans l'Ordre National de la Légion d'Honneur

Je vous remercie de me faire l'honneur d'être membre de mon Jury.

Je vous prie de recevoir mes sincères remerciements pour avoir accepté de juger mon travail.

Veillez croire en mon profond respect et ma sincère gratitude.



**A Monsieur le Professeur Richard GOURON**

Professeur des Universités – Praticien Hospitalier

Chef de service de Chirurgie de l'Enfant

(Chirurgie infantile)

Vous me faites l'honneur d'apporter votre expérience à la critique de ce travail, en siégeant dans mon Jury de thèse. Je vous remercie pour tout ce que vous m'avez appris au cours des stages de Chirurgie Orthopédique Pédiatrique.

Veillez trouver ici l'expression de mes sincères remerciements et de ma gratitude.





**A Monsieur le Docteur Olivier BALEDENT**

Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier

Responsable de l'unité de traitement de l'image médicale du CHU d'Amiens

Merci de me faire l'honneur d'être membre de ce Jury, et de critiquer mon travail de thèse.

Je te suis très reconnaissante de l'intérêt et de l'investissement dont tu as fait preuve dans ce projet. J'ai beaucoup appris.

Merci Olivier pour tes précieux conseils et ton humour (piquant).



**A Madame le Docteur Céline KLEIN**

Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier  
Chirurgie infantile

Je te remercie de me faire l'honneur d'être membre de ce Jury.

Merci Céline de m'avoir accompagnée tout au long de ce projet. Je te suis très reconnaissante pour le soutien et l'aide avisée que tu m'as apportée.

Cela a été un plaisir de travailler avec toi.



**A Madame le Docteur Séverine FRITOT**

Praticien Hospitalier

Chef du service de Médecine Physique et de Réadaptation Pédiatrique

Pôle « Femme-Couple-Enfant »

Les mots me manquent pour vous exprimer mon respect et ma gratitude.

Merci pour votre soutien infaillible, votre bienveillance et votre sincère gentillesse dont vous avez toujours fait preuve à mon égard.

J'admire votre optimisme et votre détermination.

Je vous suis extrêmement reconnaissante de m'avoir accompagnée et encouragée, toujours dans la bonne humeur, dans ce projet qui me tenait à cœur.

Apprendre à vos côtés est une chance mais aussi une fierté.

C'est un réel honneur pour moi de continuer à me former à vos côtés.



*A mon père*, parti trop tôt mais finalement jamais très loin... A toi qui m'as toujours soutenu, et qui me soutient encore. La vie n'est pas un long fleuve tranquille Papa.

*A ma mère*, force est de reconnaître que la plaie des devoirs scolaires a rendu ses fruits. A toi qui n'as ménagé aucun effort pour que je puisse avancer. C'est grâce à toi que je suis là aujourd'hui, merci pour tout Maman. Ta force mentale, ton courage et ta combativité m'inspirent tous les jours.

*A mon beau-père*, le meilleur du monde. Merci Manu pour ta sagesse, ta bienveillance et ton sens de l'équité. Nous serons toujours là pour toi.

*A ma grande sœur Amé*, ma moitié, mon pilier. A ton cœur sur la main, ta tolérance et ton ouverture d'esprit. Je sais que tu seras toujours là pour m'écouter et me comprendre.

*A mon grand frère Alex*. A ton grand cœur et à ta générosité. Merci de m'avoir toujours protégé. J'ai de la chance de t'avoir.

*A ma nièce et filleule préférée, Nanthilde. A mes neveux d'amour Jules, Arthur et Robin. A ma belle-sœur, Céline, et mon beau-frère Séb. A Mamina*, qui me conduisait à l'école après son irish coffee. *A Bonne-Mam* et ses bonbons. *A Thomas, Quentin, Valérie et Victoire*.

*A mon parrain, Dominique*. Merci pour ta présence et ton affection depuis toujours. Merci de m'avoir poussé vers le haut, de m'avoir accompagné et guidé à chaque étape importante. Merci de m'avoir accueilli les bras ouverts avec Anne dans votre famille.

*A Margaux*, mon amie d'enfance. Merci pour ton écoute, ton empathie et tes valeurs humaines qui font de toi une personne unique. Je n'imagine pas avancer sans toi.

*A Agathe*, mon acolyte. La gentillesse et la bonté qui te qualifient sont des valeurs inestimables. Merci pour tes blagues sans faim. A nos mille souvenirs du moins dangereux au plus dangereux... A nos bêtises... Merci d'être là.

*A Eva*, mon fr. A ta présence infailible (et légendaire). A toi qui m'as empêché de couler et qui m'a poussé vers le haut. Merci de m'avoir emmené sur le bon chemin. A ton indescriptible humour de libanaise.

*A mes autres amies pour la vie, les Chicas*. De la plus naine à la moins naine, le débat est lancé : Chacha, Pao, Cha, Gus, Clém, Nono, Vic, Cam, Nana, Dep, Bigo. Vous êtes si drôles !!!! et si humaines ...

*Aux yolos gorgous*, Lolo (rien n'est jamais vraiment si grave), Kimi, Six (rien n'est grave tout court), Djij, Cass, Bertoche, Raph, mon Compatriote, Bodiou, Loucho, Kiki, Flo, Pierro, Justin.

*A mes amis rencontrés pendant mon internat et à toutes nos dingeries*, Manon, Lolo, Sarah, Guigui, Flo, Jojo la grande frite, Chloé, Bouletsteix, banjour Marie, Zaza, Titi, Riadh, Marie de



Paris, Caro, Hugo et Hélène. Enfin, à mes colocos préférés : Quentin et Renaud, qui tolèrent mes peurs (de tout) et mes boîtes d'œufs.

*A mes cointernes de MPR et autres sp  s, qui ont rendus mes stages inoubliables, Chacha Yaya, Manila, Carole, Souf, Clara, Hadiya, Hélène, Nat, Mimi cragra, Akra, Capu, Camille, et Arnaud. Une mention particulière pour toi Laure, qui a frôlé l'impensable : fais attention à toi, bon rétablissement.*

*A l'équipe de MPR Pédiatrique, formidable. Quelle cohésion, quelle entraide. Vous êtes pour moi une vraie famille. Merci à toi Marc de me supporter (et merci à moi de te supporter). Merci Charlotte la victos.*

*Aux médecins chefs de MPR, Charline femme exceptionnelle, Thibaud l'humouriste et Quentin le mangeur : merci à vous. Je remercie le Docteur Arzt, le Docteur Bats, Sophie et Marie qui m'ont toutes beaucoup appris. Merci    Sophie l'intendante et Elo.*

*A l'équipe de Neurologie du CH de Compiègne. Quelle merveilleuse année. Je n'en garde que d'excellents souvenirs. A vous Madame Pol que j'admire tant, empreinte d'empathie, d'humour et de justesse.*

*Au Docteur Adriane Mage, je vous remercie de m'avoir autorisée à utiliser vos données opératoires nécessaires à mon travail*

*Au Docteur Serge Metanbou, je vous remercie d'avoir écoulé mon projet et de vous être rendu disponible.*

*A Monsieur Sidy Fall, merci pour ta patience infinie, ta gentillesse et le partage de tes connaissances. Sans toi Sidy, ce travail n'aurait jamais abouti.*

*Aux manipulateurs/manipulatrices radiologiques de l'Institut Faire Faces.*

*Au Docteur Laura Leturque, je vous remercie de l'intérêt porté à mon projet. Merci pour votre aide, et pour les réponses à toutes mes questions.*





<b>I.</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>21</b>
1)	<i>Généralités.....</i>	21
2)	<i>Connaissances actuelles sur les réimplantations de membres en pédiatrie.....</i>	22
3)	<i>Rappels anatomiques des cortex moteur et somatosensoriel.....</i>	23
4)	<i>Neuroplasticité : définition et concepts.....</i>	25
5)	<i>Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf).....</i>	26
6)	<i>Justificatifs de l'étude.....</i>	28
7)	<i>Hypothèses de travail et critères de jugement .....</i>	29
<b>II.</b>	<b>POPULATION, MATERIELS ET METHODES .....</b>	<b>29</b>
1)	<i>Anamnèse et contexte traumatique du patient .....</i>	29
2)	<i>Prise en charge thérapeutique initiale.....</i>	30
3)	<i>Facteurs de récupération clinique .....</i>	31
3.1	<i>Limitation des douleurs.....</i>	31
3.2	<i>Etat cutané-trophique.....</i>	33
3.3	<i>Amplitudes articulaires .....</i>	34
3.4	<i>Rééducation sensitive.....</i>	34
3.5	<i>Rééducation motrice et réveil neuromusculaire.....</i>	35
3.6	<i>Facteurs de réadaptation, limitations des restrictions de participation .....</i>	37
3.7	<i>Retentissement psychoaffectif .....</i>	38
4)	<i>Intérêt de l'électrophysiologie dans l'étude de la régénération axonale .....</i>	39
5)	<i>IRM fonctionnelle d'activation .....</i>	41
4.1	<i>Acquisitions des images .....</i>	41
4.2	<i>Stimuli et paradigmes expérimentaux .....</i>	42
4.3	<i>Analyses des données.....</i>	44
6)	<i>Ethique .....</i>	45
<b>III.</b>	<b>RESULTATS .....</b>	<b>46</b>
1)	<i>Evolution clinique .....</i>	46
2)	<i>Sur le plan électrophysiologique.....</i>	49
3)	<i>Cartographies d'activations cérébrales.....</i>	50
2.1	<i>Mouvement de flexion et extension du bras.....</i>	50
2.1.1	<i>Résultats du patient .....</i>	50
2.1.2	<i>Résultats du sujet sain .....</i>	52
2.2	<i>Mouvement d'ouverture et de fermeture des doigts.....</i>	52
2.2.1	<i>Résultats du patient .....</i>	52
2.2.2	<i>Résultats du sujet sain.....</i>	54
2.3	<i>Mouvement séquentiel des doigts ou finger-tapping .....</i>	55
2.3.1	<i>Résultats du patient.....</i>	55
2.3.2	<i>Résultats du sujet sain.....</i>	56
2.4	<i>Stimulation sensitive du pouce .....</i>	57
2.4.1	<i>Résultats du patient.....</i>	57
2.4.2	<i>Résultats du sujet sain.....</i>	57
2.5	<i>Stimulation sensitive de l'index et du majeur.....</i>	58
2.5.1	<i>Résultats du patient.....</i>	58
2.5.2	<i>Résultats du sujet sain.....</i>	59
4)	<i>Bilan fonctionnel et qualité de vie .....</i>	59
<b>IV.</b>	<b>DISCUSSION.....</b>	<b>61</b>
1)	<i>Récupération fonctionnelle et limitation des restrictions de participation.....</i>	61
2)	<i>Plasticité cérébrale intra-hémisphérique .....</i>	64
3)	<i>Plasticité cérébrale interhémisphérique .....</i>	66
4)	<i>Limites de l'étude .....</i>	68
<b>V.</b>	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>69</b>
<b>VI.</b>	<b>BIBLIOGRAPHIES .....</b>	<b>71</b>
<b>VII.</b>	<b>ANNEXES .....</b>	<b>77</b>

## ABREVIATIONS

SNC : système nerveux central

SNP : système nerveux périphérique

IRMf : imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

BOLD : Blood Oxygen Level Dependant

AVC : accident vasculaire cérébral

CA de MPR : Centre d'Activités Médecine Physique et de Réadaptation

M1 : cortex moteur primaire

M2 : cortex moteur secondaire

APM : aire prémotrice

AMS : aire motrice supplémentaire

S1 : cortex somesthésique primaire

S2 : cortex somesthésique secondaire

PLT : potentialisation à long terme

SMUR : service mobile d'urgence et de réanimation

CHU : centre hospitalier universitaire

EVS : échelle verbale simple

MCP : métacarpophalangienne

IPP et IPD : interphalangienne proximale et distal

NM : neurone miroir

IM : imagerie mentale

PES : potentiels évoqués somesthésiques

EMG : électromyogramme

PUM : potentiels unités motrices

CHEQ : Children's Hand-use Experience Questionnaire

AVQ : activités de la vie quotidienne

## I. INTRODUCTION

### 1) Généralités

En 1962 à Boston, Ronald Malt et son équipe réussissaient la première réimplantation de membre supérieur chez un enfant âgé de 6 ans après amputation complète traumatique [1,2]. Cette technique de réimplantation garde un côté spectaculaire car assez rare et peu d'équipes se sont lancées dans cet enjeu. Peu d'informations sont retrouvées dans la littérature relative à l'épidémiologie des amputations traumatiques de l'enfant -tout membre confondu-, avec un taux très variable allant de 2 à 18,8% selon les études [3,4]. Les caractéristiques sur les amputations que nous allons décrire concernent essentiellement la population pédiatrique. L'amputation d'un membre supérieur touche en majorité les doigts et les pouces, à l'inverse de l'avant-bras ou du bras [5,6]. Le mécanisme lésionnel impliqué dans les amputations de membre supérieur diffère selon l'âge : les accidents de la voie publique, les machines et outils électriques (scie, tondeuse à gazon) prédominent chez les adolescents. Chez les plus jeunes (5 – 10 ans), les mécanismes lésionnels en cause sont les doigts coincés entre des objets (portes) ou l'utilisation d'objets tranchants [4]. La disparité des sexes augmente avec l'âge où on retrouve une nette prédominance masculine. Les comorbidités telles que l'abus d'alcool, les troubles psychiatriques et psychoaffectifs sont plus souvent retrouvées chez les adolescents ou jeunes adultes.

Le taux estimé de réussite pour la survie d'un membre réimplanté varie entre 42 et 88 % chez l'enfant [7,8]. Les données de la littérature renseignent surtout sur les réimplantations de doigts, relatives à la prévalence de leurs atteintes dans les amputations traumatiques. Dans les publications antérieures, des informations sont surtout retrouvées à partir des services de Chirurgie de l'Enfant. Les objectifs dans ces unités de chirurgie sont ciblés sur la survie du membre greffé, ainsi que sur la récupération articulaire, musculaire et neurologique. En Médecine Physique et de Réadaptation, les programmes de rééducation actuels sont basés sur des objectifs dépendants de la loi de 2005 sur le handicap dont les principes sont de lever les restrictions de participation à la vie en société. Le but est de favoriser l'autonomie des jeunes en limitant les incapacités fonctionnelles pour la réadaptation au sein de la famille, aux différents loisirs, à l'école, aux activités de vie quotidienne tout en se libérant du choc traumatique.

La récupération fonctionnelle s'articule autour de différents facteurs : une reconstruction chirurgicale par des équipes expérimentées, un programme médico-rééducatif pluridisciplinaire soutenu et prolongé sans oublier l'adhésion du patient et aussi de son entourage au projet thérapeutique. Celui-ci doit avoir avant tout du sens pour l'enfant avant le sens qu'un professionnel de santé peut lui attribuer, car l'adhésion de l'enfant à son programme est le garant du succès de la rééducation/réadaptation. L'amputation d'un membre a un impact sur le plan physique, psychologique, financier mais aussi sociétal [9,10]. Cela engendrera des hospitalisations répétées et prolongées, des contraintes et aménagements familiaux et du domicile, un éloignement social, des absentéismes scolaires et un stress psychologique. Les conséquences sont similaires pour la réimplantation d'un membre avec cependant, d'autres éléments qui sont eux aussi essentiels dans la récupération : le gain esthétique et surtout fonctionnel de cet acte médico-chirurgical de réimplantation. Chez les enfants, les blessures par amputation ont un impact considérable sur le développement psychosocial, l'indépendance et l'image corporelle, mais cela dépend évidemment du contexte traumatique et de leur milieu culturel et socio-environnemental.

## ***2) Connaissances actuelles sur les réimplantations de membres en pédiatrie***

Actuellement, il n'existe pas de consensus sur la décision de réimplantation de membre après amputation traumatique chez l'enfant et l'adolescent. Cela reste une décision pluridisciplinaire médico-chirurgicale. Les indications de réimplantation dans cette population pédiatrique semblent plus favorables, comparées à chez l'adulte devant une limitation des complications et de meilleurs résultats sur le plan fonctionnel. Ceci reste valable tant pour des lésions proximales que distales du membre supérieur [11–13].

La survie du membre après réimplantation doit son succès au rétablissement d'une perméabilité vasculaire satisfaisante, garante de la viabilité des tissus mous et limitant ainsi le risque d'infection, d'ischémie aiguë (thromboses et spasmes vasculaires) voire d'amputation définitive. Les infections des tissus mous, dépendante elle-même du mécanisme lésionnel initial, sont la conséquence de tissus dévitalisés. Le débridage des plaies avec préservation des tissus sains dès la prise en charge chirurgicale initiale est primordial [14,15]. Une amputation par lacération est de meilleur pronostic que par arrachement ou écrasement [16,17]. Le niveau lésionnel est un autre facteur pronostic pour la survie du membre réimplanté. En effet, on distingue l'amputation traumatique dite « majeure » de celle dite « mineure » : une amputation au-dessus du poignet est considérée comme majeure (poignet compris). Une amputation distale ne touche pas ou très peu les muscles squelettiques puisque la main et les doigts sont surtout

composés de tendons, alors que l'avant-bras et le bras sont essentiellement composés de muscles. Le tissu musculaire étant très sensible à l'ischémie, les complications métaboliques qui en découlent sont nombreuses [17]. Il existe une corrélation entre la durée de l'ischémie et l'intensité des lésions musculaires. Les données de la littérature fixent classiquement le délai de période d'ischémie à 6 heures, au-delà desquelles les lésions deviennent irréversibles. Avant 6 heures, le membre reste en phase chaude (correspondant à la phase de circulation efficace) permettant d'éviter des lésions musculaires irréversibles [18]. Certains auteurs décrivent déjà des lésions cellulaires musculaires irréversibles dès 4 heures d'ischémie [19]. Enfin, l'état vasculaire le plus souvent sain chez l'enfant est un avantage, bien que le calibre des vaisseaux soit plus petit et donc contraint à des techniques de microchirurgie plus pointues [20].

Un traumatisme par atteinte des nerfs périphériques entraîne une perte de fonction motrice et sensitive de la partie du corps correspondante. La section d'un tronc nerveux entraîne des phénomènes histologiques de dégénérescence sur la partie distale de la lésion (dégénérescence Wallérienne). La récupération fonctionnelle après une lésion nerveuse périphérique dépend de la réinnervation des cibles dénervées, phénomène sous-tendu par les capacités de régénérations axonales et du développement de collatérales d'axones intacts. Ces événements sont considérés plus rapides et efficaces dans la population pédiatrique [21]. La vitesse de repousse nerveuse est de 1 à 2 mm par jour [22]. Cela n'est pas suffisant, la réinnervation des organes cibles ne conduit pas toujours à une récupération des fonctions motrices et sensorielle, particulièrement si la repousse nerveuse ne cible pas son organe correspondant. Cette spécificité de réinnervation est indépendante des techniques de réparation chirurgicale. Les deux systèmes nerveux (périphérique (SNP) et central (SNC)) sont intégrés dans les conséquences d'une lésion nerveuse: en réponse à la rupture de continuité nerveuse, il existe une adaptation et une réorganisation du cortex cérébral, sous-tendues par les phénomènes de neuroplasticité [23,24]. C'est sur cette dernière notion que nous axerons notre travail.

### ***3) Rappels anatomiques des cortex moteur et somatosensoriel***

Avant de parler de neuroplasticité, il semble important de rappeler l'anatomie des cortex moteur et somatosensoriel. Le cortex moteur primaire (M1) est situé dans le lobe frontal, c'est l'aire 4 de Brodmann (ou gyrus précentral), limitée en avant par le sillon précentral et le sillon central en arrière. Il est impliqué dans la réalisation propre du mouvement [25]. Le cortex moteur secondaire (M2) ou prémoteur correspond à l'aire 6 de Brodmann, il est six fois plus grand que M1 [26]. Il se compose de l'aire prémotrice (APM) située dans la partie latérale de l'aire 6 (contrôle de la musculature axiale) et l'aire motrice supplémentaire (AMS) située dans



la partie médiane de l'aire 6 (planification de mouvements complexes et coordination bimanuelle) ([figure 1](#)). D'autres structures sont impliquées dans l'organisation séquentielle d'un mouvement : le cortex préfrontal pour l'intentionnalité et la prise de décision et le cortex pariétal postérieur (aire 5 et 7 de Brodmann) pour la coordination des mouvements et l'attention visuo-spatiale. Actuellement, une nouvelle notion est mise en avant. L'aire motrice M1 serait divisée en deux régions distinctes : une région rostrale ou « ancienne M1 » et une région caudale ou « nouvelle M1 » présentes chez certains primates et les humains [27]. Cette dernière est impliquée dans la génération de mouvements plus complexes grâce aux cortico-motoneurones, qui ont directement accès aux motoneurones  $\gamma$  de la corne antérieure de la moelle, sans passer par les relais de la moelle épinière. La dextérité fine serait en partie expliquée par cette dichotomie [28]. Le cortex somesthésique primaire (S1) se situe dans le lobe pariétal, au niveau du gyrus postcentral et se compose de 4 aires : les aires 3 (3a et 3b), 1 et 2 de Brodmann. Il traite les informations tactiles et proprioceptives controlatérales. Le cortex somesthésique secondaire (S2) est situé latéralement et en dessous de S1. Il reçoit des projections de S1 et se projette sur le cortex limbique : l'hippocampe est impliqué dans l'apprentissage et la mémorisation des sensations tactiles, alors que l'amygdale évalue la valeur émotionnelle de l'information sensorielle. Ces différentes aires s'organisent selon une somatotopie fonctionnelle : chacune des régions de ces aires (motrices ou somesthésiques) représentent un territoire corporel, l'ensemble se nomme homonculus de Penfield ([figure 2](#)). Il existe cependant une variabilité interindividuelle dans les représentations du cortex somatosensoriel [29]. La surface d'une représentation corticale d'une structure corporelle se définit par son degré d'innervation sensorielle [30] : la face et la main (surtout le pouce) sont des zones sur-représentées par rapport au reste du corps, signe indirect que le cerveau humain augmente ces projections corticales afin d'augmenter les capacités discriminatives pour ces régions.

[Figure 1](#) : organisation du cortex somatosensoriel chez l'Homme

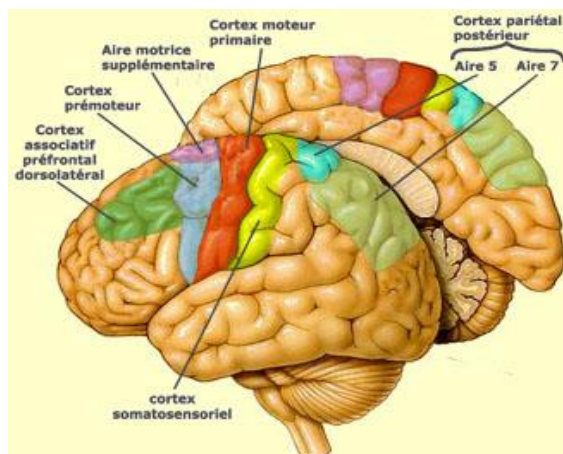
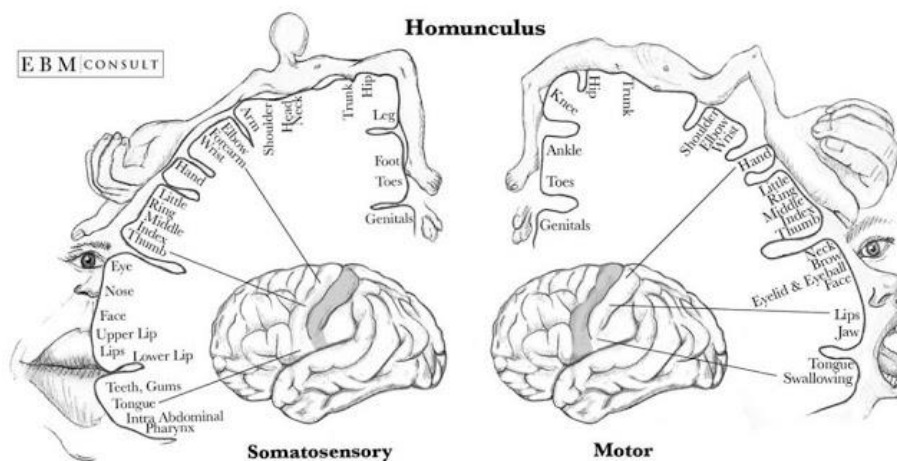


Figure 2 : Homunculus de Penfield sensitif (à gauche) et moteur (à droite)



#### 4) Plasticité cérébrale, définition et concepts

La plasticité cérébrale ou neuroplasticité fait référence aux capacités du système nerveux central de modifier sa structure et sa fonction en réponse à une expérience (positive ou négative) et de s'y adapter [31]. C'est un processus dynamique, qui dure tout au long de la vie d'un individu [32]. Il est possible de distinguer plusieurs types de neuroplasticité [33]:

- La plasticité développementale, qui concerne principalement l'ontogénèse. Dans ce cas, le cerveau présente une période critique avec une grande sensibilité aux influences environnementales. Des défauts dans ce processus sont aussi à l'origine des troubles neurodéveloppementaux.
- La plasticité comportementale adulte (ou post-développementale) avec la notion de vicariance (capacité d'une zone du SNC à prendre en charge, partiellement ou totalement, une fonction habituellement assurée par une zone adjacente qui a été lésée) et de suppléance (malgré une asymétrie fonctionnelle physiologique des deux hémisphères cérébraux, il est possible que l'un des hémisphères « supplémente » l'autre en cas de défaillance d'une fonction).
- La plasticité corticale : elle a lieu à l'âge adulte. La réorganisation corticale est liée à la malléabilité des cortex moteurs et somatosensoriels, en réponse à des phénomènes physiologiques (l'apprentissage, le vieillissement...) ou pathologiques (accidents vasculaires cérébraux, amputation de membre) [34,35].
- La plasticité synaptique englobe les mécanismes intervenant dans la modification de la transmission synaptique au cours du temps. C'est la base cellulaire à l'origine des

phénomènes d'apprentissage et de mémoire. Selon le postulat de Hebb, lorsqu'un neurone participe de façon répétée à l'activation d'un autre neurone, l'efficacité des connexions entre ces neurones est augmentée : c'est la potentialisation à long terme (PLT). A l'échelle cellulaire, ce sont les récepteurs post-synaptiques NMDA qui agissent sur la plasticité synaptique et le neurotransmetteur associé est le glutamate (excitateur). La métaplasticité ou « plasticité de la plasticité » est une forme indirecte de plasticité synaptique, elle traduit les conséquences de la plasticité d'une synapse sur l'activité des synapses voisines [36].

- La plasticité réparatrice : il s'agit principalement de la régénération nerveuse, soutenue par l'auto-réparation (après un traumatisme cérébral ou un accident vasculaire cérébral [37] par exemple), l'hypersensibilité de dénervation et le concept de synapses silencieuses qui est actuellement d'ordre expérimental.

