

UNIVERSITÉ DE LILLE

UFR3S-MÉDECINE
Année : 2025

THÈSE POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN MÉDECINE

**Facteurs associés à la perception de l'imagerie motrice post-AVC :
étude préliminaire**

Présentée et soutenue publiquement le 1er octobre à 18H00
au Pôle Recherche
par **Penelope BOZON**

JURY

Président :

Monsieur le Professeur Arnaud DELVAL

Assesseurs :

Madame le Docteur Charlotte ROSSELIN

Madame le Docteur Anne BENOIT

Directeur de thèse :

Monsieur le Professeur Etienne ALLART

AVERTISSEMENT

La Faculté n'entend donner aucune approbation aux opinions émises dans les thèses :
celles-ci sont propres à leurs auteurs.

SIGLES

AVC : Accident Vasculaire Cérébral

EEG : Electroencéphalogramme

FM : Fugl-Meyer

FMA : Fugl-Meyer Assessment

IA : Items Additionnels

IMe : Imagerie Mentale

IMo : Imagerie Motrice

IRM : Imagerie par Résonance Magnétique

MIQ : Movement Imagery Questionnaire

MRC : Medical Research Council

CIMT : Thérapie du mouvement induite par la contrainte (Constraint-Induced Movement Therapy).

RÉSUMÉ

Facteurs associés à la perception de l'imagerie motrice post-AVC : étude préliminaire.

Contexte : les AVC représentent la première cause acquise de handicap neurologique, pouvant engendrer des déficiences motrices, sensibles, et cognitives, responsables d'un handicap fonctionnel majeur. La rééducation s'appuie sur le principe de neuroplasticité cérébrale, notamment en imagerie motrice. Cependant un certain nombre de déficiences peuvent perturber l'illusion du mouvement. L'objectif de cette étude était donc de déterminer les facteurs associés aux capacités de perception d'illusion du mouvement, autrement dit d'imagerie motrice, d'un point de vue kinesthésique ou externe, chez les patients ayant été victimes d'un accident vasculaire cérébral.

Méthode : Les tests se déroulaient dans le service de Rééducation Neurologique Cérébrolésion du CHU de Lille. Les patients réalisaient un questionnaire standardisé, le MIQ-3f, et des tâches mentales spécifiques des mouvements du membre supérieur. Des comparaisons entre performances du membre supérieur et inférieur ont été réalisées, tout comme celles entre mouvements proximaux et distaux. Les liens avec la sévérité des déficiences motrices et sensibles, la douleur et la négligence spatiale ont été explorés.

Résultats : treize patients ont été inclus. Les performances n'étaient pas différentes entre modalités (externe vs kinesthésique), membre supérieur et inférieur et proximal vs distal. Les sujets présentant une lésion hémisphérique droite avaient tendance à avoir une perception moins bonne de l'illusion motrice, pour le MIQ en modalité externe ($p=0,004$), pour le membre supérieur en modalité kinesthésique ($p=0,048$), et pour le membre inférieur en modalité externe ($p=0,006$). La sensibilité pallesthésique était significativement corrélée au score d'imagerie motrice du membre supérieur des items additionnels d'un

point de vue kinesthésique ($p=0,013$) et externe ($p=0,004$). Aucun lien n'a été mis en évidence avec la latéralité, le sexe, l'âge et le délai depuis l'AVC. Concernant les déficiences, la sévérité n'était, pour la plupart d'entre elles, pas associée à la perception de l'illusion du mouvement.

Conclusion : Les résultats montrent que les performances en imagerie motrice étaient globalement comparables selon les modalités kinesthésique et externe, entre les membres supérieurs et inférieurs et entre les mouvements proximaux et distaux. Par ailleurs, les patients présentant une lésion de l'hémisphère droit ainsi que ceux avec des troubles proprioceptifs semblaient avoir des capacités d'imagerie motrice plus limitées. Cependant, ces résultats préliminaires étaient limités par le faible nombre de sujets et doivent être consolidés.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
1. L'accident vasculaire cérébral	1
1.1. Épidémiologie	1
1.2. Retentissement global	2
1.3 La prise en charge rééducative	5
2. Imagerie mentale et motrice	7
2.1. Imagerie mentale et motrice	7
2.2. Thérapie miroir et réalité virtuelle	8
2.3. Neuroanatomie fonctionnelle	9
2.4 Quels sont les freins potentiels à l'action de l'imagerie motrice après un AVC ?	11
2.5. Facteurs influençant l'imagerie motrice	12
3. Objectif de l'étude	13
PATIENTS ET MÉTHODE	14
1. Design expérimental	14
2. Critères d'éligibilité	14
2.1 Critères d'inclusion	14
2.2 Critères de non inclusion	14
3. Évaluations	15
3.1 Évaluation des capacités de perception de l'illusion du mouvement	15
3.2 Évaluation des déficiences	17
4. Analyses statistiques	21
RÉSULTATS	22
1. Participants	22
2. Capacité de perception du mouvement	24
2.1. MIQ-3f	24

2.2. Items additionnels du membre supérieur et inférieur	24
2.3. Comparaison de l'illusion du mouvement des membres supérieurs et inférieurs	26
2.4. Comparaison de l'illusion des mouvements distaux et proximaux	27
3. Déficiences associées	28
4. Association entre déficiences et capacités de perception d'illusion du mouvement	31
DISCUSSION	35
1. Capacité de perception de l'illusion du mouvement d'un point de vue kinesthésique et externe	35
2. Quelle est la spécificité des membres (inférieur vs supérieur) et caractère proximal ou distal du mouvement ?	36
3. Quels facteurs influencent l'imagerie motrice ?	38
4. Forces et limites de l'étude	43
5. Perspectives futures	45
5.1 Poursuite des inclusions de patients	45
5.2 Comparaison de la réalité virtuelle et thérapie miroir	45
CONCLUSION	46
BIBLIOGRAPHIE	47
ANNEXES	53
Annexe 1 : Questionnaire MIQ-3f	53
Annexe 2 : Test des cloches	57

INTRODUCTION

1. L'accident vasculaire cérébral

1.1. Épidémiologie

Les accidents vasculaires cérébraux sont considérés comme un problème de santé publique important dans le monde. Ils représentent la première cause de handicap acquis d'origine neurologique chez l'adulte (Docteure Elisabeth Fery-Lemonnier, Conseillère générale des établissements de santé).

La prévalence au 1er janvier 2023 est de plus d'un million d'adultes vivant avec un antécédent d'AVC en France. Les AVC ont causé plus de 30 000 décès en 2022 (Figure 1), représentant la première cause de mortalité cardio-neuro-vasculaire chez les femmes avec environ 18 000 décès annuels (d'après Santé Publique France).

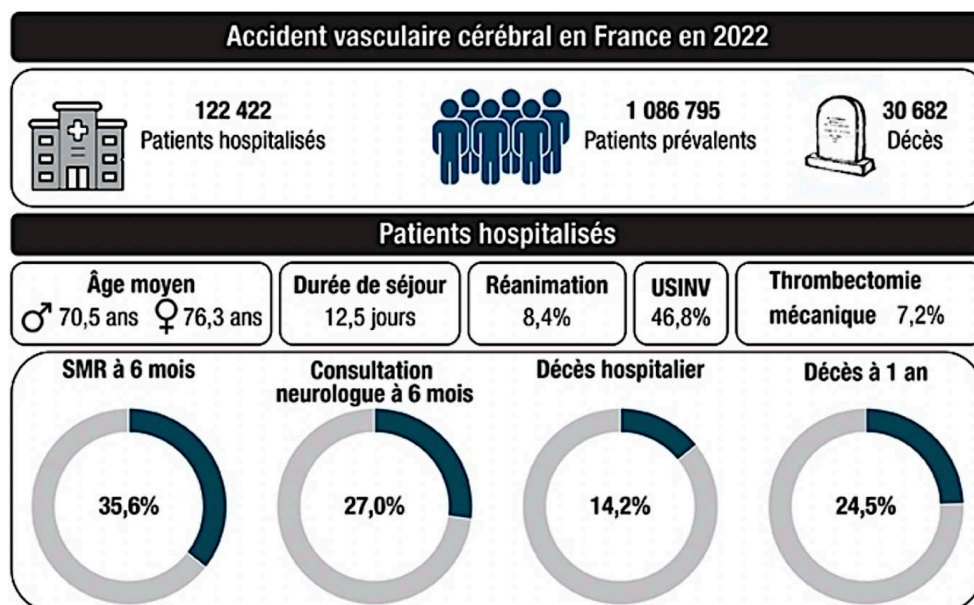


Figure 1 : épidémiologie de l'AVC en France en 2022. Tiré de Gabet A et al. Arch Cardiovasc Dis. 2024;117(12):682-92.

Cependant, les survivants d'un AVC peuvent subir des traitements longs et difficiles, ce qui les amènent à adopter des attitudes passives à l'égard de la réadaptation.