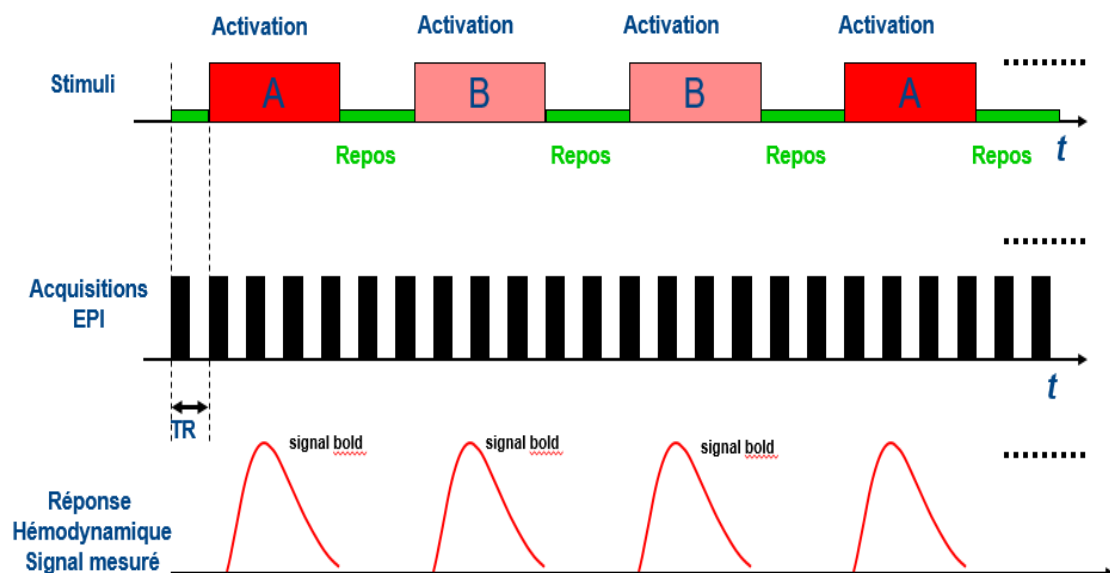
### 5) *Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf)*

L'étude de la réorganisation du cortex cérébral est permise grâce à de nombreuses méthodes d'évaluation [38], dont l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf). C'est une technique non invasive et non irradiante qui étudie l'activité neuronale des aires cérébrales *in vivo* de manière indirecte, car elle s'appuie sur les changements locaux du flux sanguin cérébral. Elle se base sur l'effet « BOLD » (Blood Oxygen Level Depend) [39] qui reflète les variations de la quantité d'oxygène transportée par l'hémoglobine en fonction de l'activité neuronale, et repose sur les propriétés magnétiques de l'hémoglobine qui diffèrent selon sa liaison à l'oxygène. L'hémoglobine est utilisée comme agent de produit de contraste endogène. Selon sa concentration en oxygène, les atomes de Fer présents dans le sang ont un comportement magnétique différent. La désoxyhémoglobine (HHb) dévie le champ magnétique (paramagnétique) et se répercute sur le signal IRM qui est alors modifié localement. L'oxyhémoglobine (HbO<sub>2</sub>) est diamagnétique et ne modifie pas le champ magnétique. La variation du rapport local entre oxyhémoglobine et désoxyhémoglobine est corrélée avec les variations du signal IRM, à l'origine de l'IRM d'activation cérébrale qui est l'une des modalités de la famille des IRM fonctionnelles.

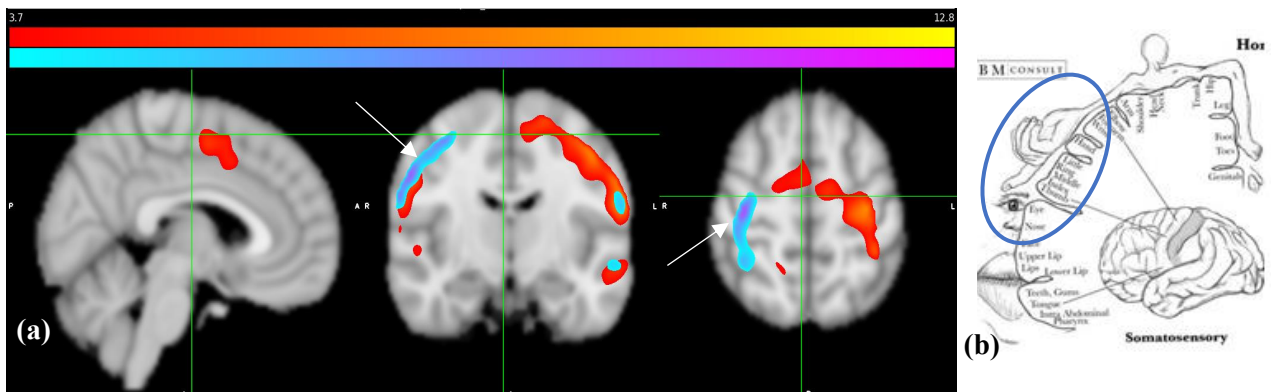
Lors de la réalisation d'une tâche, l'activation cérébrale engendre deux phénomènes : augmentation initiale de la consommation locale en oxygène et donc augmentation de désoxyhémoglobine qui est très transitoire, car en réponse le système vasculaire augmente son débit en apportant finalement plus d'oxygène que la région en question n'en consomme. La

déoxy-hémoglobine se trouve donc diluée et le rapport HbO<sub>2</sub>/HHb augmente. L'ensemble de ces phénomènes se traduit sur les images par une remontée du signal magnétique dans la région qui travaille, avec un délai d'environ 1 seconde et atteint un plateau au bout de 6 secondes en moyenne après l'augmentation d'activité neuronale (figure 3). Cette technique basée sur le couplage neurovasculaire ne donne qu'un reflet indirect du fonctionnement cérébral, elle mesure la différence (très faible) du signal IRM entre un état de repos et un état d'activation. Le signal BOLD qui est une réponse hémodynamique, entraîne une variation d'intensité très faible (environ 2% [40]) du signal IRM. Pour détecter cet effet, il est nécessaire de répéter dans le temps l'effet BOLD en réalisant une succession de périodes alternant des phases de repos et d'activations au cours d'une acquisition continue. Ainsi est défini ce qui est appelé le paradigme. Une séquence EPI (Echo Planar Imaging) est utilisée pour l'acquisition des images fonctionnelles, c'est une méthode rapide d'acquisition où l'ordre de grandeur est de quelques centaines de millisecondes par image et de l'ordre de 2 à 3 secondes par volume cérébral complet, mais avec une résolution spatiale plus limitée qu'en morphologie classique. Après plusieurs étapes de traitements des images et d'analyses statistiques (que nous détaillerons par la suite), des cartographies cérébrales d'activation sont obtenues (Figure 4). Ces cartographies représentent les zones corticales dont le signal IRM au cours de l'acquisition varie de manière synchronisée avec le paradigme.

Figure 3 : paradigme expérimental et signal BOLD. TR = temps de répétition. A et B désignent les différentes tâches effectuées.



**Figure 4 :** (a) cartographies des activations cérébrales associées à une tâche sensitive par stimulation directe sur le 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> rayon de la main droite (rouge-jaune) et de la main gauche (bleu-violet) chez un sujet sain. A gauche image en coupe sagittale, au centre image en coupe frontale et à droite image en coupe axiale. Orientation des images selon la convention radiologique : la gauche de l'image représente la droite du sujet et inversement. Les échelles de couleurs (rouge-jaune et bleu-violet) représentent la probabilité que le signal recueilli soit différent pendant l'effort par rapport au repos (Z-score) ou la probabilité que la zone soit active. Le jaune et le violet représentent une forte probabilité. **La stimulation sensitive des doigts de la main gauche entraîne une activation au niveau du gyrus postcentral controlatéral (aire 3 de Brodmann) indiqué par les flèches blanches.** (b) représentation de la main sur l'homonculus en coupe frontale (cercle bleu).



## 6) Justificatifs de l'étude

Nous avons été confrontés au cas d'un jeune patient de 14 ans hospitalisé dans le Centre d'Activité de MPR Pédiatrique à Amiens, dans les suites de la réimplantation de son bras droit après arrachement traumatique. Dans ce contexte décrit en préambule, nous avons réfléchi sur des programmes de rééducation pluridisciplinaires adéquats en s'intéressant aux facteurs de récupération fonctionnelle. Nous développerons tout au long de ce travail les réflexions prédisposant aux guidages des récupérations, en s'appuyant sur des projets thérapeutiques cohérents et sur les principes fondamentaux de la réadaptation post-traumatique adaptés aux capacités et limites du patient décrites dans cette étude. Par ailleurs, le rôle de la plasticité cérébrale dans la récupération de fonction a déjà été décrite dans de nombreuses pathologies du système nerveux central telles que les AVC [35], où en plus des processus précoces de récupération spontanée, se joue une réorganisation cérébrale impliquant la mise en place de nouveaux réseaux neuronaux. Sur la base de modèles expérimentaux, nous savons qu'une lésion nerveuse périphérique entraîne, au-delà d'une perte de fonction d'un organe cible (sensitive et/ou motrice), une réorganisation rapide des aires somatosensorielles correspondantes [41]. Par ailleurs, il a été démontré qu'une section puis réparation immédiate d'un tronc nerveux entraînait une réactivation des circuits centraux, témoignant de l'intégrité des voies de conduction nerveuses [42]. Mais le phénomène de neuroplasticité impliqué dans la récupération fonctionnelle après atteinte du SNP, plus spécifiquement dans un contexte

d'amputation et de réimplantation de bras chez l'enfant, n'a jamais été décrite dans la littérature à notre connaissance.

### **7) Hypothèse de travail et critères de jugement**

Notre principale hypothèse est que l'apprentissage et l'entraînement, à travers la prise en charge rééducative et réadaptative, en favorisant la neuroplasticité facilitent la récupération fonctionnelle d'un membre supérieur réimplanté. Nous fixerons une évaluation par les données recueillies par le questionnaire CHEQ (Children's Hand-use Experience Questionnaire). Ce test est le critère de jugement principal de la récupération fonctionnelle gestuelle. Sa réalisation a été volontairement fixée à un an du traumatisme. Nous avons opté pour un critère de jugement secondaire sur la qualité de vie, en utilisant le questionnaire KIDSCREEN-52.

## **II. POPULATION, MATERIELS ET METHODES**

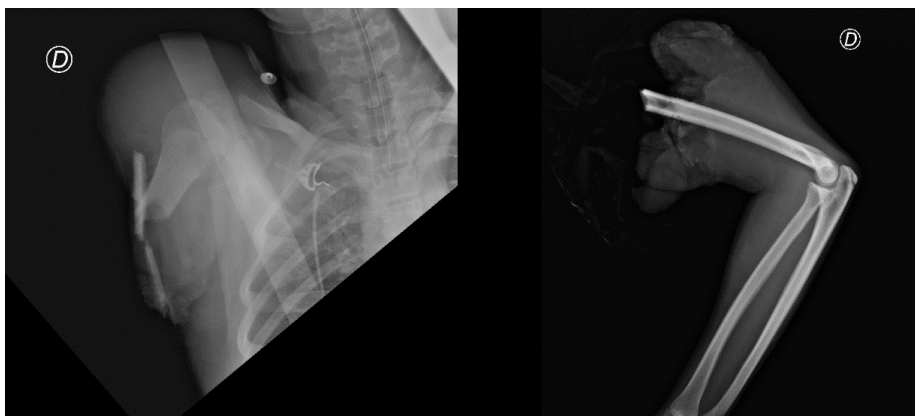
### **1) Anamnèse et contexte traumatique du patient**

Un adolescent âgé de 13 ans au moment du traumatisme a été admis aux Urgences Pédiatriques du CHU d'Amiens le 28 septembre 2019, après avoir été victime d'un accident de buggy sur une voie privée aux alentours de 13h30. Il n'a pas d'antécédents notables, était scolarisé en 3<sup>ème</sup> Générale et pratiquait le polo en compétition. Le bras droit a été amputé de façon traumatique au moment de l'accident au niveau du tiers proximal (membre dominant) par arrachement, et la partie distale a été retrouvée à une vingtaine de mètres du patient. Il n'a pas perdu connaissance et à l'arrivée du SMUR, le score de Glasgow était à 15 avec une hémodynamique stable. Il a rapidement été intubé et sédaté en raison de douleurs intenses, et a reçu une antibioprophylaxie par 2 grammes d'amoxicilline et acide-clavulanique (Augmentin®) associé à un traitement anti fibrinolytique (Exacyl®). Le transfert vers le CHU d'Amiens a été réalisé par hélicoptère, le patient est resté stable sur le plan hémodynamique.

Aux urgences, une radiographie du membre supérieur droit ([Figure 5](#)) et un scanner du corps entier ont été réalisés objectivant une fracture déplacée du tiers médial de la clavicule droite associée à une fracture-arrachement complet de la diaphyse humérale droite. Il n'était pas retrouvé d'anomalies significatives à l'étage cérébral, cervico-thoracique et abdomino-pelvien, hormis une distension gastrique d'allure fonctionnelle pour laquelle une sonde nasogastrique a été mise en place. Le bras droit a été amené dans un sac, avec des poches de glaçons. Après décision collégiale entre l'équipe de Chirurgie Orthopédique Pédiatrique, de Chirurgie

Vasculaire et de Chirurgie de la Main, la tentative de réimplantation a été décidée. Les parents présents ont approuvé la prise en charge, après avoir été informés de l'état lésionnel de leur enfant, de la procédure chirurgicale et des complications potentiels de cette intervention, notamment l'échec et l'amputation complète.

Figure 5 : radiographies de face du bras droit : moignon proximal (à gauche) et distal (à droite)



## 2) *Prise en charge thérapeutique initiale*

Le patient a été pris en charge au bloc opératoire en urgence. L'heure d'incision était à 17 heures 30. Le bilan lésionnel orthopédique retrouvait une amputation complète au niveau du tiers supérieur du bras droit avec une fracture transverse de l'humérus et une section complète de tous les plans musculo-aponévrotiques, ainsi que tous les troncs vasculo-nerveux ; on parle de neurotmésis ou perte complète de la continuité nerveuse avec interruption des axones et des gaines qui l'entourent, la réinnervation spontanée étant impossible sans acte chirurgical. (Classification de Seddon des lésions nerveuses périphériques [43]). Les moignons proximal et distal étaient souillés, avec présence d'herbe et de terre nécessitant un lavage abondant au sérum salé isotonique chaud et à la Bétadine® dermique puis un parage. Les troncs nerveux médian, ulnaire, radial et musculo-cutané extrêmement contus ont été recoupés en zone saine puis suturés par des points séparés. Pour éviter la mise en tension des tissus mous, l'humérus a été raccourci de 5 centimètres au total (1 cm en proximal, 4 cm en distal) [44]. Une ostéosynthèse par plaque verrouillée LCP® humérus proximal a été réalisée. Le bilan lésionnel vasculaire proximal et distal a été réalisé par le chirurgien vasculaire. Un pontage artériel huméro-huméral termino-terminal par interposition d'un greffon saphène interne droit a été réalisé, associé à une réparation veineuse par pontage basilo-basilique direct termino-terminal. Le membre s'est recoloré immédiatement avec un pouls radial et ulnaire, sans allongement du temps de recoloration cutané. Des aponévrotomies antérieures et postérieures ont été pratiquées de

l'avant-bras et au niveau du dos de la main, afin de prévenir un syndrome des loges pouvant être fatal pour la survie du membre réimplanté. Le risque de développer un syndrome des loges même plusieurs heures après la prise en charge chirurgicale est important, en raison de l'œdème et de l'élévation des pressions dans les loges musculaires [45]. Au total, le temps d'ischémie du membre a duré 7 heures. A la fin de l'intervention, le membre était toujours bien chaud et coloré. L'immobilisation du patient s'est faite coude fléchi à 90°, avec contre-indication absolue d'extension du coude.

Le patient a été hospitalisé en post opératoire dans l'Unité de Soins Continus Chirurgical pour une durée de 3 jours. Il a été placé dans une chambre sous flux, avec un isolement protecteur (port de blouse et de masque chirurgical pour les soignants et les visiteurs, lavage des mains à la solution hydro alcoolique en entrant et en sortant de la chambre) afin de limiter le risque infectieux. Un traitement anticoagulant a été instauré pour limiter le risque thrombo-embolique par apixaban 5 mg matin et soir par voie orale (Eliquis®).

Pour le cas cité dans ce travail, les complications post-opératoires ont été marquées sur le plan cutané par une nécrose partielle face antérieure du bras au niveau de la suture ainsi qu'au niveau du triceps brachial, nécessitant l'exérèse de cette zone nécrotique avec mis en place d'une thérapie par pression négative avec instillation (Vaculta®), puis autogreffe de peau mince dans un second temps. Sur le plan infectieux, présence de germes sur les prélèvements per opératoires (*Pantoea agglomerans*, *Serratia marcescens*, *Bacillus*) dont l'évolution a été favorable après une adaptation des antibiotiques. La présence de *Fusarium sp.* a motivé l'introduction de voriconazole.

### **3) Facteurs de récupération clinique**

#### *3.1 Limitation des douleurs*

L'évaluation et la gestion de la douleur sont un véritable enjeu voire même la priorité dans la prise en charge rééducative. Selon la définition officielle de l'Association Internationale pour l'Etude de la Douleur (IASP, 2011), la douleur est « *une expérience sensorielle et émotionnelle désagréable, associée à une lésion tissulaire réelle ou potentielle ou décrite dans ces termes* ». Une autre définition a été proposée et aujourd'hui mondialement reconnue : « *La douleur est tout ce qu'en dit la personne qui en fait l'expérience, et elle existe dès lors que la personne dit qu'elle existe* » (Mc Caffery et Pasero, 1968). La douleur est donc une expérience subjective, complexe et pluridimensionnelle : sensorielle, affective et émotionnelle. L'écoute attentive et



l'information répétée de la part de l'équipe médicale et paramédicale étaient donc primordiales, pour que le patient puisse exprimer sereinement ce qu'il ressentait sur l'évolution des douleurs et sur l'efficacité des traitements.

Le mécanisme lésionnel était à l'origine d'un tableau douloureux mixte. Les douleurs postopératoires du membre supérieur droit sont secondaires à un **excès de nociception**, due à une stimulation excessive des récepteurs nociceptifs périphériques (nocicepteurs). Afin de prolonger l'analgésie postopératoire, le médecin anesthésiste a réalisé une anesthésie loco-régionale avec bloc du plexus brachial droit supra-claviculaire, et pose d'un cathéter périmerveux. L'équipe infirmière pouvait injecter de façon régulière des anesthésiques locaux à longue durée de vie (chlorhydrate de ropivacaïne anhydre). Nous évaluons quotidiennement ces douleurs en interrogeant le patient grâce à une échelle verbale simple (EVS) cotées de 0 à 10 (0 = absence de douleur, 10 = douleurs intenses). Une EVS  $\geq 7/10$  requière l'utilisation d'antalgiques de palier III (morphiniques). Une EVS comprise entre 3 et 6 inclus, ce qui a été le cas à deux mois post-opératoires environ, permet l'utilisation d'antalgiques de palier II (opioïdes). Le patient prenait des comprimés de palier II à libération prolongée toutes les 12 heures associées à des interdoses en cas de mobilisation du membre lésé (avant la toilette ou en kinésithérapie par exemple). L'œdème post-opératoire du bras étant très sensible, les kinésithérapeutes ont effectué par effleurage un drainage lymphatique quotidien jusqu'à résorption satisfaisante de l'œdème.

L'amputation initiale du bras a entraîné un arrachement de tous les troncs nerveux, à l'origine de **douleurs neuropathiques** invalidantes. Elles sont la conséquence directe d'une lésion ou d'une maladie du système nerveux somatosensoriel et peuvent être d'origine centrale ou périphérique [46]. Le diagnostic repose sur l'auto-questionnaire DN4 intégrant l'interrogatoire et l'examen clinique du patient [47] (Annexe 1). A l'arrivée dans le service, le score était de 7/10 (test positif si score DN4  $\geq 4$ ). La plainte initiale était des dysesthésies avec des décharges électriques et des brûlures non systématisées (spontanées et provoquées) associées à des allodynies au pli du coude et sur la cicatrice de réimplantation. Un traitement par gabapentine à dose optimale a été prescrit afin de limiter ces douleurs. Les EVS restant supérieures à 4 durant les soins, nous avons utilisé le Meopa® au cours des séances de kinésithérapie pour favoriser la tolérance. Cette utilisation a été réservée sur des temps courts aux mobilisations passives des articulations. Lorsque le patient ne tolérait pas ces douleurs même après adaptation des traitements antalgiques, les séances de rééducation pouvaient être interrompues.

Il ne fallait pas exclure les **douleurs du membre fantôme**, liées à l'arrachement initial traumatique. Chez les patients amputés d'un membre, l'incidence des douleurs fantômes s'estime entre 50% à 85% [48]. Dans ce cadre, mais aussi dans le travail de plasticité cérébrale sur la récupération de fonction de préhension, la thérapie miroir est une alternative thérapeutique. Elle a d'abord été utilisée dans la prévention des douleurs du membre fantôme chez les patients amputés [49,50]. Elle est aussi utilisée pour la rééducation neuromotrice chez les patients hémiparétiques dans les suites d'un AVC, ou à visée antalgique dans le cadre du syndrome régional douloureux complexe [51]. Dans le cas présent, la thérapie miroir n'a pas été utilisée à des fins antalgiques car les douleurs du « membre fantôme » n'étaient pas au premier plan. Cette thérapie a été utilisée pour la rééducation neuromotrice du membre supérieur droit, que nous précisons par la suite.

La douleur est un phénomène plurimodal et au-delà des thérapeutiques usuelles, elle nécessite une approche sensorielle, affective et émotionnelle adaptée au vécu. Cette approche doit se faire de façon pluridisciplinaire, en synthèses d'équipe et lors des visites médicales avec le patient qui avait besoin d'être écouté, réassuré et encouragé. Un suivi sur le plan psychologique était indispensable. L'image corporelle est l'image que l'on forme dans son esprit de son propre corps, autrement dit, la façon dont on se perçoit (extrait de *L'image du corps*, de Paul Schilder) et dépend du vécu, de l'expérience et de la personnalité. Dans ce contexte traumatique, cette image corporelle a été considérablement modifiée. Les séances de psychomotricité ont permis au patient de travailler cela et de détourner son attention de ses douleurs chroniques. Les séances de relaxation avaient pour but un relâchement des tensions physiques et psychiques, avec des exercices de respiration abdominale.

### 3.2 *Etat cutané-trophique*

Les cicatrices de réimplantation et des aponévrotomies décompressives, fermées secondairement, ont nécessité un crémage quotidien afin d'assouplir la peau et de limiter les adhérences cutanées. Nous avons utilisé également la vacuothérapie, aussi appelée dépressothérapie. C'est une technique de massage basée sur le principe d'activation de la circulation locale, qui consiste à faire le vide grâce à des ventouses. Elle est utilisée pour limiter la rétraction cutanée au niveau des cicatrices. Cette technique a aussi pour but de limiter les adhérences pour favoriser le glissement du muscle lors de son travail concentrique (biceps brachial essentiellement par exemple dans le cas présent). Ces adhérences sont vectrices de douleurs qui renforcent la nécessité du traitement décrit dans le paragraphe précédent.

### 3.3 Amplitudes articulaires

La préservation des amplitudes articulaires prévient l'apparition des rétractions tendineuses et des déformations orthopédiques [52]. Les étirements musculo-tendineux des différentes articulations par le kinésithérapeute sont essentiels pour limiter ces complications neuro-orthopédiques. **Les amplitudes articulaires se mesurent à l'aide d'un goniomètre, les résultats sont exprimés en degrés (°).** Devant l'absence initiale de réveil musculaire au niveau des articulations du poignet et des doigts et un coude en flessum à 50° (conséquence d'une immobilisation prolongée en flexion), ces manœuvres d'étirements ont été effectués au moins 2 heures par jour et 5 jours sur 7. Pour garder le bénéfice des amplitudes articulaires acquises, des attelles de postures ont été confectionnées. L'ergothérapeute a réalisé une attelle de poignet en extension à 60°, une attelle de poignet en position de « protection » soit en position intrinsèque plus (poignet à 0° d'extension, articulations métacarpo-phalangiennes (MCP) fléchies à 90°, interphalangiennes proximales et distales (IPP et IPD) tendues), une attelle d'enroulement des doigts (Figure 6) et une attelle d'extension des doigts (lames de Levame). Une fois l'extension du coude autorisée, une attelle amovible de coude a été réalisée toujours en tenant compte du flessum peu à peu réductible. Ces attelles étaient portées après les séances de kinésithérapie, en alternance et en surveillant régulièrement les points d'appuis et l'absence d'escarre cutanée.

Figure 6 : exemple d'attelle d'enroulement des doigts



### 3.4 Rééducation sensitive

La rééducation sensitive est une approche non pharmacologique basée sur les récepteurs périphériques mais aussi la neuroplasticité du système somatosensoriel. L'objectif est double : la récupération d'une sensibilité tactile et limiter l'apparition de douleurs neuropathiques. Chez ce patient, on objectivait des zones d'hypoesthésies cutanées associées à des zones

d'hypoesthésie paradoxalement douloureuses, appelée allodynie mécanique statique. La prise en charge rééducative est différente car leurs physiopathologies sont différentes. **La récupération sensitive a été évaluée à l'aide du test au Test au monofilament de Semmes-Weinstein** [53] (Annexe 2). C'est une méthode instrumentale qui quantifie la sensation tactile de pression à l'aide de monofilaments de diamètre décroissant ; la pression appliquée est constante, le monofilament doit se courber quand on effectue une pression. Les différentes voies de la sensibilité rappelées en annexe 3 et 3bis.

Une **allodynie mécanique** est définie par la présence d'une sensation douloureuse pour un stimulus normalement non douloureux. Une douleur à la pression d'un monofilament de 15g (Test de Semmes-Weinstein 5.18) est le critère diagnostique positif [54]. La rééducation passe par la contre-stimulation vibrotactile à distance : le principe consiste à appliquer un agent thérapeutique tactile et vibratoire d'intensité constante et confortable sur un territoire cutané non douloureux adjacent à la zone allodynique, qui elle ne doit jamais être stimulée directement [55]. Les séances sont pluriquotidiennes. Cette technique de rééducation s'appuie sur la théorie du Gate Control [56]. Une fois disparition de l'allodynie mécanique, l'apparition d'une hypoesthésie sous-jacente est constante [57].

L'**hypoesthésie** cutanée est secondaire à la levée d'une allodynie mécanique ou à interruption des voies de la sensibilité centrale ou périphérique. La désensibilisation ou « désensitization » est la technique de rééducation appropriée. Le traitement est différent, car les stimulations se font directement sur les zones hypoesthésiques avec des stimulations d'intensité croissante. L'ergothérapeute stimulait le membre supérieur gauche (sain) avec des textures (lisse, rugueuse, piquantes...) ou des particules (pois chiche, maïs, semoule) ; le patient devait se concentrer pour retenir l'information sensorielle et imaginer qu'elle se reproduise sur son membre atteint yeux ouverts puis yeux fermés. Ces séances avaient également pour but la prise de conscience du déficit sensitif, afin qu'il réalise la nécessité de surveiller l'état cutané de son bras droit.

### *3.5 Rééducation neuromotrice et réveil musculaire*

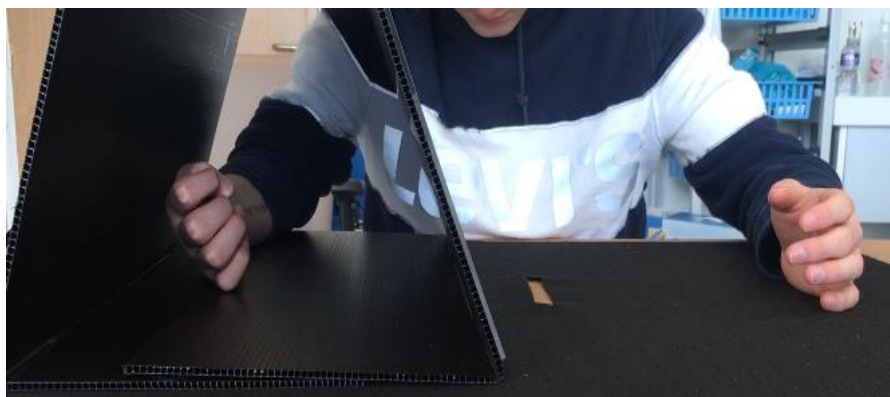
La rééducation neuromotrice avait plusieurs objectifs : l'intégration cérébrale du mouvement et favoriser un réveil musculaire progressif. Le travail devait se faire en fonction de la tolérance et de l'état de fatigue du patient. **La récupération motrice s'évalue avec l'échelle de mesure MRC (Medical Research Council)** [58], qui grade la force musculaire de chaque muscle de 0 à 5 : 0 = absence de contraction musculaire visible, 1 = contraction

musculaire visible sans mouvement, 2 = mouvement du membre en apesanteur, 3= mouvement possible contre la pesanteur seule, 4 = mouvement possible contre une certaine résistance, 5 = force normale. La cotation est affinée par l'adjonction de signes moins (-) quand l'amplitude n'est pas complète et plus (+) quand un muscle a plus d'efficacité que la définition ne lui accorde.

Pour débiter dans cette rééducation neuromotrice, une prise de conscience des mouvements était nécessaire. Les exercices de mobilisation passive réalisés dès la levée des contre-indications chirurgicales ont pu participer à ce réveil de sensibilité proprioceptive, à l'intégration du positionnement des articulations (arthrokinésie) et à la sensation de mouvement même si elle est exercée par un tiers. Ces exercices de mobilisations passives ont débuté précocement, au 3<sup>ème</sup> jour post-opératoire, au niveau des doigts et du poignet puis de l'épaule où il existait des contractures importantes des ceintures scapulaires et des muscles trapèzes. A son arrivée dans le CA de MPR Pédiatrique, 2 mois et demi après l'intervention, le patient était capable d'effectuer une abduction et une antéépulsion d'épaule en mobilisation active aidée. De façon peu reproductible, on pouvait observer une légère contraction du muscle biceps brachial sans aucun mouvement décelable.