1.2. Retentissement global

En fonction du territoire, il peut s'agir de déficiences motrices (hémiplégie, trouble de déglutition), sensibles (hypoesthésie superficielle ou profonde, allodynie, douleur neuropathique), ou cognitives (aphasie, apraxie, agnosie, négligence spatiale unilatérale, fonctions exécutives...). Nous nous attacherons principalement aux déficiences d'intérêt pour ce travail.

1.2.1 Déficiences neuromotrices

L'hémi-parésie est la conséquence motrice principale à la suite d'un AVC. À noter qu'une atteinte de l'artère cérébrale moyenne superficielle est responsable d'un déficit à prédominance brachio-faciale, pouvant être associé à des troubles phasiques et à une héminégligence.

Les autres manifestations neuromotrices peuvent être des troubles du tonus musculaire avec une hypotonie (correspondant à la phase flasque initiale du syndrome pyramidal) et surtout une hypertonie, comme la spasticité (correspondant à une exagération vitesse dépendante du réflexe myotatique d'étirement), mais aussi d'autres formes d'hypertonie (24). En conséquence, des rétractions musculaires peuvent s'installer, limitant les amplitudes articulaires passives. On peut retrouver également un «syndrome épaule-main», qui correspond à un syndrome douloureux régional complexe touchant le poignet et l'épaule, compliquant souvent une subluxation inférieure de l'épaule par non-coaptation de la tête humérale devant la parésie des muscles de la coiffe des rotateurs, parfois majorée par la spasticité.

1.2.2 Déficiences sensibles

Les troubles sensitifs sont fréquents et parfois sous-estimés, bien qu'ils aient un impact important sur la qualité de vie.

Concernant la topographie, il peut s'agir d'une atteinte du visage, d'un membre ou l'hémicorps entier, elle est controlatérale à la lésion.

L'atteinte peut concerner différents types de sensibilité :

- La sensibilité épicrotique superficielle (ou extéroceptive), conduisant à une hypoesthésie ou même anesthésie, à une hyperesthésie ou à une allodynie. La lésion peut aussi être responsable de douleurs neuropathiques.
- La sensibilité protopathique, correspondant au tact grossier.
- La sensibilité proprioceptive arthrokinétique, c'est-à-dire la capacité à percevoir la position du membre dans l'espace les yeux fermés, pouvant être responsable d'une altération du schéma corporel (donnant l'impression que le membre n'appartient plus au corps).
- La sensibilité vibratoire ou pallesthésique.
- La stéréognosie, c'est-à-dire la faculté d'identifier des objets les yeux fermés, par exemple positionnés dans la paume de la main.

1.2.3 Négligence spatiale

C'est l'incapacité à répondre ou à s'orienter vers les stimuli contralatéraux à une lésion, non expliquée par un déficit sensoriel ou moteur (23). Du fait de la compétence de l'hémisphère droit dans le traitement des informations spatiales, l'héminégligence concerne le plus souvent l'espace gauche (corporel et/ou extracorporel), en cas de lésion hémisphérique droite.

Le *syndrome d'Anton-Babinski* est caractérisé par la présence d'une héminégligence gauche, d'une hémiasomatognosie (impression de non-appartenance de l'hémicorps gauche) et d'une anosognosie de l'hémiplégie.

Les régions anatomiques concernées par l'héminégligence sont le lobule pariétal inférieur et le cortex temporal supéro-externe (gyrus temporal supérieur) de l'hémisphère droit. Plus rarement, le cortex préfrontal dorsolatéral, le thalamus et le noyau caudé.

Une méta-analyse de Pascal Molenberghs et al. en 2012 (12) a permis de cartographier des lésions à l'origine de l'extinction visuelle, la négligence allocentrique, égocentrique, personnelle et extrapersonnelle (Figure 2). Par exemple, les études d'imagerie cérébrale du test de bissection de ligne ont impliqué les régions corticales postérieures, notamment le lobule pariétal inférieur et supérieur (54). De même, les études d'imagerie sur la recherche visuelle d'une tâche ont montré que l'activité dans le sillon frontal supérieur est associée à une recherche visuelle consciente (55). Enfin, les déficits aux tâches de barrage tendent à être associés à des lésions plus antérieures (Figure 2B), tandis que les

déficits lors des tests de bissection de ligne sont associés à des lésions plus postérieures (Figure 2A).