Le réveil musculaire est favorisé par la mobilisation active aidée : le patient doit essayer de contracter un muscle, en étant accompagné voire aidé par un mouvement passif extérieur (par le kinésithérapeute). Il est permis aussi grâce à la stimulation par massages des différents groupes musculaires, notamment des fléchisseurs du coude. Cette action prévient aussi l'amyotrophie. En ergothérapie, nous avons utilisé la thérapie miroir (ou thérapie visuomotrice) dont les effets seraient attribués aux « neurones miroirs » (NM). C'est une classe spécifique de neurones qui s'activent lorsque le sujet effectue une action spécifique orientée vers un but ou lorsqu'il observe un autre individu exécuter cette même action ; ils sont localisés au niveau du cortex prémoteur ventral (aire 6 de Brodmann) et du lobule pariétal inférieur [59]. Ils ont un rôle dans l'apprentissage moteur par imitation. Les NM aident à la représentation mentale d'une imagerie motrice et donc d'une perception du corps différente. L'objectif pour le patient est le rétablissement d'une conscience physique, motrice et sensorielle de son membre atteint. Cette méthode impose au patient de la concentration car il doit pouvoir synchroniser imagerie mentale et production du mouvement. L'intention motrice du membre parétique doit correspondre avec le mouvement visuel renvoyé par le membre sain dans le miroir. Ces séances duraient en moyenne 30 minutes par jour, 5 jours sur 7 (Figure 7).

Figure 7 : Séance de thérapie miroir. Le patient devait placer son bras paralysé du côté de la face non réfléchive du miroir (à gauche de l'image) et son bras sain du côté de la face réfléchive du miroir (à droite de l'image). La consigne était de regarder ensuite dans la partie brillante du miroir le reflet de sa main gauche intacte effectuant un mouvement d'ouverture et de fermeture, de sorte que le reflet semble reproduire virtuellement le mouvement du membre lésé.



### *3.6 Facteurs de réadaptation pour limiter les restrictions de participation*

La rééducation neuromotrice est le premier acteur permettant de lever les incapacités fonctionnelles puis de limiter les restrictions de participation à la vie en société, objectif principal de la Médecine Physique et de Réadaptation. Chez ce patient, ce travail de plasticité cérébrale et d'intégration de fonction de préhension ne pouvait se faire que parallèlement au travail d'acceptation du handicap.

Les mises en situation écologiques (adaptation de la gestualité au domicile, en loisirs et à l'école) sont le fruit de la réadaptation : c'est confronter le patient aux difficultés inhérentes à sa maladie tout en le guidant pour y faire face. Cet accompagnement dirigé a un but, c'est faire prendre conscience au patient qu'il peut compenser ses limitations d'activités lorsque la récupération rencontre des limites de possibilités au-delà du seuil d'acceptation par le patient. Par exemple, il était important que le patient réalise qu'il pouvait aussi faire des choses de sa main saine (gauche) alors qu'il était droitier. L'enjeu est de permettre une compensation avec le membre sain sans abandonner la récupération du membre en voie de récupération. Les techniques de compensation et de relatéralisation passaient par des entraînements de la dextérité du membre d'appoint comme lancer une balle sur une cible, jouer au ping-pong ou tenir une fourchette de la main gauche pour manger. L'apprentissage de la motricité fine de la main gauche et des activités bimanuelles reposaient sur la répétition d'activités de la vie quotidienne : habillage, couper des aliments. La relatéralisation de l'écriture consistait en des exercices gestuels et graphiques, à la base du développement de la précision et de la vitesse du geste

(comme dessiner des formes préfigurant les lettres comme des arceaux ou des vagues). Les cours dispensés au sein de l'Unité Scolaire du CA de MPR Pédiatrique ont permis au patient de garder un rythme dans son parcours éducatif.

Nous avons évalué la récupération fonctionnelle du membre supérieur droit par le **questionnaire CHEQ (Children's Hand-use Experience Questionnaire)**, destiné aux enfants âgés de 6 à 18 ans atteints d'un déficit fonctionnel unilatéral de la main. Il est disponible seulement sur internet (<http://www.cheq.se/>) et permet d'évaluer leurs performances dans 29 activités de la vie quotidienne bimanuelles (Figure 8) [60]. L'avantage est qu'il mesure à la fois *l'utilisation de la main atteinte* au cours de l'activité et la performance en termes d'efficacité de la prise : *temps supplémentaire pour effectuer les activités* et *sentiment de contrariété en cas de difficultés*.

Figure 8 :

The figure displays two screenshots of the CHEQ questionnaire interface. The left screenshot is for the activity "Remonter la fermeture éclair d'une veste" and the right is for "Couper sur une planche à découper (par exemple les fruits, les légumes, le pain)". Each screenshot shows three questions with radio button options.

**Left Screenshot (Remonter la fermeture éclair d'une veste):**

- Question 1: "Est-ce que tu utilises habituellement une seule main, les deux mains ensemble, ou tu te fais aider ?"
  - Une seule main
  - Les deux mains
  - Tu te fais aider
- Question 2: "De combien de temps as-tu besoin pour réaliser toute la tâche, en comparaison aux autres enfants de ton âge?"
  - 1 Considérablement plus longtemps
  - 2
  - 3
  - 4 Aussi longtemps
- Question 3: "Est-ce que la fonction de ta main t'ennuie dans cette activité/ situation?"
  - 1 Cela m'ennuie beaucoup
  - 2
  - 3
  - 4 Cela ne m'ennuie pas du tout

**Right Screenshot (Couper sur une planche à découper):**

- Question 1: "Est-ce que tu utilises habituellement une seule main, les deux mains ensemble, ou tu te fais aider ?"
  - Une seule main
  - Les deux mains
  - Tu te fais aider
- Question 2: "Comment trouves-tu que ta main fonctionne ?"
  - 1 Mal
  - 2
  - 3
  - 4 Bien
- Question 3: "De combien de temps as-tu besoin pour réaliser toute la tâche, en comparaison aux autres enfants de ton âge?"
  - 1 Considérablement plus longtemps
  - 2
  - 3
  - 4 Aussi longtemps
- Question 4: "Est-ce que la fonction de ta main t'ennuie dans cette activité/ situation?"
  - 1 Cela m'ennuie beaucoup
  - 2
  - 3
  - 4 Cela ne m'ennuie pas du tout

Le **questionnaire KIDSCREEN-52** évalue la qualité de vie chez les enfants et adolescents. De façon conceptuelle, ce test a l'avantage d'aborder la **notion de qualité de vie comme un concept pluridimensionnel**. Il aborde 10 domaines de qualité de vie : le bien-être physique, le retentissement psychologique positif et négatif, l'estime de soi, l'autonomie, la vie familiale, les ressources financières, les relations avec les amis, l'école, et l'intégration sociale. C'est un outil validé, fiable, reproductible et interculturel [61].

### 3.7 Facteurs psychoaffectifs

Parce que le traumatisme physique et psychique auquel il a été confronté est immense, l'accompagnement psychologique mais aussi éducatif, social et scolaire régulier en lien avec

les parents était crucial pour que le projet rééducatif et réadaptatif soit cohérent. Le but étant de favoriser l'adhésion du patient et sa famille au projet, garante de l'investissement du jeune durant les séances de rééducation. Cela n'a pas toujours été évident pour cet adolescent qui a passé plusieurs mois dans des services de soins lourds, loin de sa famille et ses amis. Il n'a jamais présenté d'éléments en faveur d'un syndrome dépressif et se projetait toujours vers le positif. Nous avons dû rester prudent face à cette attitude, pouvant être le témoin d'un refus des déficiences et d'un déni de la situation de handicap.

L'ensemble des professionnels médicaux et paramédicaux s'est heurté progressivement à des difficultés liées au déni d'un non-retour vers un état antérieur et de la possibilité d'absence de récupération totale des déficiences du membre supérieur. Face à ce jeune ayant fait du polo une priorité dans sa vie, aspirant à une carrière professionnelle sportive et exprimant le souhait de reprendre ce sport au plus vite, une harmonisation des dialogues entre chirurgiens, médecins MPR et thérapeutes a été nécessaire. Nous avons travaillé avec lui ce déni de la pathologie pour le faire avancer progressivement sur l'acceptation de son handicap : apprendre à « faire avec mais autrement ». L'étayage parental et le maintien d'un lien social extérieur à l'hôpital grâce aux permissions thérapeutiques, ont été d'autres ressources psychologiques chez ce patient pour faire face à ses difficultés, à ses moments de découragements ou à ses déceptions qu'il a peu à peu exprimé.

#### ***4) Intérêts de l'électrophysiologie dans l'évaluation de la régénération nerveuse***

Les explorations fonctionnelles du SNP ont une valeur diagnostic et pronostic après sections nerveuses. Elles permettent de préciser le type, la sévérité et le siège des lésions, puis de contrôler l'évolution. Dans le cas présent, le traumatisme a provoqué un neurotmsis, soit une interruption complète de la continuité des axones et des gaines de myéline. La réparation chirurgicale s'est faite en 2 étapes : raccourcissements en zone saine puis sutures directes des troncs nerveux.

L'étude des voies sensitives, de la périphérie jusqu'au cortex cérébral, est possible par l'analyse des potentiels évoqués somesthésiques (PES). La stimulation électrique des fibres myélinisées de gros calibre (A $\beta$ ) entraîne des signaux qui empruntent les cordons postérieurs de la moelle (voie lemniscale) jusqu'au cortex somesthésique primaire. On ne peut pas étudier les voies spinothalamiques (voies de la douleur), de diamètres plus petits, en pratique courante. L'obtention d'une réponse corticale au moyen d'électrodes de surface, le PES, atteste d'une



intégrité des voies sensibles depuis le niveau où elles ont été stimulées. Il est possible d'obtenir des PES même en l'absence de signes cliniques objectifs. Les nerfs médian et ulnaire ont été stimulés au poignet gauche puis droit.

L'électromyogramme de détection (EMG de détection) est l'étude électrique des muscles, à l'aide d'aiguilles-électrodes : on étudie l'activité musculaire au repos et à l'effort. C'est un examen bilatéral et comparatif. Chez un sujet sain au repos, le muscle normal est silencieux et dépourvu d'activités électriques (sauf à l'insertion de l'aiguille dans le muscle). L'apparition de potentiels de fibrillation ou de potentiels lents de dénervation traduisent une activité spontanée des fibres musculaires dénervées. A l'effort, l'activité volontaire passe par le motoneurone périphérique  $\gamma$  et les fibres musculaires qu'il innerve : l'unité motrice. L'activité électrique enregistrée constitue le potentiel d'unité motrice (PUM), c'est la somme des potentiels des fibres musculaires innervées par un seul motoneurone. Il existe un recrutement temporo-spatiale au cours d'un effort : au cours d'une contraction volontaire, initialement les unités motrices activées augmentent leur fréquence de décharge (sommation temporelle). Puis pour un effort plus soutenu, on assiste au recrutement de nouvelles unités motrices (sommation spatiale). La sévérité d'une atteinte nerveuse est évaluée en fonction des tracés, au cours d'une contraction volontaire maximale. Les paramètres étudiés en EMG sont la richesse du tracé (0 = absence de toute activité volontaire, 1 = tracé neurogène simple, 2 = tracé intermédiaire, 3 = riche et 4 = tracé interférentiel ou normal, [figure 9](#)), la fréquence de décharge (normale ou accélérée) et la taille et forme des potentiels. Pendant une contraction volontaire, dans le cas d'atteinte nerveuse périphérique, le tracé est appauvri (simple ou intermédiaire). Les unités motrices fonctionnelles restantes augmentent leur fréquence de décharge : c'est la sommation temporelle à l'effort. Le tracé est dit neurogène ([figure 10](#)). L'EMG dépiste aussi le début de régénération nerveuse par la mise en évidence de potentiels de réinnervation.

[Figure 9](#) : tracé EMG interférentiel (normal) ; extrait du Collège des Enseignants de Neurologie

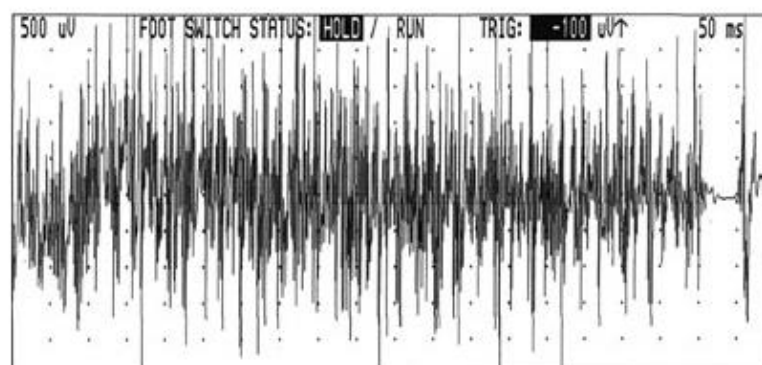
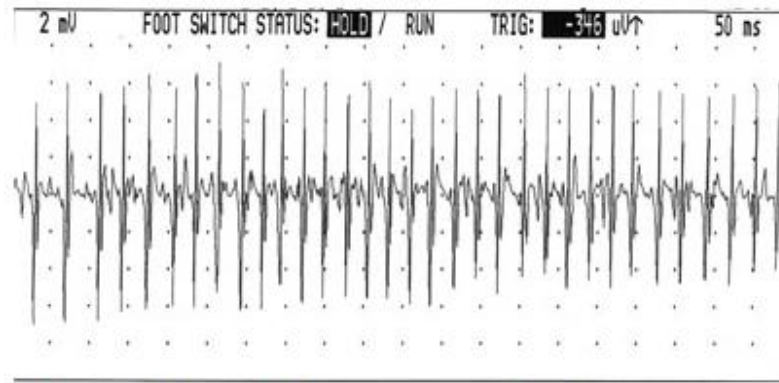


Figure 10 : tracé EMG neurogène simple, appauvrissement des unités motrices ; extrait du Collège des Enseignants de Neurologie.



Dans le cas de ce patient, nous avons étudiés les muscles deltoïde, biceps brachial, fléchisseur radial du carpe, extenseur radial du carpe, abducteur du V et opposant du pouce droits.

L'EMG de stimulodétection étudie les vitesses de conduction nerveuse (VCN) motrice et sensitive. On provoque artificiellement l'activité électrique d'un nerf en lui délivrant une petite impulsion électrique, à l'aide d'un jeu d'électrodes posées sur la peau en regard de son trajet ou l'aide d'aiguilles intramusculaires. On enregistre la réponse, à l'aide d'un second jeu d'électrodes disposées à distance sur le trajet du nerf. Nous avons étudié les VCN motrices du nerf médian et ulnaire droits.

## 5) *IRM fonctionnelle d'activation*

### 4.1 *Acquisitions des images*

Pour l'obtention des images avec cartographies d'activation, plusieurs étapes sont nécessaires au préalable. Les images sont acquises à l'aide d'une IRM 3T (Achieva dStream, Philips Medical systems) équipée d'une antenne numérique à 32 éléments. Une séquence EPI (Echo Planar Imaging) a été utilisée pour l'acquisition des images fonctionnelles, c'est une méthode rapide d'acquisition où l'ordre de grandeur est de quelques centaines de millisecondes par image et de l'ordre de 2 à 3 secondes par volume cérébral complet, mais avec une résolution spatiale plus limitée qu'en morphologie classique. Quarante-quatre coupes axiales, orientées le long de l'axe commissure antérieure – commissure postérieure du sujet ont été acquises avec les paramètres suivants : temps de répétition (TR) = 2500 ms, temps d'écho (TE) = 30 ms, angle de bascule = 90 °, épaisseur de coupe = 3 mm, intervalle entre les coupes = 3 mm, taille des

voxels =  $2 \times 2 \text{ mm}^2$ , champ de vue (FOV)  $23 \times 23 \text{ cm}^2$ . Le nombre de volumes d'images fonctionnelles acquises était de 80 volumes, la durée totale de la séquence fonctionnelle était de 3,33 min. Par ailleurs, un volume anatomique 3D de haute résolution ont été également acquis avec les paramètres suivants : TR = 8 ms, TE = 3.5 ms, angle de bascule =  $8^\circ$ , FOV =  $24 \text{ cm}^2$ , résolution spatiale =  $1,2 \times 1,2 \times 1,2 \text{ mm}^3$ , durée de la séquence = 2,8 mn. Ce volume d'images a été utilisé comme référence anatomique pour la localisation des régions cérébrales activées dans l'espace standard de Talairach.

#### 4.2 Stimuli et paradigmes expérimentaux

Trois tâches motrices ont été choisies : ① mouvement de flexion et d'extension du bras (bras gauche puis bras droit), ② mouvement d'ouverture et de fermeture des doigts (main gauche puis main droite), poignet fixe coude au corps immobile, ③ mouvement séquentiel des doigts ou finger-tapping (main gauche puis main droite). Ces tâches motrices ont été choisies de façon à mettre en jeu la motricité grossière et la motricité fine. Deux tâches sensibles ont été réalisées par un examinateur à l'aide d'un monofilament, sans que le patient ne regarde : ④ stimulation du pouce, ⑤ stimulation de l'index et du majeur à gauche puis à droite. Le paradigme utilisé était de type bloc, constitué de 4 périodes d'activation alternées à 5 périodes de repos. La durée de chaque période d'activation était de 25 secondes et celle des périodes de repos était de 20 secondes. Afin de pouvoir comparer les cartographies d'activation cérébrale, ces différentes tâches ont été réalisés par un sujet sain et par le patient.

Nous allons exposer les cinq tâches successives qui ont constitué le protocole d'IRMf (Figures 11 à 18). Ces consignes étaient indiquées sur un écran tourné vers le patient (pour les tâches motrices) ou vers l'examinateur (pour les tâches sensibles). Chaque tâche est réalisée à gauche puis à droite. Sur le plan clinique, lorsque le patient ne pouvait pas effectuer le mouvement demandé en raison de ses déficiences motrices, nous lui avons donné comme consigne de *s'imaginer réaliser le mouvement*.

**Tâche ① :**



Figure 11 = lorsque cette icone apparaissait sur l'écran, la consigne était de ne rien faire (= période de repos)

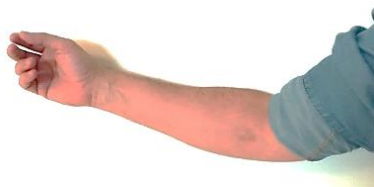


Figure 12 = lorsque cette icone apparaissait sur l'écran, la consigne était d'effectuer le mouvement de flexion et d'extension du bras (= période d'activation)

**Tâche ② :**



Figure 13 = lorsque cette icone apparaissait sur l'écran, la consigne était de ne rien faire (= période de repos)



Figure 14 = lorsque cette icone apparaissait sur l'écran, la consigne était d'effectuer le mouvement de d'ouverture et de fermeture des doigts (= période d'activation)

**Tâche ③ :**



Figure 15 = lorsque cette icone apparaissait sur l'écran, la consigne était de ne rien faire (= période de repos)



Figure 16 = lorsque cette icone apparaissait sur l'écran, la consigne était d'effectuer un mouvement séquentiel des doigts ou finger-tapping (= période d'activation)

Tâches ④ et ⑤ :

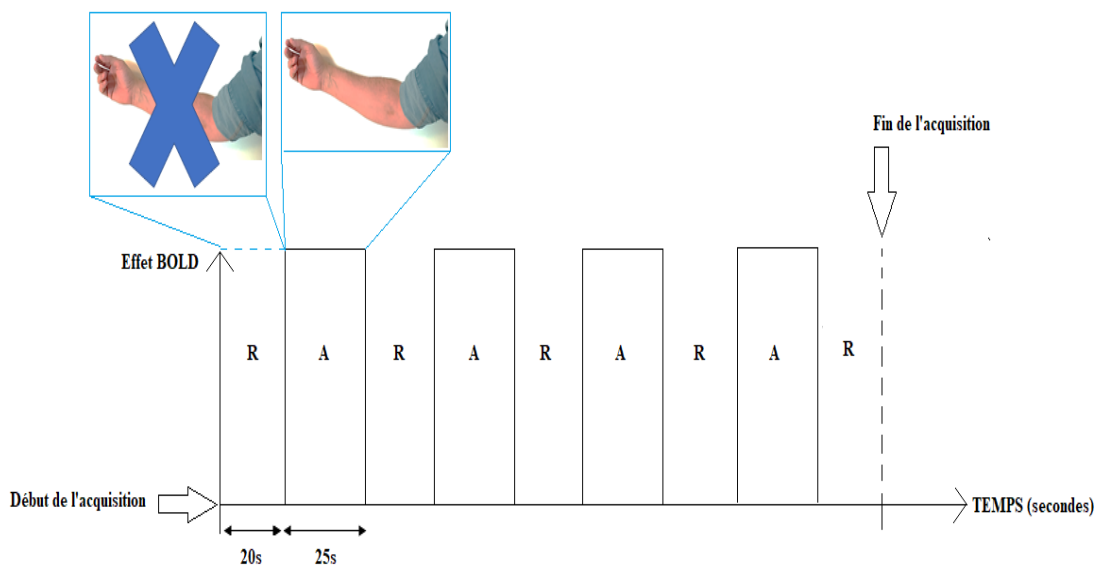


Figure 17 = lorsque cette icone apparaissait sur l'écran, la consigne pour l'examineur était de ne pas stimuler les doigts avec le monofilament (= période de repos)



Figure 18 = lorsque cette icone apparaissait sur l'écran, l'examineur devait stimuler par des pressions à vitesse constante avec le monofilament sur le pouce ④ puis sur l'index et le majeur ⑤ (= période d'activation)

La figure 19 (ci-dessous) est un exemple de paradigme expérimental de type bloc pour la tâche de flexion et d'extension du bras.



#### 4.3 Analyses des données

Ce travail a été effectué par Monsieur Fall, Docteur-Ingénieur à l'Université de Picardie Jules Vernes (Unité de recherche EA 7416). Les images fonctionnelles ont été analysées à l'aide du logiciel SPM12 (Statistical Parametric Mapping : <https://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>). Un pré-traitement est réalisé : on effectue un « lissage » temporel pour diminuer les artefacts liés aux mouvements physiologiques inévitables (respiration) et aux bruits. La deuxième étape de ce pré-traitement est une normalisation spatiale des images fonctionnelles et anatomiques dans

un repère spatial (*template*) standard, celui du MNI (Montreal Neurological Institut). Cette normalisation des images permet de labéliser les clusters d'activation dans un atlas standardisé. La dernière étape consiste à appliquer un filtre Gaussien ( $8 \times 8 \times 8 \text{ mm}^3$ ) sur les images fonctionnelles afin d'améliorer le rapport signal sur bruit du signal hémodynamique enregistré. Vient ensuite l'étape de l'analyse statistique de corrélation : elle sert à extraire les différences significatives de signal entre période d'activation et de repos. Les cartographies d'activation relatives à chaque tâche sont générées à partir d'une analyse par modèle linéaire généralisé et par une modélisation de la réponse hémodynamique par une fonction canonique standard.

Les contrastes associés à chaque type de tâche sont générés à partir d'un test statistique *t* (*student-test*), permettant ainsi de calculer les cartes statistiques paramétriques. Le seuil statistique pour le calcul des cartographies d'activation a été fixé à  $P < 0.001$  pour les tâches de mouvements d'ouverture/fermeture des doigts et les mouvements séquentiels des doigts. Un seuil de  $P < 10^{-6}$  a été utilisé pour la tâche de flexion et d'extension du bras. Nous avons choisi un seuil statistique plus "élevé" pour la tâche de flexion et d'extension du bras du fait qu'une préanalyse des résultats a révélé un recrutement de régions cérébrales très vaste par rapport aux deux autres tâches motrices, rendant difficile la comparaison de résultats. Un seuil à  $P < 0.01$  a été choisi pour les tâches sensitives. La superposition entre les images anatomiques (acquisition en T1) et les images fonctionnelles d'activation (acquisition en T2\*) permet d'obtenir les cartes d'activation.

## **6) Ethique**

Le patient et sa mère ont reçu une information claire et compréhensible sur les modalités de la recherche de l'étude, et ont donné leur consentement oral et écrit. Un formulaire de consentement a été signé. Un formulaire écrit a été signé par la mère, autorisant la réutilisation des données photographiques dans le cadre de ce travail. Ce protocole de recherche n'impliquant pas la personne humaine (Hors Loi Jardé) a reçu son autorisation par la CNIL (PI2020\_843\_0126).

### III. RESULTATS

Nous avons choisi de présenter les résultats cliniques (récupération sensitivo-motrice), électrophysiologiques et les cartographies d'activations cérébrales à **6 mois et 12 mois du traumatisme (6 mois et 9 mois pour l'étude des PES et de l'EMG)**. Ce choix est justifié par la complémentarité de ces trois méthodes d'évaluation, sur le plan diagnostique, évolutif et enfin pronostic. Nous exposerons ensuite les résultats de la récupération fonctionnelle du membre supérieur droit réimplanté de ce patient, et sur l'impact qu'elle a dans son quotidien.

#### 1) Evolution clinique

L'évolution de la **force motrice** des différents muscles du membre supérieur droit à 6 et 12 mois de la réimplantation est présentée dans le tableau 1.

Tableau 1 : mesure de la force motrice des différents groupes musculaires du membre supérieur droit évaluée par l'échelle MRC de 0 à 5. Le muscle biceps brachial est fléchisseur du coude, et supinateur de l'avant-bras si coude fléchi à 90°. FUC = fléchisseur ulnaire du carpe, FRC = fléchisseur radial du carpe, LERC et CERC = long et court extenseur radial du carpe, EUC = extenseur ulnaire du carpe, LFI= long fléchisseur du pouce, LAbdI = long abducteur du pouce, LEI = long extenseur du pouce, FPD et FSD = fléchisseurs profonds et superficiels des doigts, ECD = extenseur commun des doigts, EI = extenseur propre du pouce. I à V désignent les 5 rayons de la main.

	<u>6 mois</u>	<u>12 mois</u>
<i>Muscles de l'épaule (deltoïde antérieur, moyen, postérieur)</i>	4	4+
<i>Muscles du coude</i>		
- Biceps brachial en flexion	2+	4-
- Brachio radial	2+	3
- Triceps brachial	2-	3
- Rond pronateur	2-	3
- Biceps brachial en supination	3-	3
<i>Muscles du poignet</i>		
- FUC	3	4
- FRC	2+	4
- LERC	2	3
- CERC	2	3
- EUC	1+	2
<i>Muscles des doigts</i>		
- LFI	3	2
- LAbdI	1+	2
- LEI	1	2
- FPD	3	3
- FSD	4	4
- ECD	1	1
- EI	1	1

A 6 mois, la motricité au niveau de la main intrinsèque était inexistante. Il n'y avait pas de contraction visible au niveau de la loge thénarienne (muscles court abducteur du *I*, opposant du *I*, court fléchisseur du *I* et adducteur du *I*), hypothénarienne (muscles abducteur du *V*, court fléchisseur du *V*, opposant du *V* et court palmaire), des muscles lombricaux (fléchisseurs des articulations métacarpo-phalangiennes (MCP), extenseurs des articulations interphalangiennes) et interosseux (fléchisseurs des articulations métacarpo-phalangiennes, abduction/adduction des doigts). A 12 mois, apparition de contractions visibles sans mouvement au niveau de la loge thénarienne lorsque le patient essaie une adduction du pouce, une opposition du pouce ou une flexion de l'articulation MCP. Les loges thénariennes et hypothénariennes sont en revanche amyotrophiques, malgré l'essai de stimulation par électrothérapie.

L'évolution des **amplitudes articulaires** passives de l'épaule, du poignet et du coude à 6 mois et 12 mois de la réimplantation est présentée dans le tableau 2. Nous avons utilisé un goniomètre qui permet de mesurer l'angle des articulations par rapport à la position neutre, les résultats sont exprimés en degrés (°). A 6 mois, les amplitudes articulaires des doigts étaient restreintes liées à l'absence de réveil musculaire de la main intrinsèque et une limitation marquée sur la flexion des articulations métacarpo-phalangiennes malgré les attelles de posture. A 12 mois, les amplitudes articulaires de l'épaule, du poignet et des doigts sont physiologiques exceptées les articulations MCP des IV et V<sup>èmes</sup> rayons n'autorisant que 20° de flexion, l'extension du poignet, limitée par la cicatrice rétractile face antérieure de l'avant-bras et la persistance d'un flessum de coude à 20°. La main droite a une attitude en griffe complète, mais réductible.