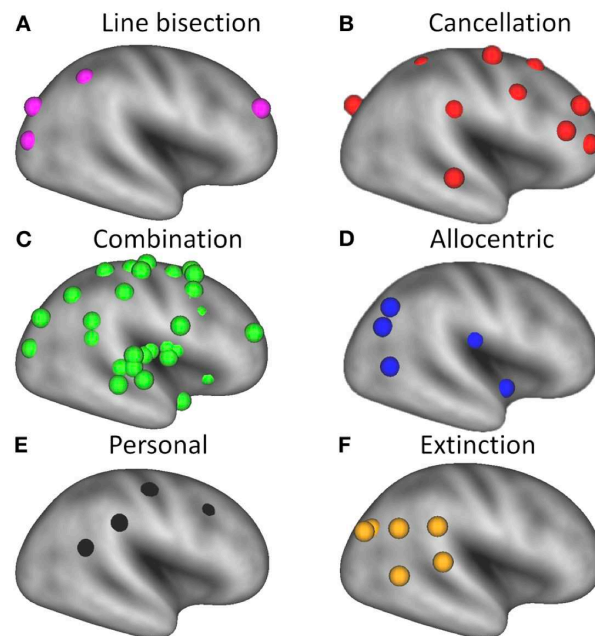


Figure 2 : Vue d'ensemble des régions cérébrales associées aux différents déficits chez les patients présentant une négligence spatiale unilatérale, superposée à un modèle de cerveau «inflated» à l'aide du logiciel CARET.

- A -Sphères violettes : négligence évaluée par des tâches de bissection de ligne
- B -Sphères rouges : négligence évaluée par des tâches d'annulation
- C -Sphères vertes : négligence évaluée par une combinaison de tâches
- D -Sphères bleues : négligence allocentrique
- E -Sphères noires : négligence personnelle
- F -Sphères orange : extinction spatiale

Molenberghs, P., Sale, M. V., & Mattingley, J. B. (2012). *Is there a critical lesion site for unilateral spatial neglect? A meta-analysis using activation likelihood estimation. Frontiers in Human Neuroscience, 6, 78 (12).*

1.2.4 Retentissement fonctionnel

Toutes ces déficiences ont une importance clinique majeure, impactant la motricité globale, la marche, la préhension, la communication... En ce qui concerne le membre supérieur, l'ensemble de ces déficiences sont notamment responsables d'un désapprentissage acquis, c'est-à-dire que le patient cesse d'utiliser son membre de manière spontanée même s'il existe un potentiel fonctionnel. Il s'agit d'une forme d'exclusion comportementale, du fait des difficultés d'utilisation et de la répétition d'échecs. En conséquence, le membre supérieur est progressivement mis de côté, malgré des capacités résiduelles qui pourraient être rééduquées (49).

1.3 La prise en charge rééducative

1.3.1 Importance de la rééducation

La récupération de la fonctionnalité du membre supérieur ou inférieur est un objectif clé de la rééducation, étant donné qu'elle permet aux survivants d'être plus autonomes dans la vie quotidienne (56).

En effet, à la suite d'une lésion cérébrale, une cascade d'événements moléculaires et cellulaires se déclenche dans les tissus environnants, entraînant des modifications de l'anatomie et de la physiologie des structures atteintes (13). Cependant, des processus adaptatifs peuvent apparaître dès les premiers stades après la lésion, favorisant des modifications neuroplastiques et pouvant restaurer certaines fonctions (14). L'ensemble de ces données prouve que le cerveau reste plastique après une lésion neuronale (13), et que l'entraînement et les comportements peuvent modifier la structure et la fonction neuronales chez les cerveaux sains comme lésés.

Nous pouvons proposer avec l'ensemble de ces données que le principe de neuroplasticité peut constituer la base d'approches thérapeutiques, notamment en rééducation.

Par ailleurs, la période de réorganisation maximale semble être celle qui suit immédiatement la lésion jusqu'à 3 à 6 mois.