Tableau 2 : mesures des amplitudes articulaires de l'épaule, du coude et du poignet droits exprimées en degré (°) à 6 et 12 mois post-opératoire.

	<u>6 mois</u>	<u>12 mois</u>
<i>Epaule</i>		
- Antépulsion	150	160
- Rétropulsion	60	60
- Abduction	160	160
- Adduction	40	40
- Rotation externe	55	60
- Rotation interne	100	100
<i>Coude</i>		
- Flexion	140	150
- Extension	-30	-20
<i>Poignet</i>		
- Flexion	90	90
- Extension	70	70
- Inclinaison radiale	20	20
- Inclinaison ulnaire	40	40

Sur le plan **sensitif**, l'évolution est marquée par la persistance à 1 an du traumatisme d'allodynies mécaniques à type de décharges électriques et de brûlures provoquées au toucher par simple effleurement ou à la mobilisation du bras droit. Ces douleurs sont mal systématisées, et localisées face interne du bras (prédominante sur la cicatrice de réimplantation) et de l'avant-bras, et au niveau de la main. A 6 mois, apparition de sensations de tact déplacé au pli du coude associées à des sensation de pression forte face antérieure de l'avant-bras, détectable à l'aide du monofilament 6.65 (le plus épais). Les zones concernées sont précisées sur la figure 20. A 12 mois, le bilan sensitif est précisé sur la figure 21 ; nous avons observé l'apparition d'un tact grossier déplacé sur l'ensemble de la face antérieure du bras droit, sans distinction épicrotique (tact fin). Le patient est devenu capable de préciser la position de ses doigts dans l'espace yeux fermés (arthrokinésie). Il n'y avait pas de distinction chaud/froid sur le bras. Le signe de Tinel informe sur l'existence de régénération nerveuse. Des sensations de fourmillement à la percussion douce sur le trajet du nerf lésé correspondent à l'extrémité distale des fibres sensibles qui repoussent. Dans le cas de notre patient, un signe de Tinel est apparu sur le trajet du nerf ulnaire à 5 mois du début de la prise en charge à 2 cm sous le coude.

Figure 20 : zones de récupération sensitive à la pression forte (*orange*) et au tact déplacé (*rouge*) à 6 mois.

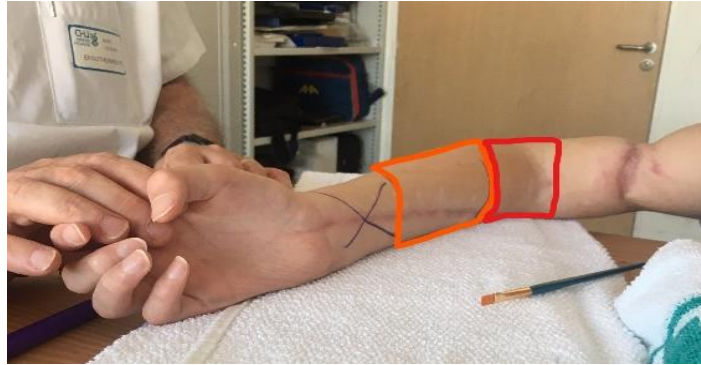
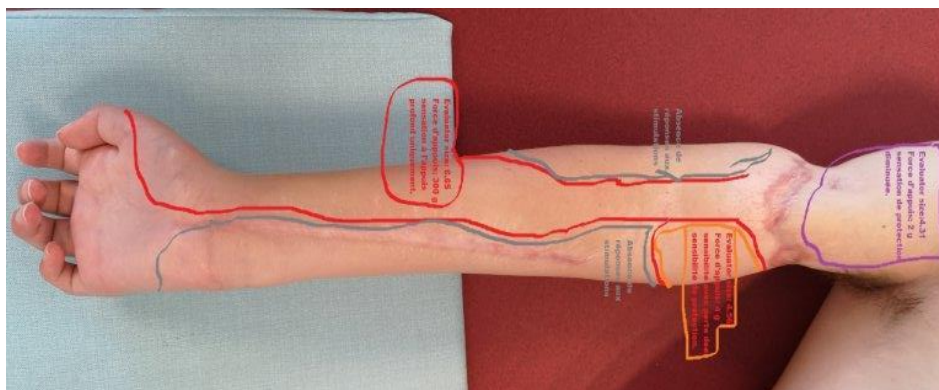


Figure 21 : zones de récupération sensibles à 12 mois. En *rouge* : sensation de pression profonde et de tact grossier déplacé (calibre du monofilament 6.65). En *orange* : absence de sensibilité tactile superficielle (calibre du monofilament 4.56). En *violet* : perte moyenne de la sensibilité tactile superficielle (calibre du monofilament 4.31). En *gris* : absence de réponse aux stimulations sensibles.



## 2) *Sur le plan électroneurophysiologique*

A 6 mois, les stimulations électriques des nerfs médian et ulnaire au poignet droit permette l'obtention d'une réponse corticale reproductible, avec la présence d'une onde N1 mal organisée et d'amplitude diminuée. Ces résultats sont compatibles avec la notion de potentiels évoqués somesthésiques (PES). A 9 mois, présence de PES d'amplitude moindre par rapport à la normale et moins bien organisées qu'en controlatéral. A gauche, le recueil des PES des nerfs médian et ulnaire est normal.

L'EMG de détection à 6 mois objective au repos des potentiels de dénervation de tous les muscles étudiés. A 9 mois, il existe des activités de repos au niveau des muscles opposant du I et abducteur du V, correspondant à des potentiels de dénervation des territoires médians et ulnaires. Lors des contractions, les activités électriques des muscles du bras droit sont précisées dans le tableau 3.

Tableau 3 : activités électriques des muscles du membre supérieur droit à 6 et 9 mois du traumatisme.

	<u>6 mois</u>	<u>9 mois</u>
<b>Opposant du I</b>	Pas d'activité	Pas d'activité
<b>Abducteur du V</b>	Pas d'activité	Pas d'activité
<b>FRC</b>	Activité simple accélérée à intermédiaire	Activité interférentielle
<b>ERC</b>	Activité intermédiaire	Activité interférentielle
<b>Biceps brachial</b>	Activité intermédiaire riche	Activité intermédiaire riche
<b>Deltoïde</b>	Activité interférentielle	Activité interférentielle

L'étude des VCN motrices ne montre pas de réponse significative à la stimulodétection des muscles opposant du I (nerf médian) et abducteur du V (nerf ulnaire), malgré la répétition de stimulations à haute intensité. Ces résultats sont valables à 6 et 9 mois.

### 3) *Cartographies d'activations cérébrales*

Les différents clusters d'activation cérébrales du patient sont disponibles en annexe 4.

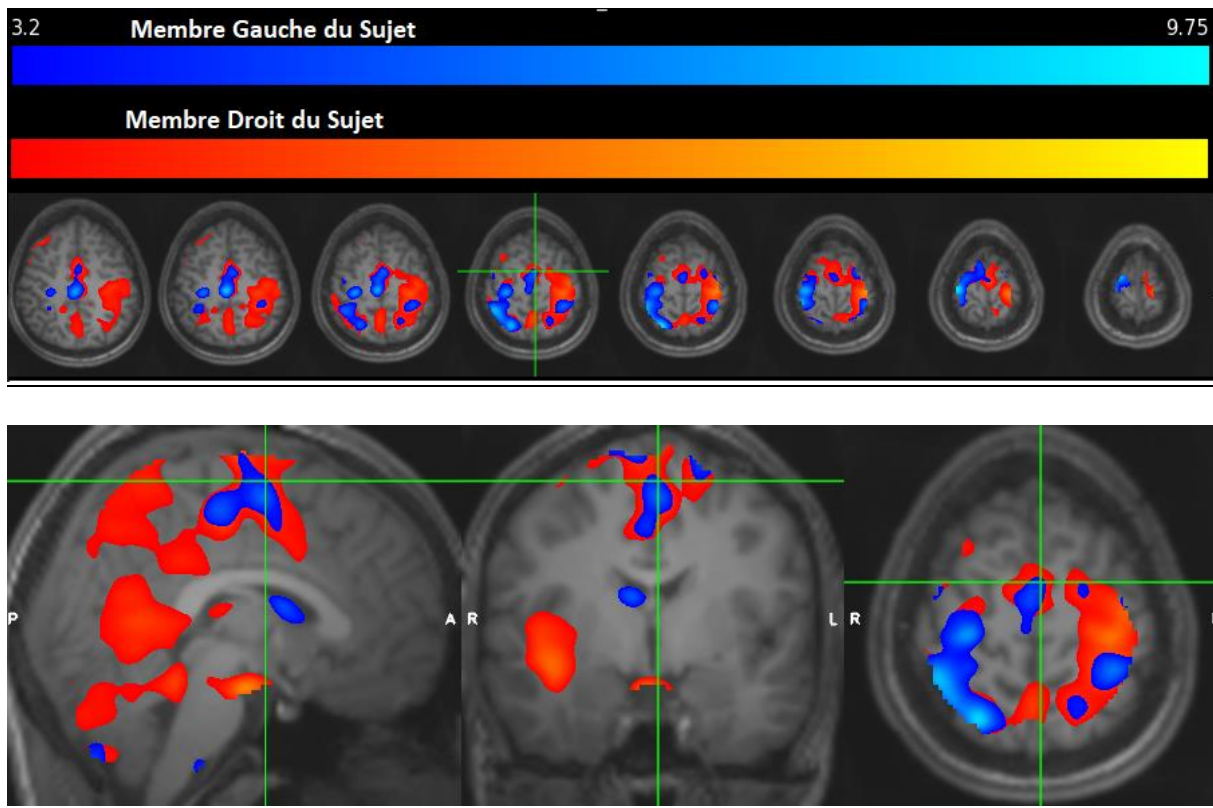
#### 2.1 *Mouvements de flexion et d'extension du bras : tâche ①*

##### 2.1.1 *Résultats du patient*

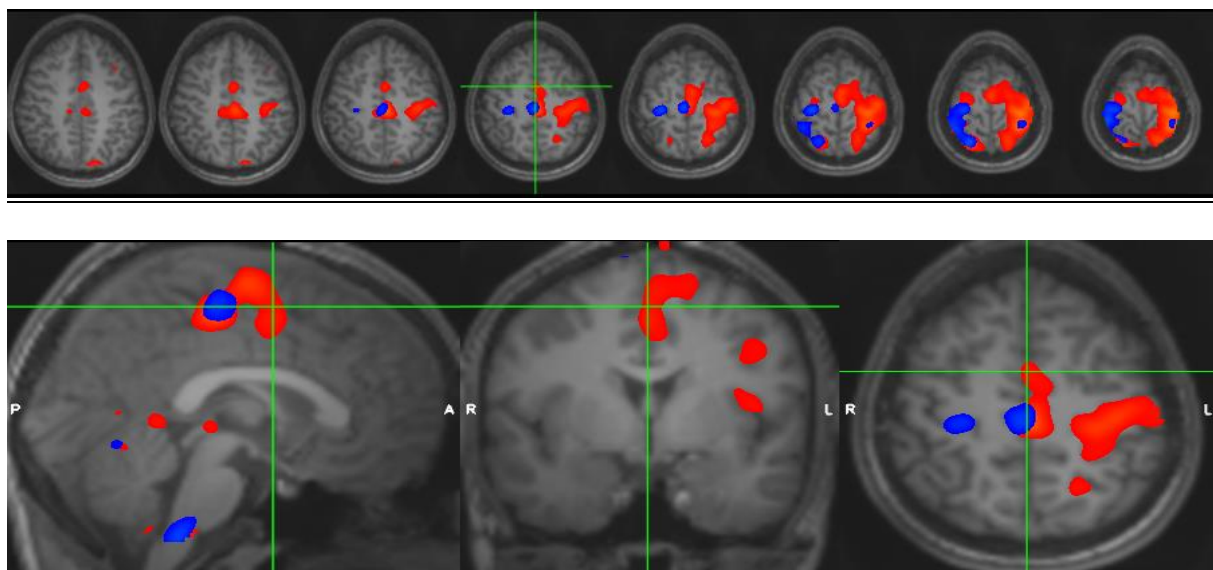
A 6 mois de la réimplantation (= T0), les activations associées aux mouvements du bras gauche (sain) sont intenses et elles sont majoritairement localisées dans l'hémisphère droit du sujet. Elles impliquent les gyrus précentral et postcentral, et s'étalent vers les régions pariétales au niveau des lobules pariétal supérieur et inférieur. L'aire motrice supplémentaire (AMS) est également impliquée dans cette tâche. Les mouvements du bras droit (lésé) activent un réseau d'aires situées dans l'hémisphère gauche, au niveau des gyrus pré et postcentral, de l'AMS, dans le gyrus temporal supérieur et dans le lobule pariétal supérieur. Des activations sont retrouvées aussi au sein du cervelet droit (Figure 22).

A 12 mois de la réimplantation (= T1), les activations associées aux mouvements du bras gauche sont localisées dans l'hémisphère droit. Elles impliquent le gyrus pré et postcentral, le cortex pariétal supérieur. On retrouve une faible activation de l'AMS. Les activations associées aux mouvements du bras droit sont localisées principalement dans l'hémisphère gauche, au niveau des gyrus pré et postcentral ainsi que l'AMS et le cervelet droit (Figure 23).

**Figure 22** : cartographies des régions anatomiques activées par le mouvement de flexion/extension du bras gauche superposées à celles activées par le mouvement de flexion/extension du bras droit à T0. Pour rappel, les coupes sont orientées selon la convention radiologique et les barres de couleurs expriment le Z-score.



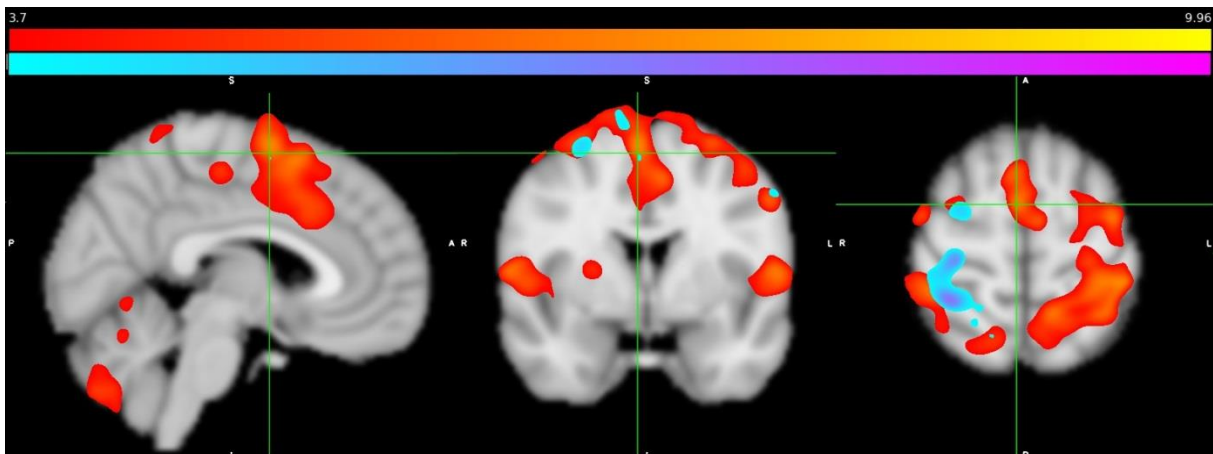
**Figure 23** : cartographies des régions anatomiques activées par le mouvement de flexion/extension du bras gauche superposées à celles activées par le mouvement de flexion/extension du bras droit à T1.



### 2.1.2 Résultats du sujet sain

La figure 24 montre chez un sujet sain, les activations dues aux mouvements du bras droit superposées à celles du bras gauche lors d'un mouvement de flexion/extension. Les mouvements du bras droit montrent des activations bilatérales, avec une légère prédominance de l'hémisphère gauche. Ces activations impliquent le gyrus précentral, AMS et le gyrus postcentral. Celles-ci couvrent également une partie du lobule pariétal supérieur et du précunéus. Les activations associées aux mouvements du bras gauche sont majoritairement situées du côté de l'hémisphère droit du sujet et impliquent principalement le gyrus précentral, le gyrus postcentral. Ces activations s'étalent également vers le cortex pariétal (lobule pariétal supérieur/inférieur et gyrus supramarginal).

Figure 24 : Vues sagittale, coronale et axiale des clusters d'activation associés aux mouvements du bras droit (rouge-jaune) et celles associées aux mouvements du bras gauche (bleu-violet).



## 2.2 Mouvement d'ouverture et de fermeture des doigts : tâche ②

### 2.2.1 Résultats du patient

A T0, les activations associées aux mouvements d'ouverture et de fermeture des doigts de la main gauche sont bilatérales, mais prédominent dans l'hémisphère controlatéral (droit). Le pic des activations a été localisé dans le gyrus précentral droit. D'autres foyers d'activations sont également observés dans le gyrus postcentral gauche, le gyrus temporal supérieur droit, l'AMS bilatérale ainsi que le cervelet gauche. Les activations associées aux mouvements d'ouverture et de fermeture des doigts de la main droite impliquent les gyri pré et postcentral gauches, le gyrus temporal supérieur gauche et l'AMS gauche. Pour rappel, à 6 mois et 12 mois le patient ne pouvait effectuer un mouvement complet d'ouverture et de fermeture de la main droite (Figure 25).

A T1, les activations associées aux mouvements de fermeture et d'ouverture de doigts gauche impliquent l'hémisphère droit en majorité, au niveau des gyrus pré et post centraux. L'AMS bilatérale est impliquée aussi (Figure 26). Les activations associées aux mouvements de fermeture et d'ouverture de doigts droits impliquent les gyrus pré et postcentral gauche ainsi que l'AMS gauche.

Même si les mouvements de fermeture et d'ouverture des doigts gauches et droits activent les mêmes aires contralatérales respectives, les volumes d'activations sont plus étendus lors du mouvement réalisé à gauche.

Figure 25 : cartographies des régions anatomiques activées par les mouvements d'ouverture et de fermeture des doigts superposées à celles activées par les mouvements de la main droite à T0.

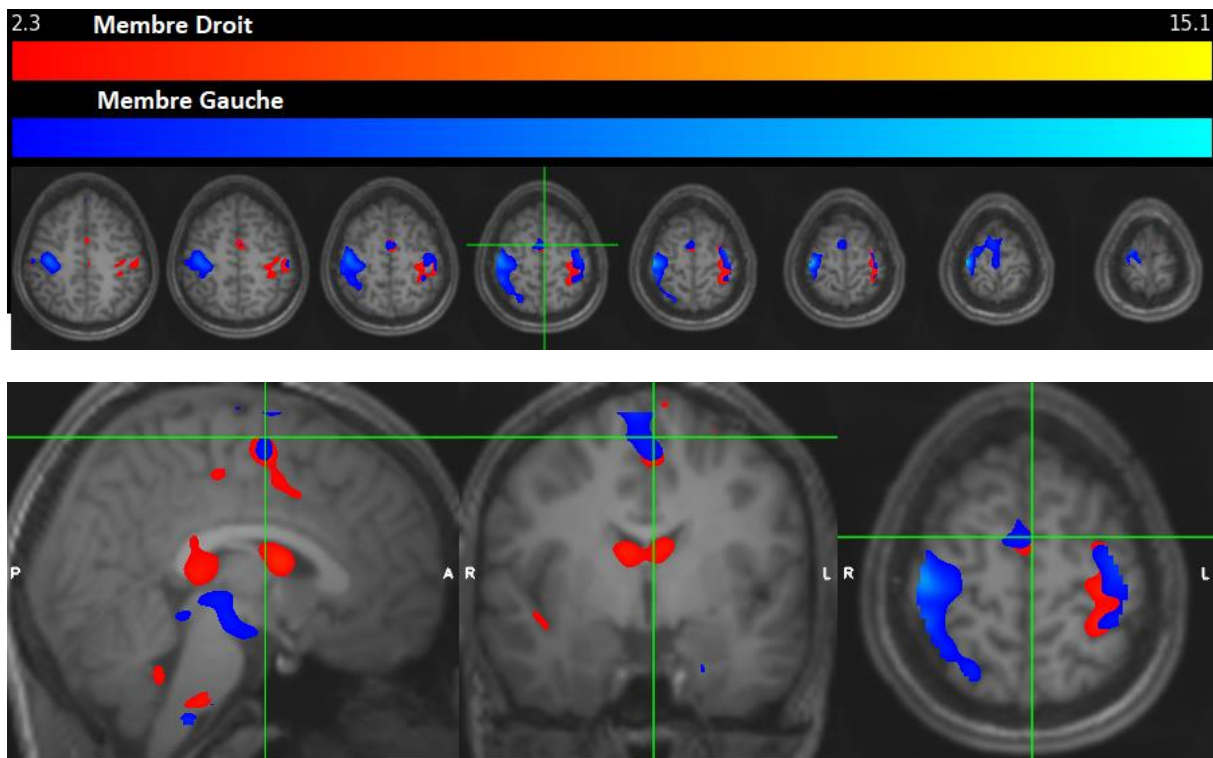
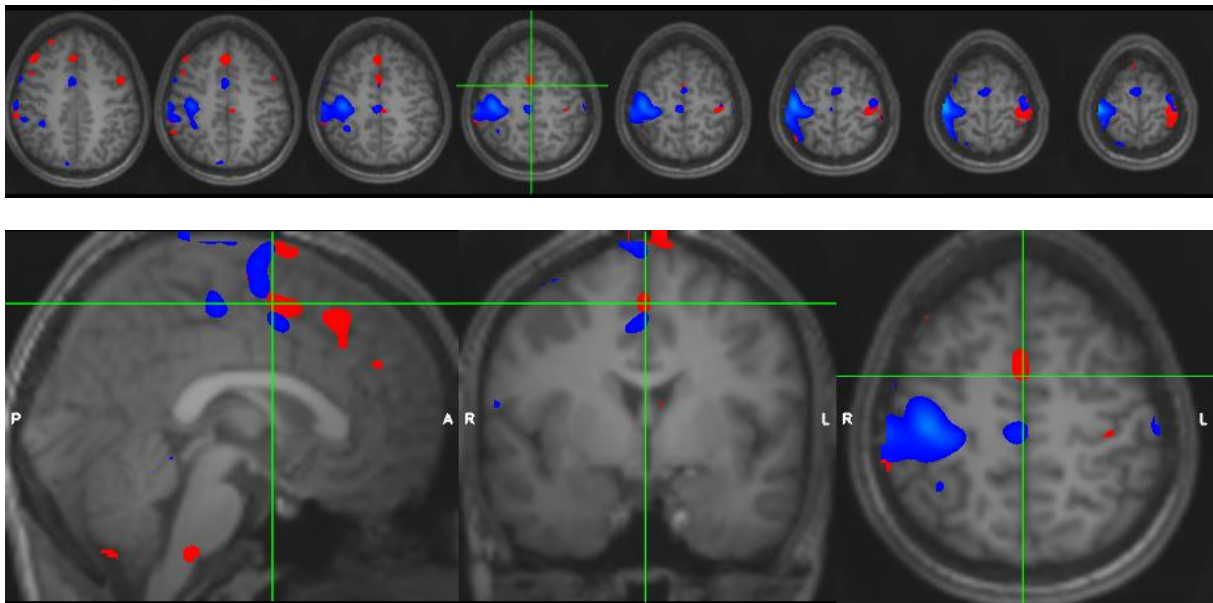




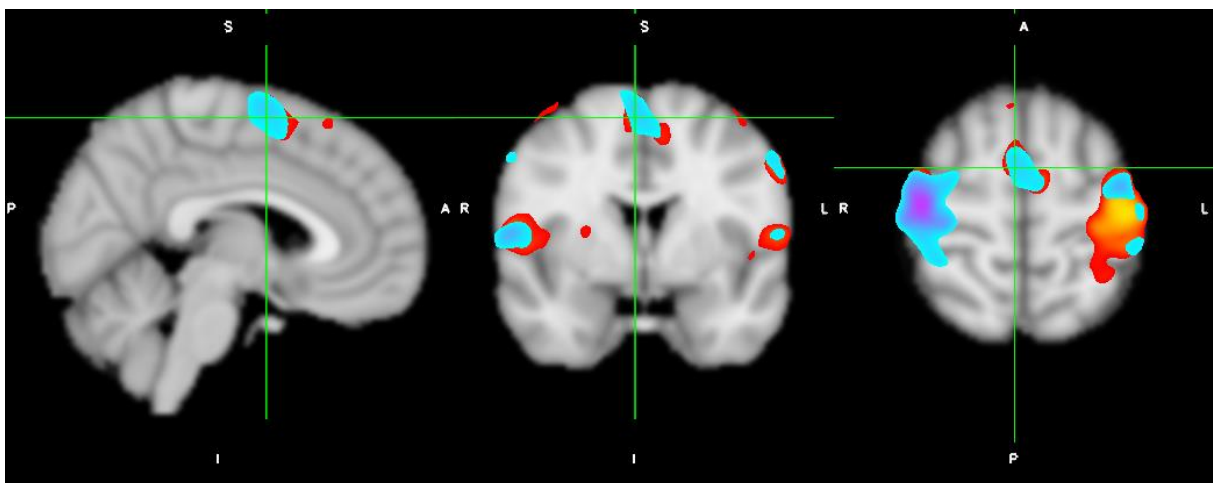
Figure 26 : cartographies des régions anatomiques activées par les mouvements d'ouverture et de fermeture des doigts la main gauche superposées à celles activées par les mouvements de la main droite à T1.



### 2.2.2 Résultats du sujet sain

La figure 27 montre chez un sujet sain, les zones d'activations dues aux mouvements d'ouverture et de fermeture des doigts de la main droite superposées à ceux de la main gauche. Dans l'ensemble, les foyers d'activation présentent une dominance plutôt unilatérale, située au niveau du coté controlatéral au mouvement. Ces activations impliquent pour chaque mouvement principalement l'AMS, le gyrus précentral, le gyrus post central et s'étalent vers le gyrus temporal supérieur.

Figure 27 : Vues sagittale, coronale et axiale des clusters d'activation associés aux mouvements de la main droite (rouge-jaune) et celles associées aux mouvements de la main gauche (bleu-violet).



## 2.3 Mouvements séquentiels des doigts ou finger-tapping : tâche ③

### 2.3.1 Résultats du patient

A T0, les activations lors du mouvement séquentiel des doigts gauches sont majoritairement situées dans l'hémisphère controlatéral (droit). Les aires activées concernent le gyrus précentral, le gyrus postcentral ainsi que l'AMS. Les mouvements séquentiels des doigts de la main droite n'étaient pas réalisables sur le plan clinique, nous avons demandé au patient de s'imaginer réaliser le mouvement (yeux fermés). Les activations sont localisées dans le gyrus pré et postcentral gauche ainsi que le lobule paracentral gauche. On retrouve aussi des activations moins intenses à droite, au niveau de l'AMS, du gyrus postcentral et du cervelet (Figure 28).

A T1, les activations lors du mouvement séquentiel des doigts gauches sont majoritairement situées dans l'hémisphère droit, au niveau des gyrus pré et post centraux et dans l'AMS. Les activations lors du mouvement séquentiel des doigts droits, qui n'a été qu'imaginé par le patient, sont situées au niveau de l'hémisphère gauche et droit au niveau des gyrus pré et postcentraux, ainsi que l'AMS. Les zones d'activation sont globalement plus étendues pour le mouvement séquentiel imaginé par le patient (à droite) que pour le mouvement effectué par le patient (à gauche) (Figure 29).

Même si les mouvements séquentiels des doigts gauches et droits activent les mêmes aires controlatérales respectives, le volume d'activation est plus étendu lors de l'imagination du mouvement à droite.

Figure 28 : cartographies des régions anatomiques activées par les mouvements séquentiels des doigts gauches superposées à celles activées par les mouvements séquentiels des doigts droits à T0.