1.3.2 Méthodes et moyens de rééducation

La rééducation s'appuie sur le principe de neuroplasticité cérébrale, c'est-à-dire la capacité du cerveau à réorganiser ses connexions neuronales par le réapprentissage et l'environnement. Plusieurs approches sont pratiquées :

- L'entraînement en kinésithérapie, par un éveil moteur ou un renforcement musculaire adapté du côté parétique puis un travail de l'équilibre, pour permettre dans un second temps une reprise sécurisée de la marche. En ergothérapie, dans le cadre du membre supérieur, l'accent est mis sur le travail de la force de préhension et de la dextérité fine dans le but de redonner une fonction au membre atteint et promouvoir son utilisation.
- La thérapie du mouvement induite par la contrainte (Constraint-Induced Movement Therapy – CIMT) est un des moyens utilisé pour favoriser l'utilisation du membre atteint. Elle consiste en la restriction physique du membre sain (par une attelle par exemple)

pour forcer l'utilisation du membre déficient. Une revue de la littérature réalisée en 2006 (16) a analysé les modifications neurales associées à la CIMT chez les patients ayant été victime d'un AVC. Il en est retenu que la CIMT est associée à des modifications significatives de la plasticité cérébrale, notamment des réorganisations corticales observées en stimulation magnétique transcrânienne (TMS) et par l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf). Ces changements sont cliniquement corrélés avec des améliorations de l'utilisation du membre atteint. D'après une recherche expérimentale de 2020 (17) qui s'est intéressée aux mécanismes moléculaires, la CIMT améliore la plasticité des dendrites et des épines dendritiques dans le cortex sensorimoteur ipsilatéral et controlatéral, en augmentant l'expression des récepteurs glutamatergiques.

- Des dispositifs robotiques comme des exosquelettes sont utilisés en rééducation. Ils permettent une répétition standardisée de mouvements, associés à un feedback sensitif et moteur, favorisant la reconfiguration corticale. Par exemple, par l'apprentissage d'un schéma de marche par des exosquelettes en annulant le poids du corps.
- La stimulation cérébrale non invasive (TMS, tDCS) est également utilisée pour moduler l'excitabilité corticale afin de favoriser la plasticité cérébrale.
- Enfin, l'imagerie motrice (ou même l'observation de l'action) permet l'activation de circuits neuronaux moteurs sans que le mouvement soit réellement effectué.

1.3.3 Limites des techniques utilisées

Malgré leur efficacité, ces approches ne sont pas toujours applicables à tous les patients. En effet, en phase précoce, certains protocoles nécessitent un certain niveau de récupération initiale qui n'est pas acquis dès les premiers jours qui suivent l'AVC. Par ailleurs, d'après une étude de Carmichael (15), il existerait un effet délétère d'une rééducation trop précoce. Le mécanisme serait une suractivation des récepteurs NMDA, favorisant la libération de glutamate, elle-même responsable d'une excitation neurotoxique, ainsi entraînant une aggravation la lésion cérébrale (18). À l'inverse, une autre étude montre qu'un entraînement modéré et précoce (28 jours de course sur tapis après un AVC chez le rat) réduit le volume de l'infarctus et améliore la récupération, du fait d'une augmentation des facteurs neurotrophiques et d'une diminution des signaux d'apoptose (19). Cela suggère que le type et l'intensité de l'activité motrice ont une influence sur l'aggravation ou la régénération de la lésion cérébrale. Cependant, les

études menées ne suffisent pas à savoir si ce principe de sur-sollicitation trop précoce du membre atteint est délétère chez l'humain (et non chez l'animal).

Concernant les patients sévèrement atteints, l'absence de mouvement volontaire, les troubles cognitifs, associés au manque de motivation, limitent la mise en œuvre des thérapies actives ou de la mise en place d'auto-exercice.

2. Imagerie mentale et motrice

Les techniques de représentation du mouvement, également appelées imagerie motrice ou mentale, représentent un moyen d'améliorer la fonction motrice utilisable quel que soit le niveau de déficience motrice. Elles peuvent être définies comme tout type de thérapie utilisant la représentation du mouvement, notamment l'observation ou l'imagination d'action, ou les deux.

2.1. Imagerie mentale et motrice

L'imagerie mentale est un processus cognitif dynamique par lequel le sujet évoque une représentation imaginaire dans son esprit dans le but d'apprendre ou de perfectionner une action (1). Elle désigne une forme d'entraînement dans laquelle une représentation interne du mouvement est activée et son exécution est simulée mentalement de manière répétée, sans activité physique (2). Par exemple, il peut s'agir d'un gymnaste de haut niveau qui mentalise l'enchaînement de tous ses mouvements avant une compétition. Bien que l'imagerie fonctionnelle ait montré des schémas d'activation corticale similaires à ceux du mouvement, l'efficacité clinique de ces méthodes en matière de rééducation et de récupération fonctionnelle reste à démontrer (1).