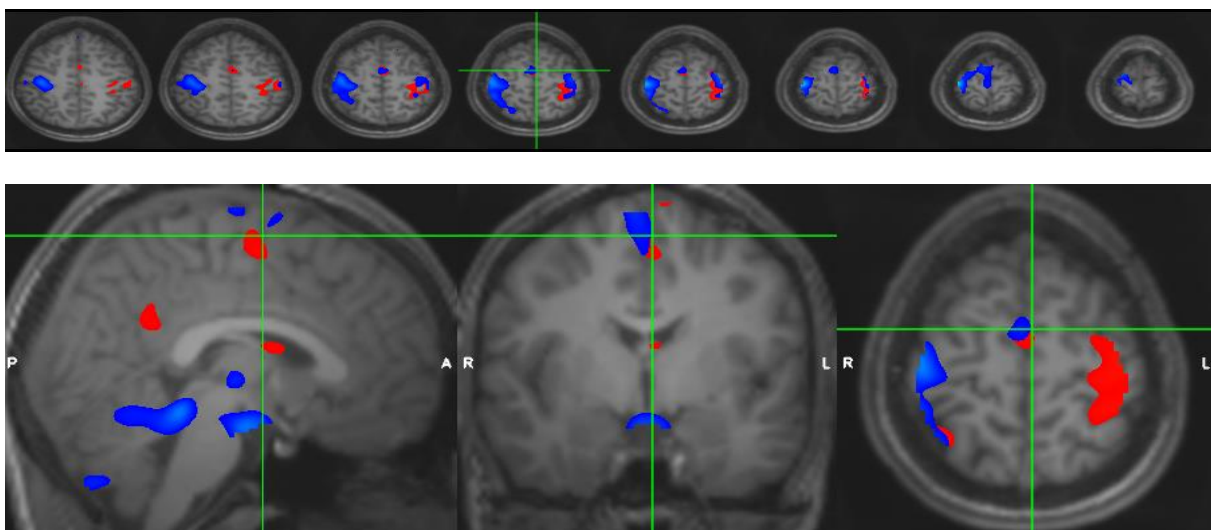
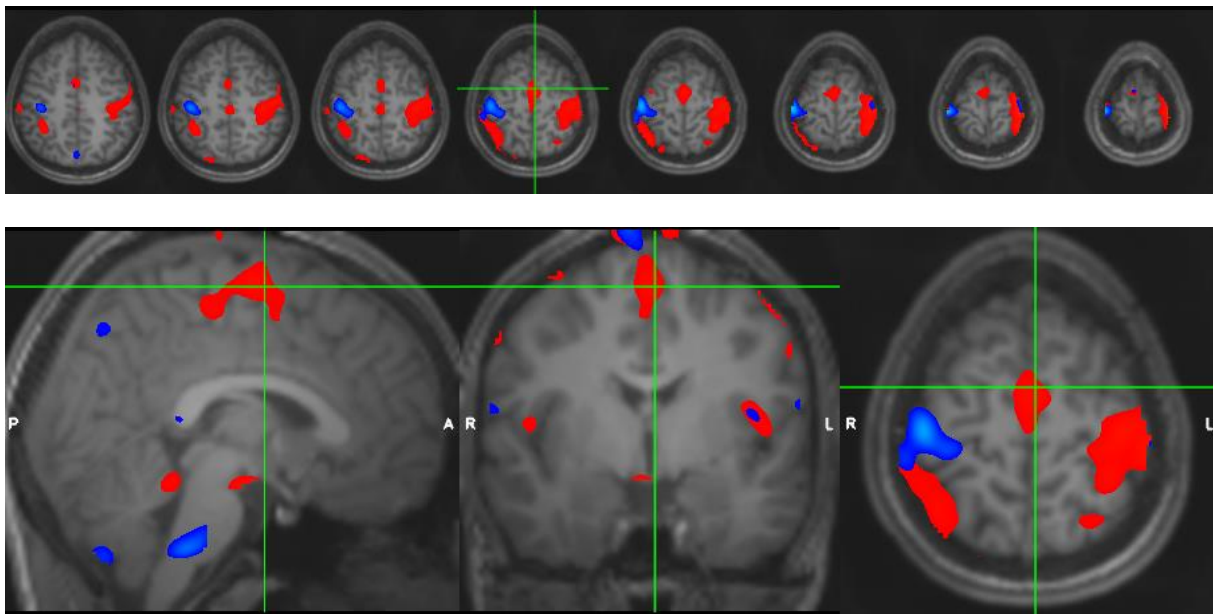




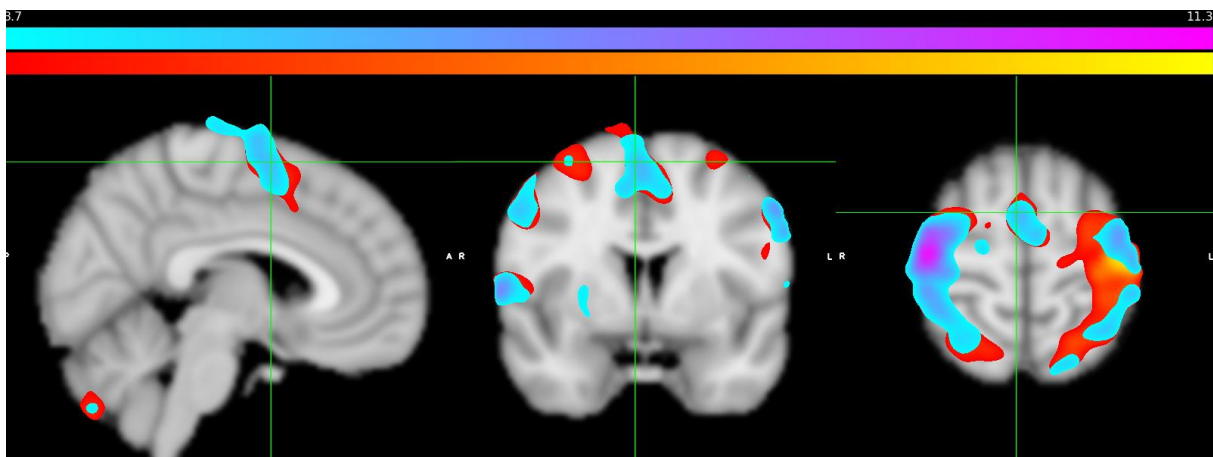
Figure 29 : cartographies des régions anatomiques activées par les mouvements séquentiels des doigts gauches superposées à celles activées par les mouvements séquentiels des doigts droits à T1.



### 2.3.2 Résultats du sujet sain

La figure 30 montre chez un sujet sain les zones activations dues aux mouvements d'opposition des doigts de la main droite superposées à celles des doigts de la main gauche. Les principales régions du cortex moteur sont activées au cours de chacune des 2 tâches (gyrus pré et postcentral, AMS) sont majoritairement controlatérales aux mouvements. Au cours de cette tâche, la localisation des activations est comparable à celle associée aux mouvements de la main. Mais les activations de cette dernière tâche sont moins étendues que celles associées aux mouvements d'opposition des doigts.

Figure 30 : vues sagittale, coronale et axiale des clusters d'activation associées aux mouvements d'opposition des doigts de la main droite (rouge-jaune) et celles associées aux mouvements d'opposition des doigts de la main gauche (bleu-violet).

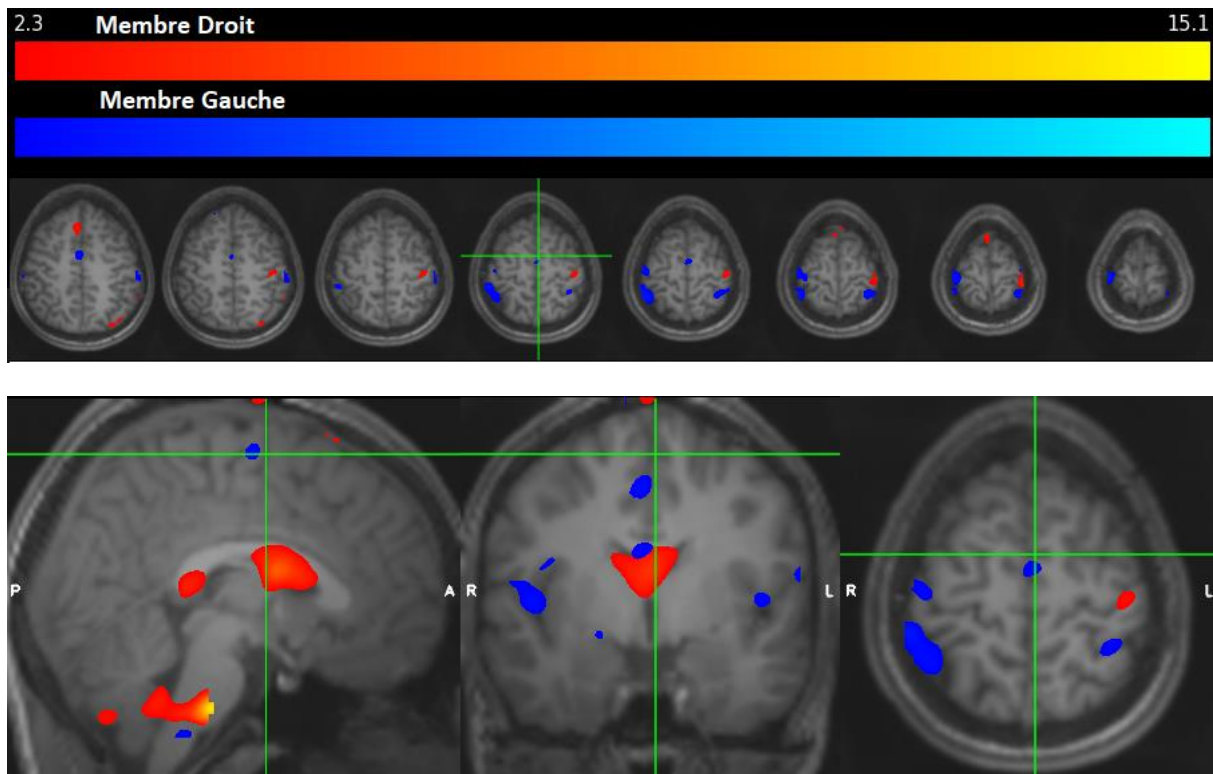


## 2.4 Stimulation sensitive du pouce : tâche ④

### 2.4.1 Résultats du patient

Cette tâche n'a été effectuée qu'à T1. La stimulation du pouce gauche montre des activations bilatérales (hémisphère droit et gauche) mais plus étendues à droite, au niveau du gyrus postcentral (aire 3, 1 et 2 de Brodmann), du gyrus supramarginal et du gyrus précentral (figure 31). La stimulation du pouce droit montre des activations unilatérales au niveau de l'hémisphère gauche. Elles concernent le gyrus postcentral (aire 3, 1 et 2 de Brodmann), le gyrus supramarginal et le gyrus précentral. On retrouve des activations au niveau du corps calleux.

Figure 31 : cartographies des régions anatomiques activées par la stimulation sensitive du pouce droit superposée à celles activées par la stimulation sensitive du pouce gauche à T1

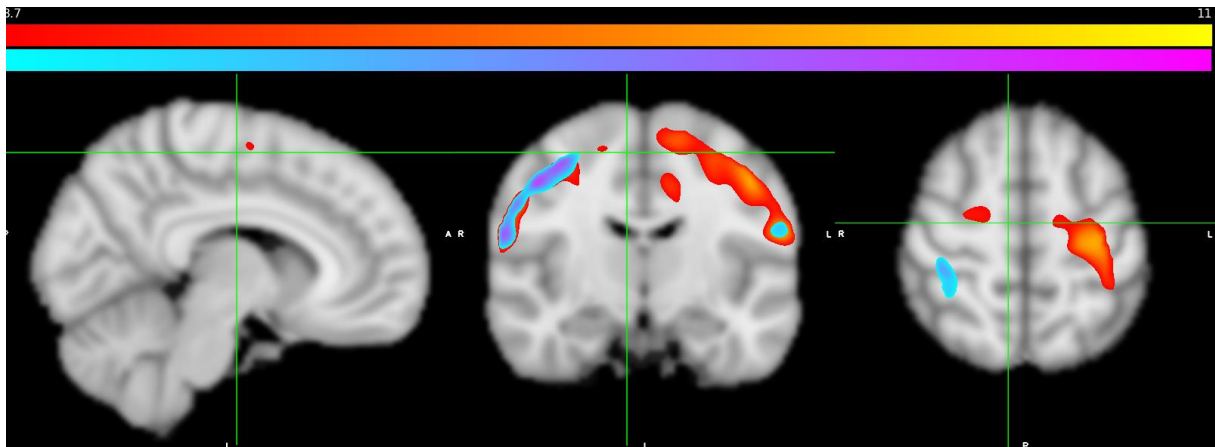


### 2.4.2 Résultats du sujet sain

La figure 32 montre chez un sujet sain, les zones activations dues à la stimulation sensitive du pouce droit superposées à celles du pouce gauche. Les activations impliquent les régions du cortex somatosensoriel primaire controlatérales à la stimulation majoritairement, et sont situées au niveau du gyrus postcentral (aires de Brodmann 3, 1 et 2). Elles impliquent aussi le gyrus

temporal supérieur et le cortex pariétal (lobule pariétal inférieur et gyrus supra marginal), mais non visualisées sur les coupes.

Figure 32 : vues sagittale, coronale et axiale des clusters d'activation associées à la stimulation sensitive du pouce droit (rouge-jaune) et celles associées à la stimulation sensitive du pouce gauche (bleu-violet).

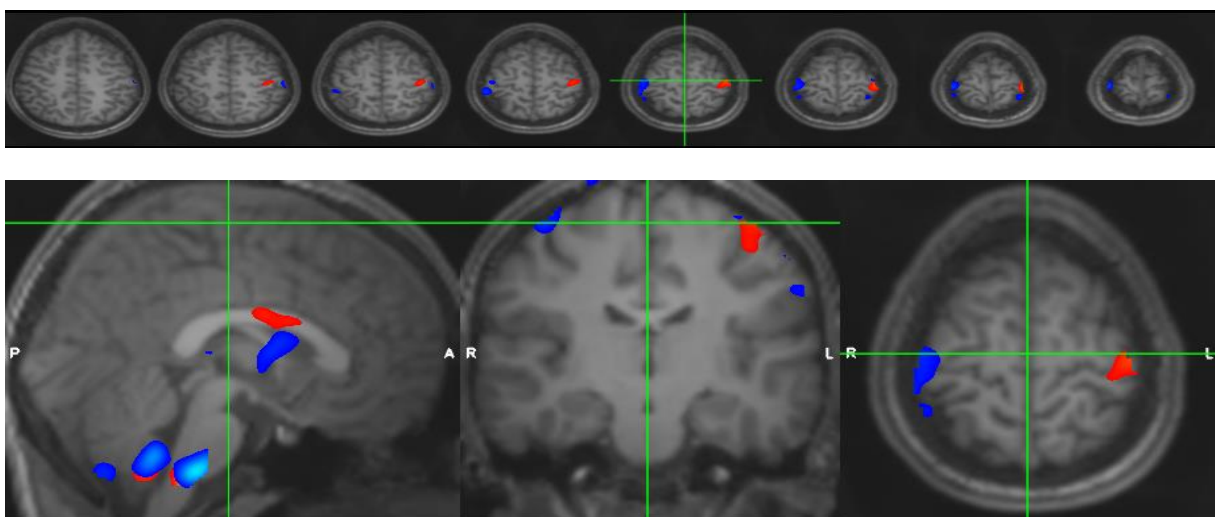


## 2.5 Stimulation sensitive de l'index et du majeur : tâche ⑤

### 2.5.1 Résultats du patient

Cette tâche n'a été effectuée à T1. La stimulation de l'index et du majeur gauche montre des activations bilatérales, mais globalement plus étendues à droite. Elles concernent le gyrus postcentral (aire 3, 1 et 2 de Brodmann), le gyrus précentral et le gyrus supramarginal. La stimulation de l'index et du majeur droit montre des activations unilatérales, au niveau de l'hémisphère gauche. Elles concernent le gyrus postcentral (aire 1 et 3 de Brodmann) et le gyrus précentral. (Figure 33)

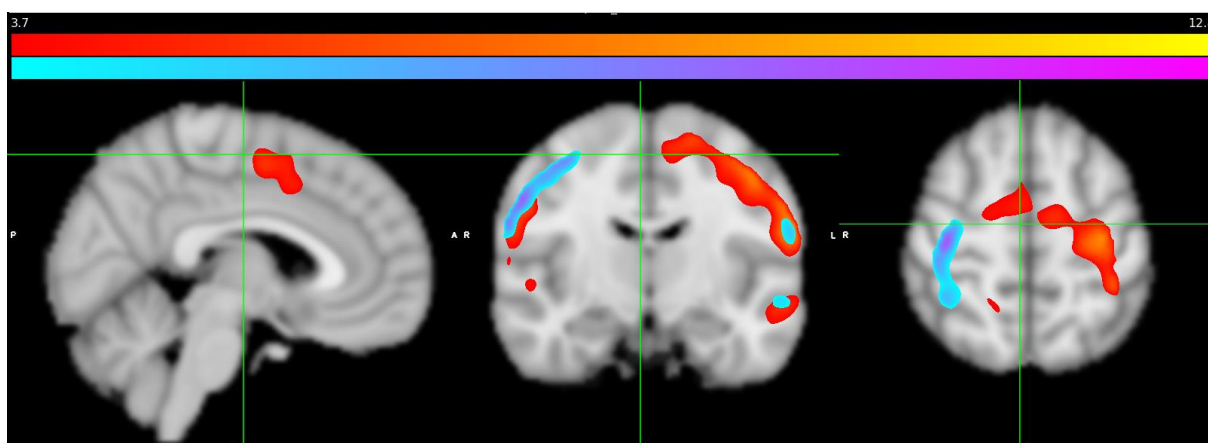
Figure 33 : cartographies des régions anatomiques activées par la stimulation sensitive de l'index et du majeur droits superposées à celles activées par la stimulation sensitive de l'index et du majeur gauche à T1.



### 2.5.2 Résultats du sujet sain

La figure 34 montre chez un sujet sain, les zones activations dues à la stimulation sensitive de l'index et du majeur droits superposées à celles de l'index et du majeur gauche. Les activations sont plutôt controlatérales dans chacune de ces 2 tâches. Elles se localisent dans le gyrus pré et postcentral (aire 3, 1 et 2 de Brodmann), le gyrus temporal et les régions pariétales.

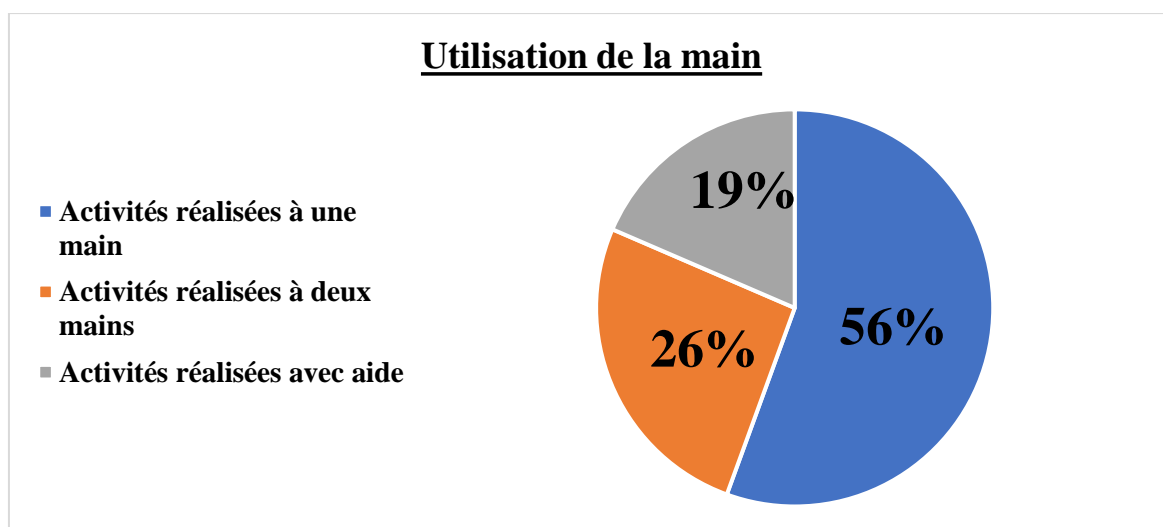
Figure 34 : vues sagittale, coronale et axiale des clusters d'activation associées à la stimulation sensitive de l'index et du majeur droits (rouge-jaune) et celles associées à la stimulation sensitive de l'index et du majeur gauches (bleu-violet).



#### 4) Bilan fonctionnel et qualité de vie

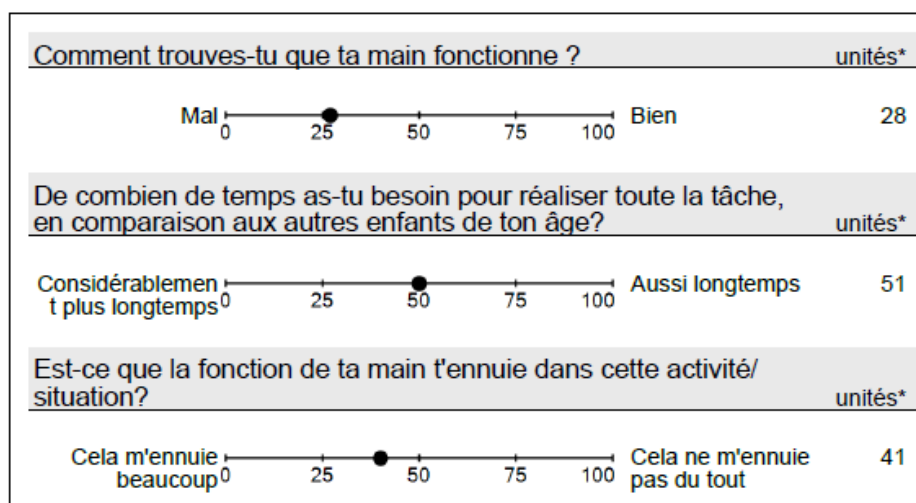
Les résultats du test **CHEQ** évaluent le ressenti du patient sur la récupération fonctionnelle gestuelle dans les actes de la vie quotidienne (AVQ) à 12 mois (Figure 35). Le rapport entier est disponible en annexe 5. La majorité des AVQ sont effectuées avec la main saine gauche (56%) : le patient considère dans l'ensemble que l'usage de sa main droite est inutile, mais cela l'ennuie beaucoup. 26% des tâches sont réalisées à deux mains, le patient considère que sa main droite est suffisamment fonctionnelle mais cela l'ennuie toujours beaucoup. Que ça soit pour les AVQ réalisées à 1 ou 2 mains, il ne considère pas pour autant avoir besoin de plus de temps pour réaliser ces tâches. Enfin, 19% des tâches sont réalisées avec aide : celles qui imposent de la dextérité fine bimanuelle avec suffisamment de force pour y parvenir (couper des aliments). Il estime que dans ces situations, sa main droite fonctionne mal et le temps est considérablement allongé ; c'est dans ces cas-là qu'il estime être le plus contrarié.

Figure 35 : Utilisation de la main dans les AVQ



En figure 36, les 3 variables dont les scores bruts ont été transformés par une analyse de Rasch sur une échelle de 0 à 100 unités. Quelle que soit la question posée, le questionnaire reflète les capacités propres du patient en fonction de son déficit. Par exemple, le patient estime que sa main droite fonctionne au quart de ses capacités maximum par rapport à sa main saine. Il évalue avoir besoin de deux fois plus de temps pour réaliser une AVQ en général.

Figure 36 :



Il a pu effectuer sa rentrée scolaire en classe de seconde générale en septembre 2020. Il prend tous ses cours de la main gauche. Le dernier bilan BHK (Echelle d'évaluation rapide de l'écriture chez l'enfant) montre que le patient peut écrire 202 caractères avec la main gauche en 5 minutes de copie (- 3 écarts-type pour le niveau de classe de 3<sup>ème</sup>). Il ne pratique aucune activité physique et sportive en dehors de l'école pour l'instant. Ses occupations concernent

essentiellement de passer du temps avec ses amis. Il est remonté à cheval quelque fois. Un projet de réadaptation au tennis a été proposé au patient. Sur le plan rééducatif, le patient poursuit les séances de kinésithérapie en libéral à raison de 3 fois par semaine, après l'école. Il continu à être suivi sur le plan psychoaffectif par un pédopsychiatrie de ville.

Les résultats du questionnaire **KIDSCRENN-52** concernant la qualité de vie du patient sont présentés en annexe 6.

#### **IV. DISCUSSION**

##### ***1) Récupération fonctionnelle et limitation des restrictions de participation***

Ce travail a pour but d'évaluer les facteurs favorisant le bénéfice fonctionnel à long terme d'une réimplantation de membre supérieur, dans un contexte d'amputation traumatique chez l'adolescent. Nous souhaitons également déterminer le retentissement du traumatisme physique et psychologique sur la qualité de vie, dont les séquelles se répercutent tout au long du développement de ces jeunes patients.

Le questionnaire CHEQ à 12 mois montre que le patient effectue plus d'un quart des activités de la vie quotidienne à 2 mains, mais sa main droite sert d'appoint car la préhension est inefficace de ce côté. Les résultats du questionnaire KIDSCREEN-52 montre que le patient est satisfait de son retour à la maison, qu'il est bien entouré de sa famille et ses amis. A la question « As-tu une maladie ou un problème de santé chronique ? », le patient a répondu non, probable reflet du déni de l'atteinte ou la considération qu'une déficience physique ne correspond pas à ces définitions selon lui. Les restrictions de participation à la vie en société (école et reprise du sport) n'ont pas été entravées par l'absence de récupération, mais plutôt par le processus lent d'acceptation des déficiences motrices et des incapacités de préhension par le membre supérieur droit.

Nos résultats ont montré qu'à 1 an du traumatisme, l'évolution clinique est favorable avec une récupération motrice du membre supérieur prédominante sur sa partie proximale, le réveil musculaire de la main étant encore inefficace pour permettre une motricité fine. La stagnation de la récupération motrice est observée entre 6 mois et 12 mois, malgré un programme rééducatif soutenu pluridisciplinaire et pluriquotidien, adapté au patient. La littérature faisait

état de l'importance d'une récupération des muscles intrinsèques de la main, que nous n'avons pas retrouvé chez notre patient à 12 mois. Les muscles intrinsèques ne répondaient pas à la stimulation électrique transcutanée laissant penser à une amyotrophie des fibres musculaires dénervées.

Il est intéressant de comparer nos résultats avec ceux de jeunes patients ayant subi une amputation définitive. Quels avantages et quels inconvénients peuvent bénéficier les patients ayant été opérés d'une réimplantation de bras, à l'inverse de ceux utilisant une prothèse ? Le gain esthétique n'est pas négligeable. Sur le plan fonctionnel, l'exemple d'une jeune fille qui a subi une amputation bilatérale proximale humérale par arrachement à l'âge de 7 ans [62]. Elle a bénéficié d'une réimplantation de son bras gauche (non dominant) et une amputation définitive de son bras droit. A 12 ans, elle utilisait plus son bras gauche dans les AVQ (s'habiller, ouvrir et fermer une fermeture éclair, se coiffer...), bien que la dextérité fine soit faible. Elle n'utilise sa prothèse que pour aller à l'école (finalité esthétique). L'étude menée par Graham et son équipe montre que la réimplantation est en faveur de meilleurs résultats fonctionnels par rapport à l'amputation définitive et au port de prothèse. Tous les patients de cette étude ont subi une amputation majeure. Il n'est pas précisé si les prothèses sont mécaniques ou myoélectriques [63]. La récupération d'une sensibilité et le bien-être psychologique semblent être deux avantages de la réimplantation par rapport au port de prothèse [64]. L'amputation traumatique sous le coude semble avoir des résultats fonctionnels similaires après une réimplantation de membre qu'avec l'utilisation d'une prothèse.

Les résultats de la récupération motrice corroborent avec ceux d'études précédentes [62,65] Même avec un temps d'ischémie relativement allongé, une amputation par arrachement peut donner des résultats satisfaisants en termes de récupération motrice, notamment pour le coude et le poignet. Les facteurs favorisant sont, outre les capacités de repousse axonale plus rapide chez l'enfant, la distance plus courte à parcourir jusqu'aux muscles à réinnover. Si la vitesse de repousse axonale est considérée à 1 mm/jour, il n'est pas finalement pas étonnant que les muscles en distalité ne montrent pas encore de signe en faveur d'un réveil musculaire. Cela est suggéré par les résultats de EMG en stimulodétection, où les vitesses de conduction nerveuse des muscles opposant du I et abducteur du V ne sont pas mesurables. L'absence d'évolution entre 6 mois et 12 mois peut s'expliquer pour plusieurs raisons. La dénervation chronique des muscles distaux entraîne une amyotrophie avec une diminution du nombre et de la taille des fibres musculaires, limitant les capacités de récupération. Par ailleurs, il semblerait que les



muscles dénervés à long terme peuvent inhiber les capacités de régénération axonale des motoneurones [66].