L'imagerie motrice est un sous-type d'imagerie mentale, correspondant à une répétition mentale interne de mouvements physiques (3), accompagnée d'informations sensorielles, sans stimulus externe direct, pouvant activer des zones sensori-motrices similaires à celles activées par le mouvement réel (4). Il s'agit de la capacité à imaginer l'exécution d'un mouvement ou d'une action sans la réaliser réellement.

L'imagerie motrice peut être réalisée sous deux formes :

- externe (visuelle), dans laquelle les patients imaginent le mouvement du point de vue d'un observateur externe (ils imaginent en quelque sorte une vision d'un avatar réalisant le mouvement) ;
- interne (kinesthésique), où les patients imaginent la sensation de leur propre corps en mouvement (telle que l'étirement musculaire et la mobilisation des articulations).

2.2. Thérapie miroir et réalité virtuelle

Les interventions que sont la thérapie par le miroir, la réalité virtuelle, l'imagerie mentale ou motrice, sont des solutions simples qui augmentent la participation et la motivation des patients.

Concernant la thérapie par le miroir, elle est définie comme une intervention qui utilise un miroir pour créer une image du membre supérieur ou inférieur d'un côté à partir des mouvements contralatéraux. Elle fournit ainsi à l'individu un feedback visuel de mouvements du membre caché. Son développement date des années 90 pour la prise en charge des douleurs du membre fantôme chez l'amputé (*Mirror therapy for phantom limb pain* de VS Ramachandran et D Rogers-Ramachandran, 1996). Le postulat de base repose sur le fait que la disparition d'un membre pouvait entraîner des «maladaptations» cérébrales, sources de douleur du membre fantôme. Le schéma corporel est ainsi perturbé et le lien entre le cerveau et le membre est rompu. Le but était donc de proposer au cerveau du patient une image normale et saine du corps afin de recréer des mouvements sur le membre disparu. L'utilisation de la thérapie miroir s'est ensuite développée dans d'autres applications, dont la récupération motrice et la négligence spatiale post-AVC (57).

En ce qui concerne la réalité virtuelle, elle consiste en la création d'un environnement artificiel en trois dimensions dans lequel le patient peut interagir de manière immersive. Cet environnement est généralement généré à l'aide d'un casque de réalité virtuelle ou d'une salle virtuelle équipée de capteurs de mouvement, ou de caméras. Plusieurs études suggèrent que son utilisation combinée à de l'imagerie motrice peut être bénéfique pour améliorer les capacités de kinesthésie, la planification motrice et la fonction motrice chez les patients cérébrolésés. Par exemple, une étude de Weiss et al. (2014) a observé que la réalité virtuelle améliore l'imagerie motrice des mouvements de la main chez des patients

en post- d'AVC. Une autre étude de Vourvopoulos et al. (2016) a utilisé la réalité virtuelle pour améliorer la force musculaire chez des patients atteints de sclérose en plaques, en visualisant leur jambe dans un miroir virtuel.

En plus de son travail sur la thérapie miroir, le Dr Ramachandran a également étudié l'imagerie mentale ou motrice, afin de comprendre la façon dont le cerveau traite les informations sensorielles et comment l'illusion du mouvement peut affecter la perception du corps et son comportement. Il a découvert que l'imagerie motrice peut être utilisée pour aider les patients à surmonter certaines conditions, telles que la douleur chronique et le syndrome du membre fantôme, et que cette pratique peut être utilisée pour améliorer la fonction motrice chez les patients atteints d'AVC ou d'une autre affection neurologique (Ramachandran, V.S., & Rogers-Ramachandran, D. 1996). Dans l'ensemble, ses recherches sur l'imagerie mentale ont contribué à notre compréhension de la façon dont le cerveau traite les informations sensorielles et comment l'imagination du mouvement peuvent affecter le schéma corporel. Ses découvertes ont également ouvert la possibilité de nouvelles approches thérapeutiques pour aider les patients cérébrolésés.

2.3. Neuroanatomie fonctionnelle

En 1996, Decety a suggéré qu'imaginer un mouvement active les mêmes zones du cerveau que celles activées lorsque les mouvements sont réellement exécutés. De plus, les techniques d'enregistrement et de stimulation du système nerveux central ont montré qu'au cours de ces trois dernières décennies, l'imagerie motrice partageait des sites d'activation corticale et sous-corticale communs à ceux de l'action réellement exécutée (9). L'étude de Stephan KM et al. (7) en 2018 a également montré que de nombreuses zones cérébrales sont activées lors de l'exécution de tâches motrices, même lorsque les sujets ne bougent pas.