La récupération sensitive est hétérogène et le patient reste assujéti à de fréquentes douleurs neuropathiques mal systématisées, dominées par les allodynies mécaniques. Il n'a pas récupéré de sensibilité de protection (sensibilité thermo-algique), normalement stade initial dans le recouvrement de la sensibilité après lésions nerveuses périphériques (Classification de Dellon, annexe 7). Elle est primordiale pour que le patient évite de se blesser dans les actes de la vie quotidienne. Il existe un « profil sensitif » chez les patients qui ont bénéficié d'une réimplantation de membre supérieur [67,68], qui ne correspond pas tout à fait à la récupération sensitive de notre patient :

- Hypoesthésie superficielle (tact grossier/protopathique), secondaire à une diminution de la densité des fibres nerveuses intra-épidermique A $\beta$ .
- Hypoesthésie thermique (chaud/froid), expliquée par une modification des propriétés physiologiques des fibres A $\delta$  et C. Les fibres régénérées sont de diamètre plus petit, les gaines de myéline sont moins épaisses et les espaces internodaux (de Ranvier) sont plus courts. La vitesse de conduction est diminuée et le seuil d'excitabilité est augmenté.
- Hyperalgésie à la pression. L'hyperalgésie est différente de l'allodynie, le seuil de déclenchement des influx nociceptifs est abaissé responsable d'une perception anormalement forte de la douleur. Cette « sensibilisation périphérique » des nocicepteurs est liée à des stimulations nociceptives répétées.

Dans ce profil sensitif « typique », la fréquence des allodynies mécanique est faible, alors qu'elles prédominent chez notre patient. Ces douleurs peuvent s'expliquer par le phénomène de « sensibilisation centrale », forme de plasticité synaptique activité-dépendant. En réponse à une lésion nerveuse périphérique, il apparaît précocement une activité électrique spontanée des fibres nerveuses lésées (A $\delta$ ) [69]. Ces décharges ectopiques répétées renforcent l'activité synaptique de ces fibres au niveau de la corne dorsale de la moelle : la potentialisation à long terme (PLT). Une diminution des seuils de perception douloureuse est alors retrouvée ainsi qu'une hyperexcitabilité à l'origine de réponse exagérée et un élargissement des champs récepteurs cutanés [70]. C'est un exemple de plasticité cérébrale « maladaptative ». Ces allodynies mécaniques peuvent aussi s'expliquer par des modifications structurales au niveau de la corne dorsale de la moelle. Après lésion du SNP, un bourgeonnement excessif des neurones impliqués dans la sensibilité superficielle véhiculée par les grosses fibres myélinisées A $\beta$  (couche III à V de Rexed) se dirigeraient vers les couches I et II, impliquées dans le



traitement des informations thermoalgiques véhiculées par les fibres A $\delta$  et C [71]. Ainsi, un stimulus non douloureux (le tact) le devient en sollicitant les fibres de la douleur. Cette théorie est actuellement controversée.

Enfin, après lésion puis réparation d'un tronc nerveux, les erreurs d'orientation au cours du processus de réinnervation peuvent persister de nombreuses années, et ne sont pas forcément corrigées par la plasticité cérébrale.

## 2) *Plasticité cérébrale intra-hémisphérique*

A travers l'apprentissage et la répétition de mouvements, la plasticité cérébrale favorise la réorganisation du cortex moteur. Cette notion est valable pour des situations « physiologiques » : les joueurs de piano professionnels acquièrent une surreprésentation des muscles de la main au niveau du cortex M1 des 2 hémisphères, favorisant le développement accru de la coordination bimanuelle et de la dextérité [72]. Le lien entre plasticité cérébrale et récupération fonctionnelle a été démontrée à plusieurs reprises dans le cas de pathologies du SNC (les accidents vasculaires cérébraux par exemple [35]).

Chez notre patient, les résultats des IRM fonctionnelles d'activation à 6 et 12 mois sont hétérogènes. Pour les mouvements de flexion et d'extension des membres supérieurs gauche et droit, à T0 nous constatons une activation des mêmes aires motrices controlatérales respectives, avec des volumes d'activation semblables. Ces résultats sont concordants avec l'étude menée par Piza-Katzer et son équipe. Après réimplantation immédiate d'une main dans un contexte d'amputation traumatique, pour un mouvement d'ouverture et de fermeture des doigts, les zones d'activations cérébrales du cortex moteur sont superposables pour les hémisphères contra et ipsilatéraux (M1, AMS, S1 et cortex prémoteur controlatérales) à 6 mois et 12 mois du traumatisme. Ils suggèrent qu'une amputation à court terme (= réimplantation immédiate) entraîne une réorganisation corticale fonctionnelle [73]. Dans un premier temps, nous assistons à une expansion des représentations corticales voisines saines (celles de la face par exemple) au niveau de la zone désafférentée (celle du bras). Secondairement, la réinnervation progressive du membre réimplanté permet la « réapparition » de la zone corticale correspondante. Il apparaît de nouvelles représentations corticales du bras, qui viennent remplacer les zones des représentations corticales voisines saines [74]. Par ailleurs, ce patient a la particularité d'être joueur de polo professionnel, sport qui impose l'utilisation d'un maillet exclusivement à droite. Si le postulat posé est que le volume d'activation cérébral est lié au développement de l'aire

cérébrale concernée, alors les entraînements soutenus et répétés ont dû favoriser le développement du cortex M1 de l'hémisphère gauche (controlésionnel). Cela peut expliquer la similitude des volumes d'activations des gyrus pré central gauche et droit, associés aux mouvements de flexion/extension du bras droit et gauche. Nous sommes dans le cas de la plasticité corticale.

Cette étude nous a permis d'illustrer le phénomène de vicariance (plasticité cérébrale post-développementale). Pour les mouvements de flexion/extension du bras droit, il est constaté à T0 un recrutement de zones d'activations cérébrales non dédiées à la motricité (le lobule pariétal supérieur impliqué dans le traitement visuospatial et le gyrus temporal inférieur dans le processus d'association visuelle comme l'expression faciale [75]). Elles ne sont pas retrouvées à T1. La vicariance permet la prise en charge d'une fonction par une autre zone cérébrale saine à distance de la lésion.

L'acquisition d'une compétence motrice semble se caractériser en deux étapes : une phase « rapide » d'apprentissage, dans laquelle les performances s'améliorent rapidement. Puis une étape d'apprentissage à long terme, plus lente, pour laquelle l'efficacité du mouvement augmente progressivement [76]. C'est le cas de notre patient, où les progrès ont été rapides les six premiers mois de la prise en charge rééducative, avec une évolution lentement favorable par la suite. L'AMS est impliquée dans l'initiation et la planification d'un mouvement complexe (AMS), et participe aussi à l'acquisition de nouvelles séquences motrices (pré-AMS). Les volumes d'activation de l'AMS augmentent entre T0 et T1, en parallèle de la récupération motrice, car le patient est encore en phase d'apprentissage. Il n'a pas encore acquis l'automatisme du geste (flexion/extension du bras, ouverture et fermeture des doigts) [77]. L'activation du cervelet au cours des tâches motrices est dû à son rôle actif en phase initiale d'apprentissage, cette activité diminue avec la pratique et peut même devenir quasiment indétectable lorsque les mouvements séquentiels deviennent plus automatiques [78]. Dans le cas de notre patient, le mouvement du bras droit entraîne une activation du cervelet droit à T0 et T1, qui n'est pas retrouvée lors du mouvement du bras gauche. A long terme, la réalisation d'une tâche acquise implique plus les régions corticales motrices (M1, S1, AMS) [79].

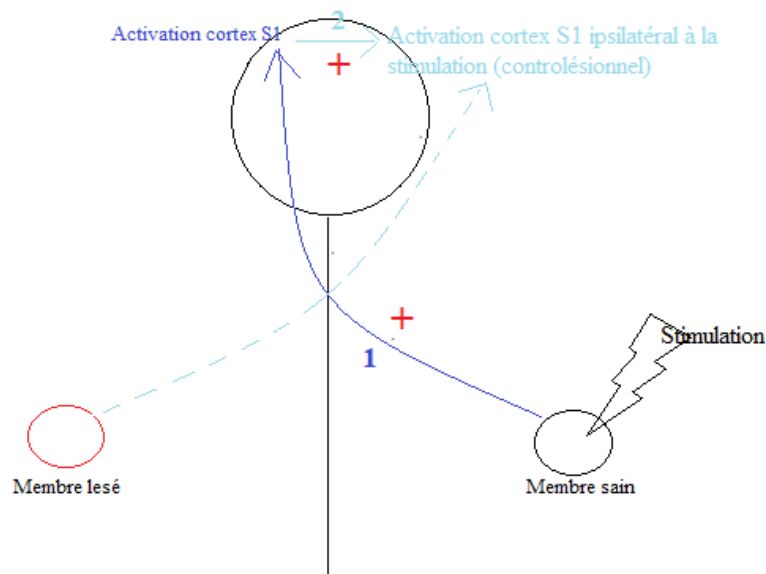
L'activation des aires motrices au cours de l'*imagination* du mouvement séquentiel de la main droite nous permet d'introduire le concept d'imagerie mentale (IM). C'est la simulation mentale consciente d'une action qui va impliquer les représentations motrices de notre cerveau semblables à celles lorsque nous effectuons réellement ce mouvement [80]. Héту et son équipe

ont voulu identifier les zones d'activations cérébrales à l'IRMf au cours de l'imagerie mentale [81]. Lorsque le patient imagine l'exécution d'un mouvement du membre supérieur (imagerie mentale "visuelle"), il est observé une activation controlatérale des aires du cortex fronto-pariétal et cérébelleux. Quand il imagine l'exécution d'un mouvement avec pour consigne supplémentaire d'imaginer ressentir le mouvement (imagerie mentale "kinesthésique"), les zones d'activations cérébrales sont plus nombreuses. L'activation du cortex M1 pendant le processus d'IM était inconstante. D'autres études utilisant la stimulation magnétique transcrânienne ont montré que l'IM peut augmenter l'excitabilité du cortex M1 [82,83]. Les zones d'activations cérébrales au cours de l'imagerie mentale et de la réalisation d'un mouvement sont semblables, avec des aires largement impliquées dans la programmation et l'exécution du mouvement. La réponse motrice associée au processus d'imagerie mentale et d'activation du cortex moteur est variable. Guillot a montré une augmentation significative de l'activité EMG des muscles du bras chez des volontaires sains qui devaient imaginer soulever des haltères, par rapport à des volontaires sains qui les soulever réellement. Aucune contraction musculaire efficace n'a été détectée dans le groupe "imagerie mentale" [84]. Il n'y pas eu d'études sur l'efficacité de la rééducation par imagerie mentale seule ou en complément de rééducation dans les atteintes du SNP. Bien que la récupération motrice soit pauvre en distalité du membre, c'est bien la plasticité corticale qui est mise en jeu. Les volumes d'activations cérébrales controlésionnels pour le finger-tapping droit (tâche imaginée) sont bien plus étendus que pour la tâche finger-tapping gauche (mouvement effectué) à T0 et T1. Ces résultats reflètent les effets de la thérapie miroir, utilisée pour guider la récupération motrice distale du membre réimplanté. Même si l'imagerie mentale s'appuie sur une information visuelle *stockée en mémoire* plutôt qu'une information fournie directement par la perception, le bras réimplanté était situé du côté non réfléchif du miroir (donc non visible pour le patient). L'observation du reflet des mouvements de la main saine dans le miroir favorise la production d'imagerie motrice de la main parétique.

### 3) *Plasticité cérébrale interhémisphérique*

Les cartes d'activations cérébrales obtenues après stimulation sensitive des doigts chez notre patient nous amènent à parler de la plasticité cérébrale interhémisphérique, ou plasticité cortico-corticale. Elle se caractérise en IRMf par **une activation du cortex désafférenté ipsilatérale aux afférences sensorielles issues d'une partie intacte du corps (=controlésionnel), alors qu'il existe aussi une activation dans la zone cérébrale controlatérale (figure 37).**

Figure 37 :



Lors de la réalisation d'un mouvement chez un sujet sain, il est retrouvé une activation des aires motrices controlatérales et une inhibition du cortex homolatéral : on parle d'inhibition interhémisphérique transcallosale [85]. Le corps calleux est une structure cérébrale composée de substance blanche qui connecte les deux hémisphères cérébraux. Il permet le transfert d'informations entre ces deux structures et leur coordination. L'activation du cortex désafférenté après stimulation du côté sain repose sur le déséquilibre de la balance interhémisphérique. Par exemple, chez l'Homme, après section puis réparation d'un nerf médian, la stimulation de la main saine entraîne une augmentation de l'activation du cortex SI ipsilatéral (= contralésionnel) en plus du cortex controlatéral. Cette modification du cortex S1 ipsilatéral peut être due à une désinhibition interhémisphérique, associée à des modifications de signaux afférents vers le cortex somatosensoriel primaire désafférenté [86]. Cependant, même chez des sujets sains, il a été retrouvé une activation bilatérale du cortex somatosensorielle après une stimulation tactile de la main dans le territoire du nerf médian [87].

Nous pensons que cette plasticité cérébrale interhémisphérique peut être délétère pour la récupération fonctionnelle après lésion du SNP, elle pourrait entrer en compétition avec la plasticité cérébrale intra-hémisphérique. Cela a été démontré chez des rats adultes, où il est observé que le phénomène de plasticité cérébrale interhémisphérique empêche la réorganisation du cortex somatosensoriel désafférenté [88]. Et si les influx du corps calleux sont supprimés, la réorganisation du cortex somatosensoriel désafférenté est alors possible. Dans le cas de notre patient, la stimulation sensitive du pouce et des doigts à droite entraîne une activation controlatérale (gyrus pré et postcentral gauche). En revanche, la stimulation sensitive du pouce

et des doigts à gauche (côté sain) entraîne une activation bilatérale des gyros pré et postcentral (aires 1, 2 et 3 de Brodmann). Par conséquent, il est possible que la réorganisation du cortex somatosensoriel droit soit finalement inadaptée, expliquant le peu de récupération sensitive du membre réimplanté.

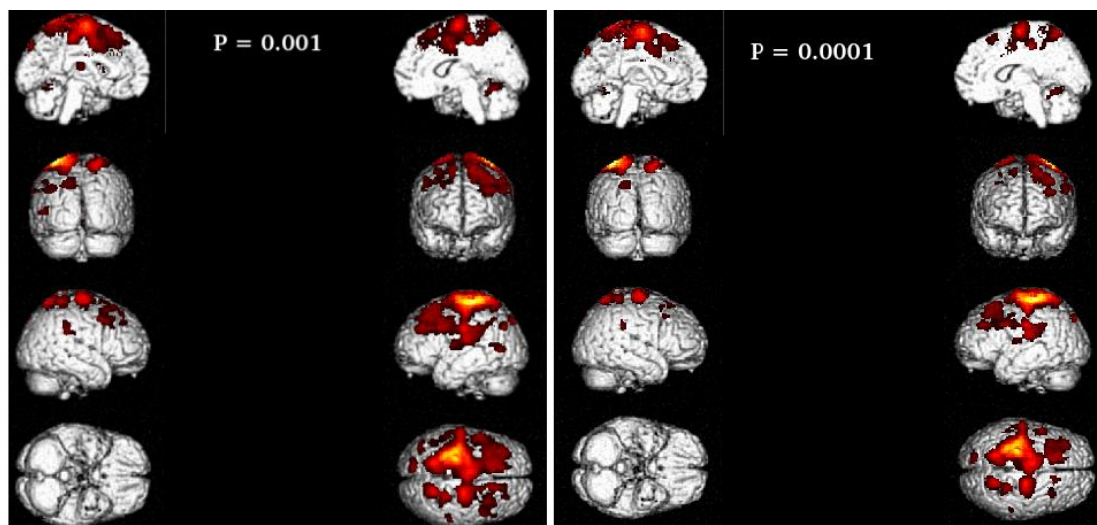
#### **4) Limites de l'étude**

Notre étude a des plusieurs limites. Tout d'abord, il s'agit de l'étude rétrospective d'un seul cas. L'examen clinique dépend de plusieurs facteurs : l'évaluation de l'examineur, même devant la reproductibilité des différents tests utilisée. La fiabilité de l'examen clinique et des résultats dépend aussi de l'état de fatigue, des douleurs, de la concentration et de la coopération du patient. Tous ces facteurs varient au cours du temps et sont imprévisibles, malgré une optimisation de la prise en charge. Il est important également de tenir compte que chaque patient a une histoire et un environnement différents, ce qui le rend plus ou moins prêt à s'intégrer dans des démarches rééducatives longues et coûteuses sur le plan émotionnel et personnel.

L'absence de recueil et l'impossibilité de mesurer des vitesses de conduction nerveuses est discordant avec l'obtention de PES à T0 et T1. La difficulté de repérage des nerfs peut en être une cause, liée aux cicatrices hypertrophiques et rétractiles du membre supérieur droit.

Les conditions de réalisation de l'IRM fonctionnelle peuvent aussi influencer les résultats des différentes cartographies d'activation. Un manque de concentration du sujet lors de l'exécution d'un paradigme peut sous-estimer ou surestimer le signal IRM au cours de l'acquisition, qui varie de manière synchronisée avec le paradigme. Par exemple, les mouvements du bras gauche (sain) entraînent une activation plus importante des gyros pré et postcentral controlatéral à T0 qu'à T1. Il est possible que le patient ait effectué le mouvement avec une fréquence et une vitesse d'exécution du mouvement plus lentes à T1. L'activation du cortex somesthésique primaire (gyrus postcentral) peut être lié à un défaut de sensibilité, empêchant la distinction en IRMf des 2 zones. Elle peut aussi être liée à l'intégration sensorielle du mouvement [89]. Enfin, les cartographies d'activations cérébrales obtenues dépendent des seuils statistiques choisis. Le seuil est défini à partir duquel on considère une variation significative du signal BOLD entre un état de repos et un état d'activation. En fonction du seuil choisi, pour une même tâche réalisée, on peut obtenir différentes cartographies d'activations (figure 38).

Figure 38 : cartographies d'activations cérébrales pour le mouvement du bras droit avec seuil de détection statistique  $P = 0.001$  à gauche et  $P = 0.0001$  à droite. On observe une réduction du nombre de zones d'activation si on augmente le seuil de sensibilité.



## V. CONCLUSION

La réimplantation d'un membre après amputation traumatique chez l'adolescent est rare. La récupération fonctionnelle n'est pas liée qu'aux processus de réparation et de réorganisation des SNP et SNC. Elle dépend aussi de facteurs liés au patient lui-même (milieu socio-environnemental, traits de caractères telles que la combativité, le courage, l'optimisme et la résilience), et à son entourage (étayage parental, soutien des amis). Cela souligne la nécessité d'une cohésion de toutes les personnes impliquées, tant sur le plan personnel que professionnel. Il nous fallait garder à l'esprit l'importance de rester réaliste face à la pathologie du patient et des difficultés qu'elle implique. Cela devait également être intégré dans les échanges avec le patient et sa famille, autant pour le déni de l'atteinte grave que pour le soutien et accompagnement nécessaire d'une acceptation d'un état vers un autre. La résilience du patient a permis un cheminement vers l'acceptation de sa situation de handicap, qui reste aujourd'hui encore à travailler avec lui. Le guidage des professionnels par l'équipe des psychologues et pédopsychiatres est indispensable. Au travers de la progression de la récupération motrice et du processus psychologique d'acceptation de la déficience, nous n'avons pas relevé d'étapes clés qui permettraient de guider les équipes de rééducation. C'est aux équipes médico-rééducative et chirurgicale de s'adapter en fonction de l'évolution clinique, des capacités et limites du patient. Nous pensons que le guidage des récupérations et de la réinsertion est propre à chaque individu.

La neuroplasticité est un processus lent, impliquée dans la récupération fonctionnelle seulement si elle est guidée et orientée. Notre travail nous a permis de mettre en évidence une réorganisation des cortex moteur et somatosensoriel intra et interhémisphérique, dont la récupération motrice est lentement favorable, à l'inverse de la récupération sensitive. Car notre étude est basée sur un seul cas, il serait intéressant de comparer la réorganisation du cortex cérébral après réimplantations de bras en fonction de différentes variables (l'âge, le mécanisme lésionnel, la durée d'ischémie ou la prise en charge rééducative associée par exemple) et les résultats sur le plan fonctionnel. Comprendre au mieux les mécanismes de réorganisation corticales après lésion nerveuse périphérique nous permettrait d'améliorer nos programmes rééducatifs en affinant l'intégration somatosensorielle, le contrôle cérébelleux, la coordination oculo-manuelle.

En dépit de soins médicaux lourds initiaux et d'hospitalisations répétées et prolongées, les résultats fonctionnels et sur la qualité de vie restent intéressants, comparés à l'utilisation d'une prothèse, justifiant des programmes rééducatifs pluridisciplinaires sans négliger la réadaptation au milieu de vie, la réinsertion sociale, scolaire et familiale.

## VI. BIBLIOGRAPHIES

1. Malt RA, McKhann CF. Replantation of Severed Arms. *JAMA*. 7 sept 1964 ;189(10). Disponible sur: <http://jama.jamanetwork.com/article.aspx?doi=10.1001/jama.1964.03070100010002>
2. Malt RA, Remensnyder JP, Harris WH. Long-Term Utility of Replanted Arms: *Ann Surg*. sept 1972;176(3):324-42.
3. Conn JM, Annest JL, Ryan GW, Budnitz DS. Non-Work-Related Finger Amputations in the United States, 2001-2002. *Ann Emerg Med*. juin 2005;45(6):630-5.
4. Vakhshori V, Bouz GJ, Mayfield CK, Alluri RK, Stevanovic M, Ghiassi A. Trends in Pediatric Traumatic Upper Extremity Amputations. *HAND*. nov 2019;14(6):782-90.
5. Hostetler SG, Schwartz L, Shields BJ, Xiang H, Smith GA. Characteristics of pediatric traumatic amputations treated in hospital emergency departments: United States, 1990-2002. *Pediatrics*. nov 2005;116(5):e667-674.
6. Borne A, Porter A, Recicar J, Maxson T, Montgomery C. Pediatric Traumatic Amputations in the United States: A 5-Year Review. *J Pediatr Orthop*. mars 2017;37(2):e104.
7. Daigle JP, Kleinert JM. Major limb replantation in children. *Microsurgery*. 1991;12(3):221-31.
8. Medling BD, Bueno RA, Russell RC, Neumeister MW. Replantation Outcomes. *Clin Plast Surg*. avr 2007;34(2):177-85.
9. Meyer TM. Psychological aspects of mutilating hand injuries. *Hand Clin*. 1 févr 2003;19(1):41-9.
10. Alderman AK, Storey AF, Chung KC. Financial impact of emergency hand trauma on the health care system. *J Am Coll Surg*. févr 2008;206(2):233-8.
11. Berlin NL, Tuggle CT, Thomson JG, Au A. Digit replantation in children: a nationwide analysis of outcomes and trends of 455 pediatric patients. *Hand N Y N*. juin 2014;9(2):244-52.
12. Beris AE, Soucacos PN, Malizos KN, Mitsionis GJ, Soucacos PK. Major limb replantation in children. *Microsurgery*. 1994;15(7):474-8.
13. Ignatiadis IA, Yiannakopoulos CK, Mavrogenis AF, Nomikos GN, Spyridonos SG, Gerostathopoulos NE, et al. Severe upper limb injuries with or without neurovascular compromise in children and adolescents—Analysis of 32 cases. *Microsurgery*. 2008;28(2):131-7.
14. Thomas AG. Unfavorable results in replantation. *Indian J Plast Surg Off Publ Assoc Plast Surg India*. mai 2013;46(2):256-64.
15. Chung-Wei C. Extremity replantation. 1978;2(4):9.
16. Ad S, Jr U, Ja N, Js T, Rd G, Rd F. Results after replantation and revascularization in the upper extremity in children. *J Bone Joint Surg Am*. 1 déc 1994;76(12):1766-76.
17. Kleinert JM, Graham B. Macroreplantation: An overview. *Microsurgery*. 1990;11(3):229-33.
18. Daigle JP, Kleinert JM. Major limb replantation in children. *Microsurgery*. 1991;12(3):221-31.



19. Steinau H-U. Major Limb Replantation and Postischemia Syndrome: Investigation of Acute Ischemia-Induced Myopathy and Reperfusion Injury [Internet]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 1988 [cité 2 juill 2020]. Disponible sur: <https://www.springer.com/gp/book/9783662024829>
20. Taghnia AH. Pediatric Replantation and Revascularization. *Hand Clin.* mai 2019;35(2):155-78.
21. Tajima T, Imai H. Results of median nerve repair in children. *Microsurgery.* 1989;10(2):145-6.
22. Buchthal F, Kühl V. Nerve conduction, tactile sensibility, and the electromyogram after suture or compression of peripheral nerve: a longitudinal study in man. *J Neurol Neurosurg Psychiatry.* mai 1979;42(5):436-51.
23. Wall JT, Xu J, Wang X. Human brain plasticity: an emerging view of the multiple substrates and mechanisms that cause cortical changes and related sensory dysfunctions after injuries of sensory inputs from the body. *Brain Res Brain Res Rev.* sept 2002;39(2-3):181-215.
24. Kaas JH. The reorganization of somatosensory and motor cortex after peripheral nerve or spinal cord injury in primates. In: *Progress in Brain Research* [Internet]. Elsevier; 2000 [cité 10 oct 2020]. p. 173-9. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079612300280151>
25. Voluntary Movement: The Parietal and Premotor Cortex. In: *Principles of Neural Science* [Internet]. Fifth Edition. New York, NY: McGraw-Hill Education; 2014 [cité 6 juill 2020]. Disponible sur: [neurology.mhmedical.com/content.aspx?aid=1101681407](https://neurology.mhmedical.com/content.aspx?aid=1101681407)
26. *Cranial Neuroimaging and Clinical Neuroanatomy, Third Ed.* *Neuro-Oncol.* juill 2004;6(3):267-8.
27. Rathelot J-A, Strick PL. Subdivisions of primary motor cortex based on cortico-motoneuronal cells. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 20 janv 2009;106(3):918-23.
28. Sergio LE, Hamel-Pâquet C, Kalaska JF. Motor cortex neural correlates of output kinematics and kinetics during isometric-force and arm-reaching tasks. *J Neurophysiol.* oct 2005;94(4):2353-78.
29. Roux F, Djidjeli I, Durand J. Functional architecture of the somatosensory homunculus detected by electrostimulation. *J Physiol.* 1 mars 2018;596(5):941-56.
30. Lee KJ, Woolsey TA. A proportional relationship between peripheral innervation density and cortical neuron number in the somatosensory system of the mouse. *Brain Res.* 5 déc 1975;99(2):349-53.
31. Gómez-Fernández L. Cortical plasticity and restoration of neurologic functions: an update on this topic. *Rev Neurol.* 16 oct 2000;31(8):749-56.
32. Ismail FY, Fatemi A, Johnston MV. Cerebral plasticity: Windows of opportunity in the developing brain. *Eur J Paediatr Neurol.* 1 janv 2017;21(1):23-48.
33. La neuroplasticité. G. Gandolfo. Laboratoire de neurobiologie et psychotraumatologie Université de Nice-Sophia Antipolis -. Disponible sur: <https://docplayer.fr/7601848-La-neuroplasticite-g-gandolfo-laboratoire-de-neurobiologie-et-psychotraumatologie-universite-de-nice-sophia-antipolis.html>
34. Borsook D, Becerra L, Fishman S, Edwards A, Jennings CL, Stojanovic M, et al. Acute plasticity in the human somatosensory cortex following amputation. *NeuroReport.* avr 1998;9(6):1013-1017.