Ces résultats renforcent l'idée selon laquelle la stimulation mentale de l'action déclenche l'activation neuronale des zones motrices pertinentes. Nous pouvons alors «exercer» le cerveau en l'absence de mouvement physique (Figure 3).

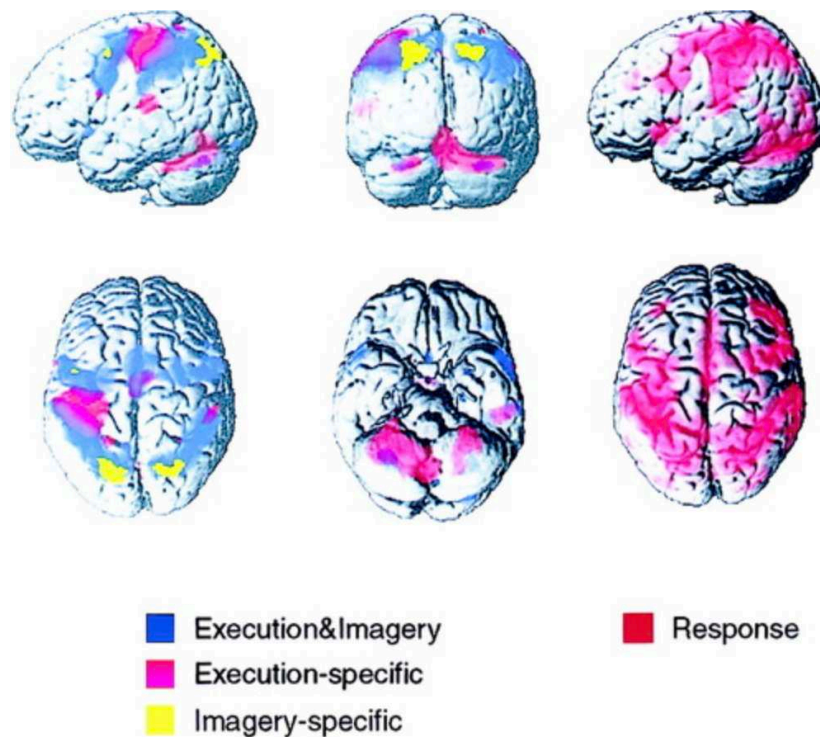


Figure 3 : propriétés fonctionnelles des régions cérébrales associées à l'exécution et à l'imagerie motrices. Journal of Neurophysiology, tiré de Hanakawa, T et al., 2003 (10).

Les bases neurophysiologiques sous-jacentes à l'imagerie motrice sont constituées du système de neurones miroirs, situé dans la partie rostrale du lobe pariétal inférieur, de la pars opercularis du gyrus frontal inférieur et de la partie ventrale du cortex prémoteur (Jeannerod, M et al. 2001). Les unités qui composent ce système sont une classe de neurones visuomoteurs qui sont activés lors de l'exécution ou de l'observation de mouvements visant un objectif. Au cours de l'imagerie motrice, les aires motrices impliquées dans le processus sont le cortex moteur primaire et plusieurs aires prémotrices, notamment l'aire motrice supplémentaire, et les parties ventrale et dorsale du cortex prémoteur (Figure 4).

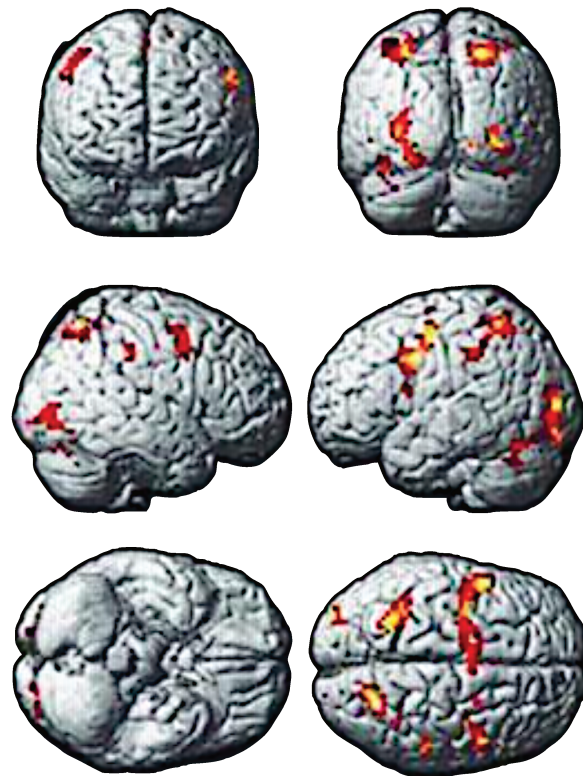


Figure 4 : représentation des structures cérébrales activées à la fois pour les actions imaginées et réalisées soit le cortex prémoteur, le cortex moteur, aire motrice supplémentaire, le lobule pariétal inférieur, le gyrus frontal inférieur et moyen, le cervelet. Tiré de Meister et al., 2004.