35. Grefkes C, Ward NS. Cortical Reorganization After Stroke: How Much and How Functional? *The Neuroscientist*. févr 2014;20(1):56-70.
36. Sharma N, Classen J, Cohen LG. Neural plasticity and its contribution to functional recovery. In: *Handbook of Clinical Neurology* [Internet]. Elsevier; 2013 [cité 6 juill 2020]. p. 3-12. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444529015000010>
37. Ramanathan D, Conner JM, H. Tuszynski M. A form of motor cortical plasticity that correlates with recovery of function after brain injury. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 25 juill 2006;103(30):11370-5.
38. Siemionow M, Mendiola A. Methods of Assessment of Cortical Plasticity in Patients Following Amputation, Replantation, and Composite Tissue Allograft Transplantation: *Ann Plast Surg*. sept 2010;65(3):344-8.
39. Andreelli F, Mosbah H. IRM fonctionnelle cérébrale : les principes. *Médecine Mal Métaboliques*. févr 2014;8(1):13-9.
40. Kwong KK, Belliveau JW, Chesler DA, Goldberg IE, Weisskoff RM, Poncelet BP, et al. Dynamic magnetic resonance imaging of human brain activity during primary sensory stimulation. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 15 juin 1992;89(12):5675-9.
41. Donoghue JP, Suner S, Sanes JN. Dynamic organization of primary motor cortex output to target muscles in adult rats II. Rapid reorganization following motor nerve lesions. *Exp Brain Res* [Internet]. mars 1990 [cité 26 juill 2020];79(3). Disponible sur: <http://link.springer.com/10.1007/BF00229319>
42. Wall J, Kaas J, Sur M, Nelson R, Felleman D, Merzenich M. Functional reorganization in somatosensory cortical areas 3b and 1 of adult monkeys after median nerve repair: possible relationships to sensory recovery in humans. *J Neurosci*. 1 janv 1986;6(1):218-33.
43. Lee SK, Wolfe SW. Peripheral nerve injury and repair. *J Am Acad Orthop Surg*. août 2000;8(4):243-52.
44. Fletcher C. Case report and literature review of the outcome following reimplantation of the arm. *Trauma Surg Acute Care Open*. sept 2017;2(1):e000124.
45. Buncke GM, Buntic RF, Romeo O. Pediatric mutilating hand injuries. *Hand Clin*. févr 2003;19(1):121-31.
46. Treede R-D, Jensen TS, Campbell JN, Cruccu G, Dostrovsky JO, Griffin JW, et al. Neuropathic pain: redefinition and a grading system for clinical and research purposes. *Neurology*. 29 avr 2008;70(18):1630-5.
47. Bouhassira D, Attal N, Alchaar H, Boureau F, Brochet B, Bruxelle J, et al. Comparison of pain syndromes associated with nervous or somatic lesions and development of a new neuropathic pain diagnostic questionnaire (DN4): *Pain*. mars 2005;114(1):29-36.
48. Weeks SR, Anderson-Barnes VC, Tsao JW. Phantom Limb Pain: Theories and Therapies. *The Neurologist*. sept 2010;16(5):277-86.
49. Finn SB, Perry BN, Clasing JE, Walters LS, Jarzombek SL, Curran S, et al. A Randomized, Controlled Trial of Mirror Therapy for Upper Extremity Phantom Limb Pain in Male Amputees. *Front Neurol*. 2017;8:267.
50. Chan BL, Witt R, Charrow AP, Magee A, Howard R, Pasquina PF, et al. Mirror Therapy for Phantom Limb Pain. *N Engl J Med*. 22 nov 2007;357(21):2206-7.

51. Ezendam D, Bongers RM, Jannink MJA. Systematic review of the effectiveness of mirror therapy in upper extremity function. *Disabil Rehabil.* 2009;31(26):2135-49.
52. Yang G, McGlinn EP, Chung KC. Management of the Stiff Finger: Evidence and Outcomes. *Clin Plast Surg.* juill 2014;41(3):501-12.
53. Fonseca M de CR, Elui VMC, Lalone E, da Silva NC, Barbosa RI, Marcolino AM, et al. Functional, motor, and sensory assessment instruments upon nerve repair in adult hands: systematic review of psychometric properties. *Syst Rev [Internet].* 27 oct 2018 [cité 1 oct 2020];7. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6204279/>
54. Spicher CJ, Mathis F, Degrange B, Freund P, Rouiller EM. Static mechanical allodynia (SMA) is a paradoxical painful hypo-aesthesia: Observations derived from neuropathic pain patients treated with somatosensory rehabilitation. *Somatosens Mot Res.* janv 2008;25(1):77-92.
55. Degrange B, Noel L, Spicher C. De la rééducation de l'hyposensibilité cutanée tactile à la contre-stimulation vibrotactile. p14.
56. Melzack R, Wall PD. Pain Mechanisms: A New Theory. *Science.* 19 nov 1965;150(3699):971-9.
57. Spicher CJ, Mathis F, Desfoux N, Schönenweid F, Rouiller E-M, Ribordy F. L'allodynie mécanique masque une hypoesthésie : observations topographiques de 23 patients douloureux neuropathiques chroniques. *Douleur Analgésie.* nov 2008;21(4):239-51.
58. J J. Grading of muscle power: comparison of MRC and analogue scales by physiotherapists. Medical Research Council. *Int J Rehabil Res Int Z Rehabil Rev Int Rech Readaptation.* 1 janv 1984;7(2):173-81.
59. Fabbri-Destro M, Rizzolatti G. Mirror Neurons and Mirror Systems in Monkeys and Humans. *Physiology.* juin 2008;23(3):171-9.
60. Sköld A, Hermansson LN, Krumlinde-Sundholm L, Eliasson A-C. Development and evidence of validity for the Children's Hand-use Experience Questionnaire (CHEQ): Validity of the Children's Hand-use Experience Questionnaire. *Dev Med Child Neurol.* mai 2011;53(5):436-42.
61. Ravens-Sieberer U, Herdman M, Devine J, Otto C, Bullinger M, Rose M, et al. The European KIDSCREEN approach to measure quality of life and well-being in children: development, current application, and future advances. *Qual Life Res.* 2014;23(3):791-803.
62. Koul AR, Cyriac A, Khaleel VM, Vinodan K. Bilateral High Upper Limb Replantation in a Child: *Plast Reconstr Surg.* mai 2004;113(6):1734-8.
63. Graham B, Adkins P, Tsai T-M, Firrell J, Breidenvach WC. Major replantation versus revision amputation and prosthetic fitting in the upper extremity: A late functional outcomes study. *J Hand Surg.* sept 1998;23(5):783-91.
64. Otto IA, Kon M, Schuurman AH, van Minnen LP. Replantation versus Prosthetic Fitting in Traumatic Arm Amputations: A Systematic Review. Lin SJ, éditeur. *PLOS ONE.* 4 sept 2015;10(9):e0137729.
65. Dagum AB, Slesarenko Y, Winston L, Tottenham V. Long-term Outcome of Replantation of Proximal-third Amputated Arm: A Worthwhile Endeavor. *Tech Hand Up Extrem Surg.* 11(4):5.
66. Gordon T, Tyreman N, Raji MA. The Basis for Diminished Functional Recovery after Delayed Peripheral Nerve Repair. *J Neurosci.* 6 avr 2011;31(14):5325-34.

67. Blume KR, Racz J, Franz M, Dietrich C, Puta C, Friedel R, et al. Quantitative sensory testing after macroreplantation: evidence for a specific somatosensory profile. *PAIN*. juill 2018;159(7):1289-96.
68. Schüning J, Scherens A, Haussleiter IS, Schwenkreis P, Krumova EK, Richter H, et al. Sensory Changes and Loss of Intraepidermal Nerve Fibers in Painful Unilateral Nerve Injury: *Clin J Pain*. oct 2009;25(8):683-90.
69. Liu CN, Wall PD, Ben-Dor E, Michaelis M, Amir R, Devor M. Tactile allodynia in the absence of C-fiber activation: altered firing properties of DRG neurons following spinal nerve injury. *Pain*. avr 2000;85(3):503-21.
70. Costigan M, Scholz J, Woolf CJ. Neuropathic Pain: A Maladaptive Response of the Nervous System to Damage. *Annu Rev Neurosci*. juin 2009;32(1):1-32.
71. Kohama I, Ishikawa K, Kocsis JD. Synaptic Reorganization in the Substantia Gelatinosa After Peripheral Nerve Neuroma Formation: Aberrant Innervation of Lamina II Neurons by A $\beta$  Afferents. *J Neurosci*. 15 févr 2000;20(4):1538-49.
72. Chieffo R, Straffi L, Inuggi A, Gonzalez-Rosa JJ, Spagnolo F, Coppi E, et al. Motor Cortical Plasticity to Training Started in Childhood: The Example of Piano Players. *PLoS ONE* [Internet]. 23 juin 2016 [cité 18 oct 2020];11(6). Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4918920/>
73. Piza-Katzer H, Brenneis C, Löscher WN, Benke T, Schocke M, Gabl MF, et al. Cortical motor activation patterns following hand transplantation and replantation. In: Millesi H, Schmidhammer R, éditeurs. *How to Improve the Results of Peripheral Nerve Surgery* [Internet]. Vienna: Springer Vienna; 2007 [cité 6 juill 2020]. p. 113-5. (*Acta Neurochirurgica Supplementum*; vol. 100). Disponible sur: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-211-72958-8\\_24](http://link.springer.com/10.1007/978-3-211-72958-8_24)
74. Blume KR, Dietrich C, Huonker R, Götz T, Sens E, Friedel R, et al. Cortical reorganization after macroreplantation at the upper extremity: a magnetoencephalographic study. *Brain*. mars 2014;137(3):757-69.
75. Strotzer M. One Century of Brain Mapping Using Brodmann Areas\*. *Clin Neuroradiol*. août 2009;19(3):179-86.
76. Doyon J, Benali H. Reorganization and plasticity in the adult brain during learning of motor skills. *Curr Opin Neurobiol*. 1 avr 2005;15(2):161-7.
77. Lehéricy S, Benali H, Van de Moortele P-F, Péligrini-Issac M, Waechter T, Ugurbil K, et al. Distinct basal ganglia territories are engaged in early and advanced motor sequence learning. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 30 août 2005;102(35):12566-71.
78. Doyon J, Penhune V, Ungerleider LG. Distinct contribution of the cortico-striatal and cortico-cerebellar systems to motor skill learning. *Neuropsychologia*. janv 2003;41(3):252-62.
79. Floyer-Lea A, Matthews PM. Distinguishable Brain Activation Networks for Short- and Long-Term Motor Skill Learning. *J Neurophysiol*. juill 2005;94(1):512-8.
80. Jeannerod M, Decety J. Mental motor imagery: a window into the representational stages of action. *Curr Opin Neurobiol*. déc 1995;5(6):727-32.
81. Héту S, Grégoire M, Saimpont A, Coll M-P, Eugène F, Michon P-E, et al. The neural network of motor imagery: An ALE meta-analysis. *Neurosci Biobehav Rev*. juin 2013;37(5):930-49.

82. Loporito M, McAllister C, Williams J, Hardwick R, Holmes P. Investigating Central Mechanisms Underlying the Effects of Action Observation and Imagery Through Transcranial Magnetic Stimulation. *J Mot Behav.* sept 2011;43(5):361-73.
83. Wright DJ, Williams J, Holmes PS. Combined action observation and imagery facilitates corticospinal excitability. *Front Hum Neurosci* [Internet]. 27 nov 2014 [cité 28 sept 2020];8. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4245481/>
84. Guillot A, Lebon F, Rouffet D, Champely S, Doyon J, Collet C. Muscular responses during motor imagery as a function of muscle contraction types. *Int J Psychophysiol.* oct 2007;66(1):18-27.
85. Takeuchi N, Oouchida Y, Izumi S-I. Motor Control and Neural Plasticity through Interhemispheric Interactions. *Neural Plast.* 2012;2012:1-13.
86. Fornander L, Nyman T, Hansson T, Brismar T, Engström M. Inter-hemispheric plasticity in patients with median nerve injury. *Neurosci Lett.* août 2016;628:59-66.
87. Hansson T, Brismar T. Tactile stimulation of the hand causes bilateral cortical activation: a functional magnetic resonance study in humans. *Neurosci Lett.* août 1999;271(1):29-32.
88. Yu X, Koretsky AP. Interhemispheric plasticity protects the deafferented somatosensory cortex from functional takeover after nerve injury. *Brain Connect.* nov 2014;4(9):709-17.
89. Christensen MS, Lundbye-Jensen J, Geertsen SS, Petersen TH, Paulson OB, Nielsen JB. Premotor cortex modulates somatosensory cortex during voluntary movements without proprioceptive feedback. *Nat Neurosci.* avr 2007;10(4):417-9.

## VII. ANNEXES

### Annexe 1 : questionnaire DN4

#### QUESTIONNAIRE DN4 : un outil simple pour rechercher les douleurs neuropathiques

Pour estimer la probabilité d'une douleur neuropathique, le patient doit répondre à chaque item des 4 questions ci dessous par « oui » ou « non ».

**QUESTION 1** : la douleur présente-t-elle une ou plusieurs des caractéristiques suivantes ?

	Oui	Non
1. Brûlure	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Sensation de froid douloureux	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Décharges électriques	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**QUESTION 2** : la douleur est-elle associée dans la même région à un ou plusieurs des symptômes suivants ?

	Oui	Non
4. Fourmillements	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. Picotements	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. Engourdissements	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7. Démangeaisons	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**QUESTION 3** : la douleur est-elle localisée dans un territoire où l'examen met en évidence :

	Oui	Non
8. Hypoesthésie au tact	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9. Hypoesthésie à la piqûre	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**QUESTION 4** : la douleur est-elle provoquée ou augmentée par :

	Oui	Non
10. Le frottement	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

OUI = 1 point

NON = 0 point

**Score du Patient : /10**

#### **MODE D'EMPLOI**

Lorsque le praticien suspecte une douleur neuropathique, le questionnaire DN4 est utile comme outil de diagnostic.

Ce questionnaire se répartit en 4 questions représentant 10 items à cocher :

- ✓ Le praticien interroge lui-même le patient et remplit le questionnaire
- ✓ A chaque item, il doit apporter une réponse « oui » ou « non »
- ✓ A la fin du questionnaire, le praticien comptabilise les réponses, 1 pour chaque « oui » et 0 pour chaque « non ».
- ✓ La somme obtenue donne le Score du Patient, noté sur 10.

The Touch Test® Sensory Evaluators (Semmes-Weinstein Monofilaments) provide a non-invasive evaluation of cutaneous sensation levels throughout the body with results that are objective and repeatable. Using Touch Test® Sensory Evaluators is indicated in diagnoses including nerve compression syndromes, peripheral neuropathy, thermal injuries and postoperative nerve repair. Each Touch Test® Sensory Evaluator is individually calibrated to deliver its targeted force within a 5% standard deviation.

### Instructions For Use

These instructions are written for threshold testing with individual Touch Test® Sensory Evaluators, and for comparative testing and color mapping with the Touch Test® 5 Piece Hand Kit, the Touch Test® 6 Piece Foot Kit and the Touch Test® 20 Piece Full Kit. Color mapping enables progression or regression of sensory neuropathies to be documented. When worsened sensibility is detected proper intervention can be implemented. Conversely, improved sensibility would indicate effective treatment intervention.

1. Rest the patient's extremity on a stable, padded surface. Testing should be done in a quiet area to help the patient fully attend to the testing procedure. Occlude the patient's vision by using a shield or by having the patient look away.
2. Explain the testing procedure to the patient and instruct the patient to respond when the stimulus is felt by saying "touch" or "yes". Nonverbal patients may tap the table lightly when the stimulus is felt.
3. Note any areas of callus, abrasion, scarring or other blemishes by drawing on the recording form (Hand Screening Form NC12750-1 or Foot Screening Form NC12749). While testing, proceed from distal to proximal and from small to large monofilaments.
4. It is not necessary to test every area of the skin when performing an evaluation. Checks may be done over areas innervated by different nerves. **For the hand**, test the palmar surface of the index finger and thumb to evaluate median nerve function; test the little finger and hypothenar eminence to evaluate the ulnar nerve; and test the dorsum of the hand to evaluate the radial nerve (see Figure 1). **For the foot**, test the sites indicated in Figure 2.
5. Rotate the sleeve to expose the filament. Flip tip back to lock filament into a 90° angle. Press the filament at a 90° angle against the skin until it bows. Hold in place for 1.5 seconds and then remove (see Figure 3). For monofilaments from 1.65 to 4.08 apply the stimulus in the same location up to three times to elicit a response. A single response indicates a positive response. For filaments 4.17 through 6.65, apply the stimulus one time only.
6. To test with the Touch Test® 5 Piece Hand Kit (NC12772), the Touch Test® Six Piece Foot Kit (NC12773) or the Touch Test® 20 Piece Full Kit (NC12775), begin with the 2.83 filament. If the patient responds to the stimulus in all sites, normal cutaneous sensation can be documented and the examination is complete. If the patient does not respond to the stimulus, choose the next largest monofilament and repeat the process.
7. When the patient indicates a response, record the result using the colored pencil that corresponds to the color on the handle of the Touch Test® Sensory Evaluator (Colored Pencils Set NC12756). When representing monofilaments of the same color, notate which monofilament size was used (see Figure 4). Threshold levels indicated in Figure 5 can be used to interpret test results.

**\*\*If testing with the 5.07 only, follow instructions #1- #5. Then apply the 5.07 to the test sites shown in Figure 2. Record results using a ✓ to indicate each site with sensation and ✗ for lack of sensation.**

Note: Touch Test® Sensory Evaluators are precision instruments. Care should be taken at all times to cover the filament with the protective sleeve. The filament may be cleaned with a mild instrument disinfectant. Substantially bent or kinked monofilaments must not be used for testing and should be discarded.

Figure 1



Figure 2

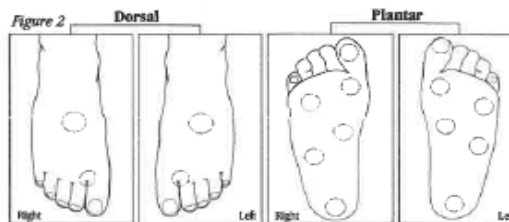


Figure 3

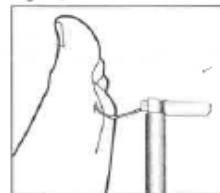
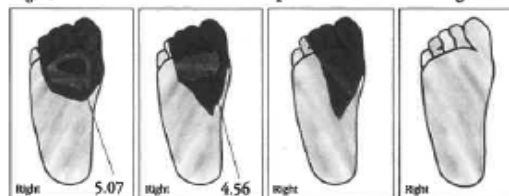


Figure 4

Sample of Documented Progression



**Figure 5 – Touch Test® Sensory Evaluator Chart**

Product Number	Evaluator Size	Target Force*	Representation	Hand & Dorsal Foot Thresholds	Plantar Foot Thresholds
NC12775-01	1.65	0.008	Green	Normal	Normal
NC12775-02	2.36	0.02			
NC12775-03	2.44	0.04			
NC12775-04	<b>2.83</b>	0.07			
NC12775-05	3.22	0.16	Blue	Diminished Light Touch	Diminished Light Touch
NC12775-06	<b>3.61</b>	0.4			
NC12775-07	3.84	0.6	Purple	Diminished Protective Sensation	Diminished Light Touch
NC12775-08	4.08	1			
NC12775-09	4.17	1.4			
NC12775-10	<b>4.31</b>	2			
NC12775-11	<b>4.56</b>	4	Red	Loss of Protective Sensation	Diminished Protective Sensation
NC12775-12	4.74	6			
NC12775-13	4.93	8			
NC12775-14	<b>5.07</b>	10			
NC12775-15	5.18	15			
NC12775-16	5.46	26			
NC12775-17	5.88	60			
NC12775-18	6.10	100			
NC12775-19	6.45	180			
NC12775-20	<b>6.65</b>	300			
				Deep Pressure Sensation Only	Deep Pressure Sensation Only

\* Individually calibrated within a 5% standard deviation.

**Touch Test® Sensory Evaluators and Accessories:**

Product Number	Description
NC12775	<b>Touch Test® 20 Piece Full Kit</b>
NC12774	<b>Touch Test® Complete Foot Kit (6 Piece Kit, Screening Forms, Colored Pencils)</b>
NC12773	<b>Touch Test® 6 Piece Foot Kit (2.83, 3.61, 4.31, 4.56, 5.07, 6.65)</b>
NC12771	<b>Touch Test® Complete Hand Kit (5 Piece Kit, Screening Forms, Colored Pencils)</b>
NC12772	<b>Touch Test® 5 Piece Hand Kit (2.83, 3.61, 4.31, 4.56, 6.65)</b>
NC12775-14	<b>Touch Test® Sensory Evaluator 5.07 (10 grams of force*)</b>
*See NC12775-01 thru NC12775-20 for Individual Replacement Touch Test® Sensory Evaluators*	
NC12749	<b>Foot Screening Forms (pad of 100)</b>
NC12750-1	<b>Hand Screening Forms (pad of 100)</b>
NC12756	<b>Colored Pencils Set</b>
NC12780	<b>Touch Test® Training Video-FREE</b>

The following reference can be used for more detailed instructions:

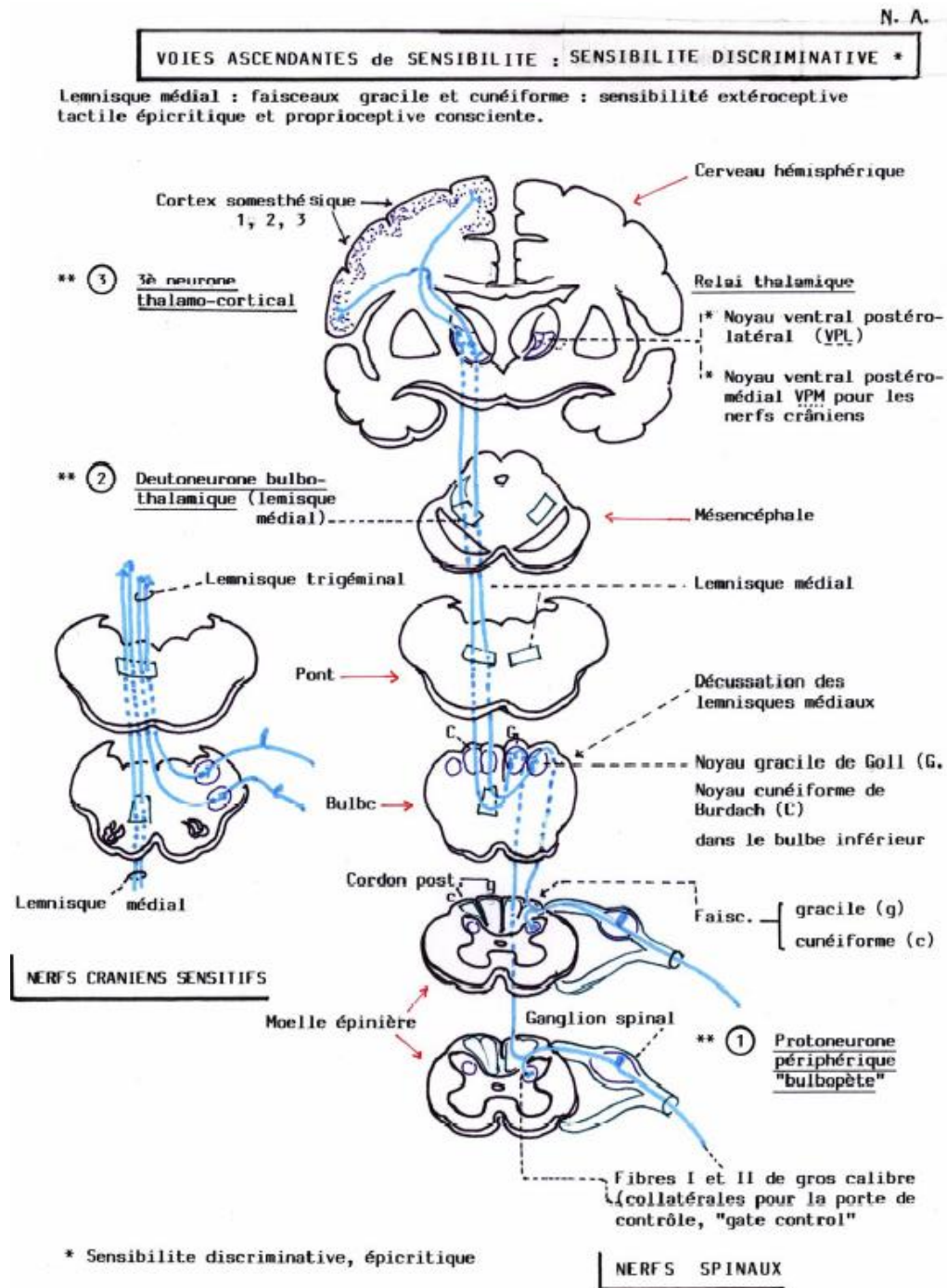
*Rehabilitation of the Hand: Surgery and Therapy*; Mosby; ed. Hunter, Macken, Callahan; Vol I, 4th Edition; Chapter 9. 1995.

Manufactured for:  
North Coast Medical, Inc.  
www.ncmedical.com

© 2013 North Coast Medical, Inc.  
Gino, CA 95026, 800-821-5819  
RPN12775\_0013

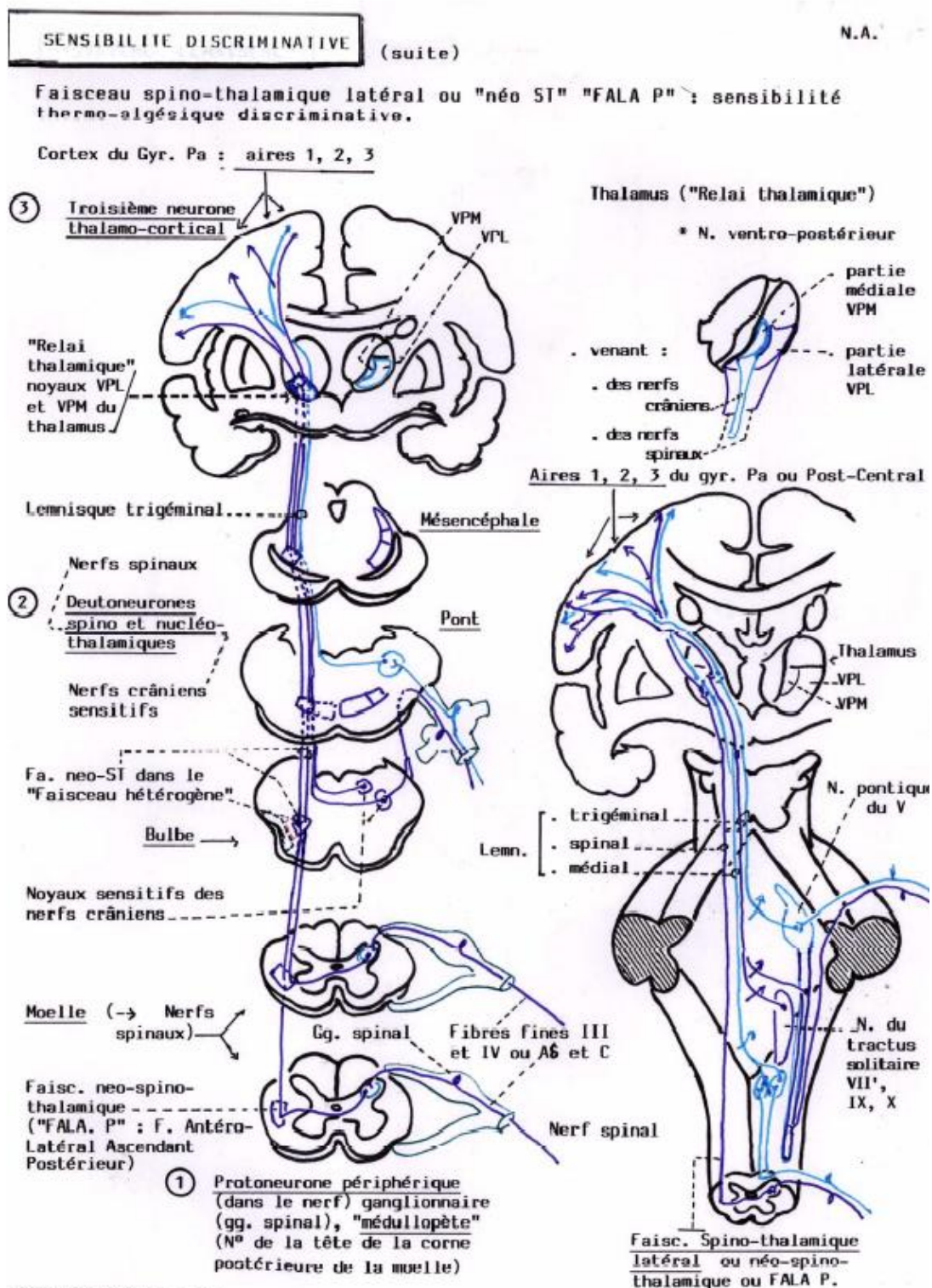


Annexe 3 : voies de la sensibilité tactile épicrotique et proprioceptive consciente (fibres A $\beta$ )  
 (https://moodlesante.univ-brest.fr/moodle/mod/folder/view.php?id=22416)



Annexe 3 bis : voie de la sensibilité thermo-algique (fibres Aδ et C)

(<https://moodlesante.univ-brest.fr/moodle/mod/folder/view.php?id=22416>)



\* Voir aussi Substance blanche du T.C.

Annexe 4 : clusters d'activation des différentes tâches, résultats exprimés sous forme de voxels.

**Mouvements de flexion et d'extension (bras droit)**

Région anatomique	IRM T0		IRM T1	
	Hémisphère Gauche	Hémisphère Droit	Hémisphère Gauche	Hémisphère Droit
Gyrus Postcentral	1266	131	1495	141
Gyrus précentral	885	215	1055	327
Aire Motrice supplémentaire	369	298	796	203
Cortex pariétal supérieur	232	247	557	345
Gyrus temporal supérieur	177	39	59	-
Cervelet	-	402	-	403

**Mouvements de flexion et d'extension (bras gauche)**

Région anatomique	IRM T0		IRM T1	
	Hémisphère Gauche	Hémisphère Droit	Hémisphère Gauche	Hémisphère Droit
Gyrus Postcentral	811	1456	-	431
Gyrus précentral	440	1225	-	383
Aire Motrice supplémentaire	1026	683	6	117
Cortex pariétal supérieur	373	896	-	232

**Mouvements d'ouverture et de fermeture des doigts (main droite)**

Région anatomique	IRM T0		IRM T1	
	Hémisphère Gauche	Hémisphère Droit	Hémisphère Gauche	Hémisphère Droit
Gyrus Postcentral	834	40	146	14
Gyrus précentral	632	131	240	81
Aire Motrice supplémentaire	128	164	36	-
Gyrus postéro-médial frontal	275	-	-	217

**Mouvements d'ouverture et de fermeture des doigts (main gauche)**

Région anatomique	IRM T0		IRM T1	
	Hémisphère Gauche	Hémisphère Droit	Hémisphère Gauche	Hémisphère Droit
Gyrus Postcentral	1181	449	51	1635
Gyrus précentral	535	1064	434	1204
Aire Motrice supplémentaire	111	278	146	214

**Finger-tapping de la main droite**

Région anatomique	IRM T0		IRM T1	
	Hémisphère Gauche	Hémisphère Droit	Hémisphère Gauche	Hémisphère Droit
Gyrus postcentral	1376	137	1469	564
Gyrus précentral	732	79	997	381
AMS	143	50	270	286
Cervelet (lobe VI du vermis)	-	264	-	727

**Finger-tapping de la main gauche**

Région anatomique	IRM T0		IRM T1	
	Hémisphère Gauche	Hémisphère Droit	Hémisphère Gauche	Hémisphère Droit
Gyrus Postcentral	-	860	20	284
Gyrus précentral	-	897	33	259
Aire Motrice supplémentaire	109	255	-	46
Cervelet (lobes IV et V du vermis)	404	-	203	-

**Stimulation sensitive des doigts gauches (2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> rayon)**

Région anatomique	IRM T1	
	Hémisphère Gauche	Hémisphère Droit
Gyrus Postcentral	206	525
Gyrus précentral	67	290
Gyrus supramarginal	58	68
Aire de Brodmann 1	36	22
Aire de Brodmann 2	55	68
Aire de Brodmann 3	25	106

**Stimulation sensitive des doigts droits (2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> rayon)**

Région anatomique	IRM T1	
	Hémisphère Gauche	Hémisphère Droit
Gyrus Postcentral	221	-
Gyrus précentral	238	-
Gyrus supramarginal	-	-
Aire de Brodmann 1	3	-
Aire de Brodmann 2	-	-
Aire de Brodmann 3	76	-

**Stimulation Sensitive du pouce gauche**

Région anatomique	IRM T1	
	Hémisphère Gauche	Hémisphère Droit
Gyrus Postcentral	825	884
Gyrus précentral	174	336
Gyrus supramarginal	310	531
Aire de Brodmann 1	57	38
Aire de Brodmann 2	149	88
Aire de Brodmann 3	79	81

**Stimulation sensitive du pouce droit**

Région anatomique	IRM T1	
	Hémisphère Gauche	Hémisphère Droit
Gyrus Postcentral	443	3
Gyrus précentral	446	51
Gyrus supramarginal	9	-
Aire de Brodmann 1	29	-
Aire de Brodmann 2	7	-
Aire de Brodmann 3	106	-



Annexe 5 : rapport CHEQ à 12 mois de la réimplantation

**CHEQ** **Rapport**  
CHEQ - Children's Hand-use Experience Questionnaire

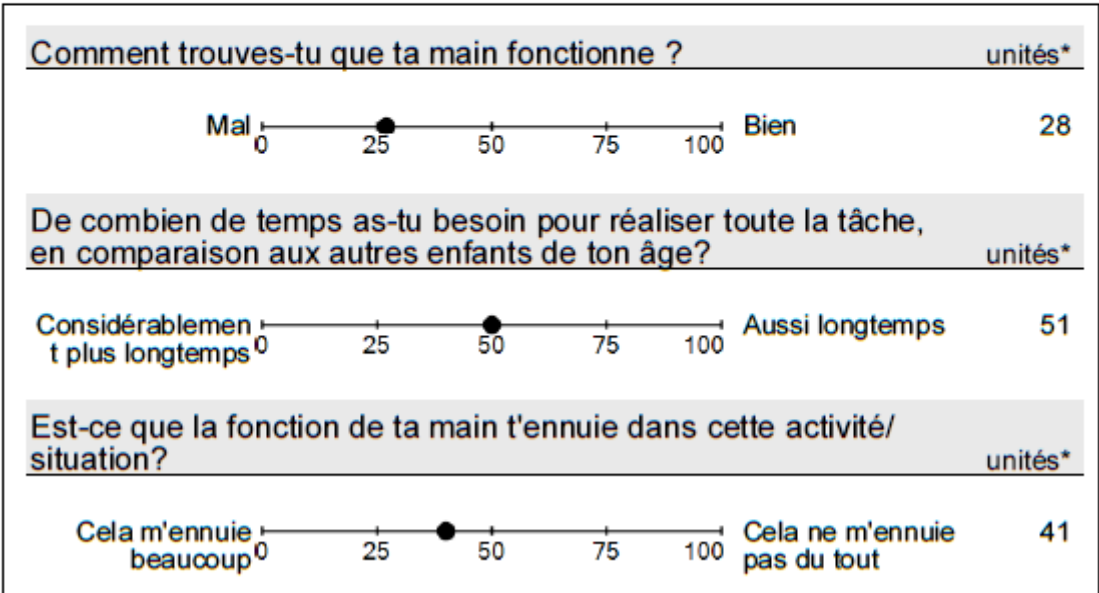
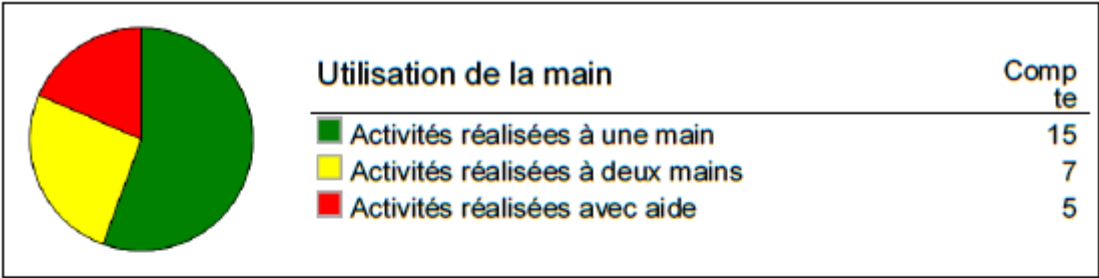
Nom: _____	Age: 14 années	Sexe: Garçon
Diminution fonctionnelle de la main/ du bras côté droit.		
Qui répond ? : Moi-même		
Rapport créé le 30/09/2020		

	Deux mains	Une main *	Temps nécessaire **	Ressenti ***
Mettre un pantalon de survêtement	Une main	1	4	2
Détachez une paille d'une briquette de jus de fruit et l'introduire dans la briquette. (Fait référence à toute la tâche, y compris le fait d'enlever l'emballage de la paille)	Une main	1	2	2
Mettre des chaussettes	Une main	1	4	2
Manger un petit pot de yaourt	Une main	1	3	2
Etaler de la colle sur du papier avec un bâton de colle	Une main	1	3	2
Découper une image avec des ciseaux	Oui	2	3	2
Beurrer une tranche de pain	Une main	1	2	1
Ouvrir une petite boîte (par exemple une boîte de chewing-gums)	Une main	1	4	2
Mettre du dentifrice sur une brosse à dents	Une main	1	4	4
Couper une omelette (ou d'autres aliments faciles à couper) dans une assiette	Une main	1	3	2
Enlever le papier d'un bonbon	Une main	1	3	2
Ouvrir la fermeture éclair d'un petit étui (comme une trousse ou un porte-monnaie)	Une main	1	3	2
Tenir des cartes de jeu (Fait référence à toute la tâche : tenir, sélectionner et placer des cartes dans sa main en jouant)	Une main	1	3	1
Prendre de la monnaie dans un porte-monnaie ou un portefeuille	Oui	2	3	2
Porter un plateau (par exemple à la cantine)	Une main	1	3	2
Remonter la fermeture éclair d'une veste	Oui	2	3	2
Boutonner un pantalon	Oui	2	2	2
Ouvrir le couvercle d'une boîte en plastique (une boîte de glace par exemple)	Oui	2	2	2
Dévisser pour la première fois le capuchon d'une petite bouteille d'eau minérale ou de soda	Oui	2	3	2
Enlever l'emballage d'un comestible glacé	Une main	1	3	2
Couper sur une planche à découper (par exemple les fruits, les légumes, le pain)	Aide	2	1	1
Peler une orange	Aide	2	1	2
Ouvrir un sachet (par exemple un sachet de chips)	Une main	1	3	2
Décollez la protection au dos d'un pansement	Aide	2	1	2
Couper de la viande (ou d'autres aliments difficiles à couper) dans une assiette	Aide	1	1	1
Ouvrir une brique de lait ou de jus de fruit	Oui	2	3	2
Faire ses lacets	Aide	2	1	2

\* Comment trouves-tu que ta main fonctionne ? Mal, 1—2—3—4, Bien

\*\* De combien de temps as-tu besoin pour réaliser toute la tâche, en comparaison aux autres enfants de ton âge? Considérablement plus longtemps, 1—2—3—4, Aussi longtemps

\*\*\* Est-ce que la fonction de ta main t'ennuie dans cette activité/ situation? Cela m'ennuie beaucoup, 1—2—3—4, Cela ne



\* Le score total brut a été transformé par une analyse de Rasch en une échelle de 0-100 unités

## 1. Activités physiques et santé

1. En général, dirais-tu que ton état de santé est :

- Excellent  
 Très bon  
 Bon  
 Assez bon  
 Mauvais

Si tu penses à la semaine dernière...

2. T'es-tu senti(e) en pleine forme ?  
 pas du tout     un peu     modérément     beaucoup     extrêmement
3. As-tu eu des activités physiques (par ex courir, escalader, faire du vélo) ?  
 pas du tout     un peu     modérément     beaucoup     extrêmement
4. As-tu pu courir correctement ?  
 pas du tout     un peu     modérément     beaucoup     extrêmement

Si tu penses à la semaine dernière...

5. T'es-tu senti(e) plein(e) d'énergie ?  
 jamais     parfois     souvent     très souvent     toujours

## 2. Tes sentiments

Si tu penses à la semaine dernière...

1. Ta vie a-t-elle été agréable ?  
 pas du tout     un peu     modérément     beaucoup     extrêmement
2. As-tu été content(e) d'être en vie ?  
 pas du tout     un peu     modérément     beaucoup     extrêmement
3. As-tu été satisfait(e) de ta vie ?  
 pas du tout     un peu     modérément     beaucoup     extrêmement

Date: 30/09/2020

Mois Année

Bonjour,

Ce questionnaire est composé de plusieurs parties. Tes réponses nous sont nécessaires pour mieux comprendre ce qui, à ton avis, est important pour que tu te sentes heureux(se) et en bonne santé. Lis attentivement chaque question et coche la case qui correspond le plus à ce que tu penses.

Rappelle-toi, il n'y a pas de bonnes ou de mauvaises réponses ! Tes réponses sont secrètes, confidentielles, elles ne seront pas communiquées aux personnes de ton entourage.

Quand tu réponds, essaie de penser à la semaine dernière, c'est à dire aux sept derniers jours.

Es-tu une fille ou un garçon ?

- Fille  
 Garçon

Quel âge as-tu ?

14 ans

As-tu une maladie ou un problème de santé chronique ?

- Non  
 Oui

Le(s)quel(s) ? \_\_\_\_\_



## SUITE « TES SENTIMENTS »

Si tu penses à la semaine dernière...

- |                               | jamais                | parfois               | souvent               | très souvent          | toujours                         |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|
| 4. As-tu été de bonne humeur? | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> |
| 5. T'es-tu senti(e) gai(e) ?  | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> |
| 6. T'es-tu amusé(e) ?         | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> |

### 3. Ton humeur en général

Si tu penses à la semaine dernière...

- |   | jamais                           | parfois               | souvent               | très souvent          | toujours              |
|---|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1. As-tu eu l'impression que tu faisais tout de travers ?         | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 2. T'es-tu senti(e) triste ?                                      | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 3. T'es-tu senti(e) si mal que tu ne voulais rien faire ?         | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 4. As-tu eu l'impression que tout allait de travers dans ta vie ? | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 5. As-tu eu le sentiment que tu en avais assez ?                  | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 6. T'es-tu senti(e) seul(e) ?                                     | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 7. T'es-tu senti(e) sous pression ?                               | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

### 4. Ce que tu ressens

Si tu penses à la semaine dernière...

- |  | jamais                           | parfois               | souvent               | très souvent                     | toujours                         |
|--|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1. As-tu été content de ce que tu es ?   | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/>            |
| 2. As-tu été content(e) de tes vêtements ?   | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/>            | <input checked="" type="radio"/> |
| 3. As-tu été préoccupé(e) par ton apparence ?  | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/>            |
| 4. As-tu été jaloux / jalouse de l'apparence des autres filles ou garçons de ton âge ? | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/>            |
| 5. A propos de ton corps, aimerais-tu changer quelque chose ?                          | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/>            | <input checked="" type="radio"/> |

### 5. Le temps libre

Si tu penses à la semaine dernière...

- |   | jamais                | parfois               | souvent                          | très souvent          | toujours                         |
|---|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| 1. As-tu eu assez de temps pour toi ?                                 | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/>            |
| 2. As-tu pu faire ce que tu voulais pendant ton temps libre ?         | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/>            |
| 3. As-tu eu suffisamment l'occasion d'aller dehors ?                  | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> |
| 4. As-tu eu le temps de rencontrer des amis ?                         | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> |
| 5. As-tu pu choisir ce que tu voulais faire pendant ton temps libre ? | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> |

## 6. A la maison

Si tu penses à la semaine dernière...

	pas du tout	un peu	modérément	beaucoup	extrêmement
1. As-tu été compris(e) par tes parents ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2. T'es-tu senti(e) aimé(e) par tes parents ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>

Si tu penses à la semaine dernière...

	jamais	parfois	souvent	très souvent	toujours
3. As-tu été heureux / heureuse à la maison ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
4. Tes parents ont-ils eu assez de temps à te consacrer ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
5. Tes parents ont-ils été justes envers toi ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
6. As-tu pu parler à tes parents lorsque tu le voulais ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>

## 7. L'argent

Si tu penses à la semaine dernière...

	jamais	parfois	souvent	très souvent	toujours
1. As-tu eu assez d'argent pour faire les mêmes choses que tes ami(e)s ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
2. As-tu assez d'argent de poche pour tes dépenses ?	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Si tu penses à la semaine dernière...

	pas du tout	un peu	modérément	beaucoup	extrêmement
3. As-tu eu assez d'argent pour faire des choses avec tes amis ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>

## 8. Les amis

Si tu penses à la semaine dernière...

	jamais	parfois	souvent	très souvent	toujours
1. As-tu passé du temps avec tes ami(e)s ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
2. As-tu entrepris des choses avec d'autres filles et garçons de ton âge ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
3. T'es-tu amusé(e) avec tes ami(e)s ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
4. Vous êtes-vous entraînés toi et tes ami(e)s ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
5. As-tu pu parler de tout avec tes ami(e)s ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
6. As-tu pu compter sur tes ami(e)s ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

## 9. A l'école

Si tu penses à la semaine dernière...

	pas du tout	un peu	modérément	beaucoup	extrêmement
1. As-tu été heureux / heureuse à l'école ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2. Cela se passe-t-il bien à l'école ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3. As-tu été satisfait de tes professeurs ?	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

## Suite "A l'école"

Si tu penses à la semaine dernière...		jamais	parfois	souvent	très souvent	toujours
4.	As-tu été capable d'être attentive / attentive ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
5.	As-tu été content(e) d'aller à l'école ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
6.	T'es-tu bien entendu(e) avec tes professeurs ?	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

## 10. Toi et les autres enfants

Si tu penses à la semaine dernière...		jamais	parfois	souvent	très souvent	toujours
1.	As-tu eu peur d'autres filles et garçons de ton âge ?	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2.	D'autres filles et garçons se sont-ils moqués de toi ?	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3.	D'autres filles ou garçons de ton âge t'ont-ils brutalisé(e) ?	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

## Annexe 7 : Classification de Dellon

### Classification de recouvrement de la sensibilité selon Zachary, modifiée par Dellon en 1988

- S0 : pas de récupération de la sensibilité
- S1 : récupération de la sensibilité de la douleur profonde
- S1 + : récupération de la sensibilité de la douleur superficielle
- S2 : S1 + avec quelques sensibilités du toucher
- S2 + : S2 avec dysesthésies
- S3 : récupération de la douleur et de la sensibilité au toucher avec disparition des dysesthésies, test de discrimination des deux points (mobiles ou statiques > 15 mm)
- S3 + : S3 avec localisation correcte du stimulus et test de discrimination des deux points de 15 à 7 mm
- S4 : récupération complète, test de discrimination des deux points de 6 à 2 mm

## **RESUME**

**Titre** : Plasticité cérébrale et récupération fonctionnelle après réimplantation d'un membre chez l'adolescent, dans un contexte d'amputation traumatique : étapes clés.

**Introduction** : Les réimplantations de membre après amputations traumatiques chez l'enfant sont rares. Le pronostic de récupération est supposé meilleur en population pédiatrique. La survie du membre dépend de la perméabilité vasculaire satisfaisante. La récupération fonctionnelle est liée à la réorganisation du système nerveux périphérique (régénération axonale) et central (neuroplasticité). L'objectif de notre étude était d'étudier les phénomènes de neuroplasticité associés à la récupération fonctionnelle, dans un contexte de lésions nerveuses périphériques. Notre hypothèse est que l'apprentissage et l'entraînement, à travers la prise en charge rééducative et réadaptative, en favorisant la neuroplasticité facilitent la récupération fonctionnelle d'un membre supérieur réimplanté.

**Population, Matériels et Méthodes** : Etude chez un patient de 14 ans qui a bénéficié d'une réimplantation de son bras dominant (droit), après amputation traumatique au tiers proximal de l'humérus. Il a été hospitalisé dans le Centre d'Activité de Médecine Physique et de Réadaptation Pédiatrique de décembre 2019 à octobre 2020, où le patient a bénéficié d'un programme médico-rééducatif et réadaptatif pluriquotidiens avec un suivi clinico-radiologique régulier.

**Résultats** : La prise en charge de ce patient a permis une bonne récupération motrice hormis les muscles intrinsèques de la main, à l'inverse de résultats pauvres sur le plan sensitif. La réintégration sociale et familiale est satisfaisante. Il est indépendant pour quasiment tous les actes de la vie quotidienne. L'électromyogramme montre qu'il existe une repousse nerveuse en cours. Les IRM fonctionnelles ont été réalisées à 6 mois et 12 mois du traumatisme, afin d'évaluer la plasticité cérébrale. La récupération motrice dépend du cortex moteur primaire, de l'aire motrice supplémentaire et du cortex somesthésique primaire, mais aussi du cervelet ou du lobule pariétal inférieur. Ces activations sont majoritairement controlatérales au mouvement. La récupération sensitive dépend des cortex somesthésiques primaires. Les cartographies d'activation cérébrale montrent une activation bilatérale des cortex somesthésiques au cours de la stimulation de la main saine (gauche) et une activation controlatérale au cours de la stimulation de la main lésée (droite).

**Conclusion** : il existe des phénomènes de neuroplasticité intra-hémisphérique et interhémisphérique au décours d'une réimplantation de membre. Cette réorganisation cérébrale n'est pas le seul vecteur de la récupération fonctionnelle, qui dépend aussi du processus de régénération axonale. Au travers de la progression de la récupération motrice et du processus psychologique d'acceptation de la déficience, nous n'avons pas relevé d'étapes clés qui permettraient de guider les équipes de rééducation. Nous pensons que le guidage des récupérations et de la réinsertion est propre à chaque individu.

**Mots-clés** : amputation, réimplantation, pédiatrie, neuroplasticité, récupération fonctionnelle, restrictions de participation

## **ABSTRACT**

**Title** : Brain plasticity and functional recovery after replantation of an adolescent upper limb, in a context of traumatic amputation: the key steps.

**Introduction** : Limb replantation after traumatic amputation in children are rare. Prognosis recovery is assumed to be better in pediatric population. Limb survival depends on a adequate vascular permeability. The functional recovery is based on the reorganization of the peripheral nervous system (nerve regrowth) and on the central nervous system (neuroplasticity). The aim of the study was to review neuroplasticity process involved in functional recovery after peripheral nerve injury. Our hypothesis was that learning and training, through rehabilitative care, by promoting neuroplasticity would facilitate functional recovery of the replanted upper limb.

**Population, Materials and Methods** : A 14-year-old patient underwent replantation of the non-dominant upper limb, after traumatic proximal-third amputation. The patient stayed in the Pediatric Physical Medicine and Rehabilitation Activity Center from December 2019 to October 2020, where he benefited from a multi-daily medico-rehabilitation program with clinico-radiological follow-up was made for him.

**Results** : Patient care allowed a good motor recovery except intrinsic muscles. By contrast, sensory recovery was poor. Social and family reintegration were satisfying. He's independent for almost all activities of daily life. Electromyograph showed nerve regrowth. Functional magnetic resonance imaging was done at 6 month and 12 month from the trauma to evaluate cerebral plasticity. Motor recovery depend on primary motor cortex, supplementary motor area, primary somatosensory cortex, but also cerebellum or inferior parietal lobule. These activations are mostly contralateral to movement. Sensory recovery depends on bilateral primary somatosensory cortex. Brain activation maps showed bilateral activation of the somatosensory cortices during stimulation of the unaffected hand (left) and contralateral activation during stimulation of the injured hand (right).

**Conclusions** : There are processes of intrahemispheric and interhemispheric neuroplasticity after limb replantation. This brain reorganization is not the only vector of functional recovery, which also depends on the process of axonal regeneration. Through the progression of motor recovery and the psychological process of accepting the impairment, we have not identified any key steps that would guide the rehabilitation teams. We believe that the guidance of recovery and reintegration is specific to each individual.

**Keywords** : amputation, replantation, pediatrics, neuroplasticity, functional recovery, participation restriction

## RESUME

**Titre :** Plasticité cérébrale et récupération fonctionnelle après réimplantation d'un membre chez l'adolescent, dans un contexte d'amputation traumatique : étapes clés.

**Introduction :** Les réimplantations de membre après amputations traumatiques chez l'enfant sont rares. Le pronostic de récupération est supposé meilleur en population pédiatrique. La survie du membre dépend de la perméabilité vasculaire satisfaisante. La récupération fonctionnelle est liée à la réorganisation du système nerveux périphérique (régénération axonale) et central (neuroplasticité). L'objectif de notre étude était d'étudier les phénomènes de neuroplasticité associés à la récupération fonctionnelle, dans un contexte de lésions nerveuses périphériques. Notre hypothèse est que l'apprentissage et l'entraînement, à travers la prise en charge rééducative et réadaptative, en favorisant la neuroplasticité facilitent la récupération fonctionnelle d'un membre supérieur réimplanté.

**Population, Matériels et Méthodes :** Etude chez un patient de 14 ans qui a bénéficié d'une réimplantation de son bras dominant (droit), après amputation traumatique au tiers proximal de l'humérus. Il a été hospitalisé dans le Centre d'Activité de Médecine Physique et de Réadaptation Pédiatrique de décembre 2019 à octobre 2020, où le patient a bénéficié d'un programme médico-rééducatif et réadaptatif pluriquotidiens avec un suivi clinico-radiologique régulier.

**Résultats :** La prise en charge de ce patient a permis une bonne récupération motrice hormis les muscles intrinsèques de la main, à l'inverse de résultats pauvres sur le plan sensitif. La réintégration sociale et familiale est satisfaisante. Il est indépendant pour quasiment tous les actes de la vie quotidienne. L'électromyogramme montre qu'il existe une repousse nerveuse en cours. Les IRM fonctionnelles ont été réalisées à 6 mois et 12 mois du traumatisme, afin d'évaluer la plasticité cérébrale. La récupération motrice dépend du cortex moteur primaire, de l'aire motrice supplémentaire et du cortex somesthésique primaire, mais aussi du cervelet ou du lobule pariétal inférieur. Ces activations sont majoritairement controlatérales au mouvement. La récupération sensitive dépend des cortex somesthésiques primaires. Les cartographies d'activation cérébrale montrent une activation bilatérale des cortex somesthésiques au cours de la stimulation de la main saine (gauche) et une activation controlatérale au cours de la stimulation de la main lésée (droite).

**Conclusion :** il existe des phénomènes de neuroplasticité intra-hémisphérique et interhémisphérique au décours d'une réimplantation de membre. Cette réorganisation cérébrale n'est pas le seul vecteur de la récupération fonctionnelle, qui dépend aussi du processus de régénération axonale. Au travers de la progression de la récupération motrice et du processus psychologique d'acceptation de la déficience, nous n'avons pas relevé d'étapes clés qui permettraient de guider les équipes de rééducation. Nous pensons que le guidage des récupérations et de la réinsertion est propre à chaque individu.

**Mots-clés :** amputation, réimplantation, pédiatrie, neuroplasticité, récupération fonctionnelle, restrictions de participation

## ABSTRACT

**Title :** Brain plasticity and functional recovery after replantation of a adolescent upper limb, in a context of traumatic amputation: key steps.

**Introduction :** Limb replantation after traumatic amputation in children are rare. Prognosis recovery is assumed to be better in pediatric population. Limb survival depends of a sufficient vascular permeability. The functional recovery depend of the reorganization of peripheral nervous system (nerve regrowth) and central nervous system (neuroplasticity). The aim of the study were to review neuroplasticity process involved in functional recovery, after peripheral nerve injury. Our hypothesis were learning and training, through rehabilitative care, by promoting neuroplasticity facilitate functional recovery of the replanted upper limb.

**Population, Materials and Methods :** A 14-year-old patient underwent replantation of the non-dominant upper limb, after traumatic proximal-third amputation. The patient stayed in the Pediatric Physical Medicine and Rehabilitation Activity Center from December 2019 to October 2020, where he benefited from a multi-daily medico-rehabilitation program with clinico-radiological follow-up.

**Results :** Patient care allowed a good motor recovery except intrinsic muscles. By contrast, sensory recovery is poor. Social and family reintegration are good. He's independent for almost all activities of daily living. Electromyograph shows nerve regrowth. Functional magnetic resonance imaging was done at 6 month and 12 month from the trauma to evaluate cerebral plasticity. Motor recovery depends of primary motor cortex, supplementary motor area, primary somatosensory cortex, but also cerebellum or inferior parietal lobule. These activations are mostly contralateral to movement. Sensory recovery depend of bilateral primary somatosensory cortex. Brain activation maps show bilateral activation of the somatosensory cortices during stimulation of the unaffected hand (left) and contralateral activation during stimulation of the injured hand (right).

**Conclusions :** There are process of intrahemispheric and interhemispheric neuroplasticity after limb replantation. This brain reorganization is not the only vector of functional recovery, which also depends on the process of axonal regeneration. Through the progression of motor recovery and the psychological process of accepting the impairment, we have not identified any key steps that would guide the rehabilitation teams. We believe that the guidance of recovery and reintegration is specific to each individual.

**Keywords :** amputation, replantation, pediatrics, neuroplasticity, functional recovery, participation restriction