De plus, selon la théorie de la simulation (Jeannerod and Decety, 1995), une action imaginée et une action réalisée sont basées toutes les deux sur les mêmes représentations sensorimotrices. La loi de l'isochronie du mouvement suggère que la durée du mouvement imaginé est égale à la durée du mouvement exécutée. Chez l'adulte, les protocoles d'imagerie mentale rapportent une isochronie dans les deux modalités, ce qui est un indicateur de fiabilité des représentations internes de l'action.

2.4 Quels sont les freins potentiels à l'action de l'imagerie motrice après un AVC ?

Après un AVC, il existe une perturbation de nos représentations internes du mouvement. Ces dernières prédisent au système nerveux central les conséquences sensorielles et motrices d'une action avant qu'elle soit réalisée. Cette représentation interne des segments corporels en mouvement a été conceptualisée sous le terme de schéma corporel (Head and Holmes, 1911; Maravita et al, 2003; Dijkerman and de Haan, 2007, Naito et al, 2015). La fonction principale du schéma corporel est de permettre l'exécution

de ses propres actions (Rizzolatti et al, 2001 ; Miall, 2003; Centelles et al, 2011). Un déficit des modèles internes impacterait donc négativement le contrôle prédictif de l'action. L'imagerie motrice sollicite ces modèles, car en simulant le mouvement, le cerveau s'auto-entraîne à prédire et corriger ce qui se passerait. Même sans retour sensoriel réel (puisque'il n'y a pas de mouvement), les structures responsables de la planification motrice sont renforcées.

Les individus impliqués dans l'imagerie motrice répètent des éléments de la tâche, leur donnant ainsi la possibilité de prévoir les résultats de leurs actions sur la base de leur expérience antérieure. Les participants pratiquant la thérapie par imagerie mentale anticipent des trajectoires d'action possibles, qu'ils sont plus susceptibles d'utiliser pour l'exécution d'un mouvement réel. Ainsi, les individus développent des moyens plus efficaces d'aborder les tâches motrices.

2.5. Facteurs influençant l'imagerie motrice

Dans l'utilisation de l'imagerie motrice, il est important que le sujet puisse avoir une bonne illusion du mouvement. Or, chez les personnes victimes d'un AVC, l'illusion du mouvement et le schéma corporel peuvent être perturbés par un certain nombre de déficiences.

En premier lieu, les déficiences proprioceptives sont caractérisées par une altération de la perception de la position et du mouvement d'un membre, par une mauvaise intégration des signaux proprioceptifs et visuels.

De plus, on note un désapprentissage acquis, qui correspond à la perte de capacité à effectuer des mouvements automatiques ou appris, du fait d'une altération de la mémoire procédurale pour les mouvements (d'où la difficulté à réapprendre les mouvements après une lésion cérébrale). Ce désapprentissage est favorisé par la parésie.

En effet, une mobilisation moindre d'un segment corporel peut entraîner des remaniements corticaux pouvant affecter la représentation internes du membre parétique et ainsi altérer les capacités d'illusion du mouvement (62).

Enfin, la négligence spatiale est responsable d'un manque d'initiation du côté affecté et d'une altération de la planification spatiale du mouvement, du fait du manque de prise en compte de l'espace du côté parétique. En ce sens on comprend que le schéma corporel, c'est-à-dire la conscience corporelle de propriété du corps est perturbée en raison d'un manque d'intégration des signaux sensoriels.

De plus, la négligence de l'espace du côté parétique est associée à un trouble du schéma corporel (c'est-à-dire la conscience que nous avons de notre corps, de ses parties, de sa position dans l'espace et de ses mouvements, c'est une construction mentale qui permet de localiser et de coordonner les différentes parties du corps, même sans les voir), le tout responsable d'une négligence motrice où les mouvements du côté négligé sont plus difficiles.

Malgré les déficiences qu'ils présentent, les individus victimes d'un AVC peuvent être capables de générer des représentations internes d'actions même s'ils n'ont pas la capacité d'effectuer ces actions. Au cours des 20 dernières années, que ce soit séparément ou en combinaison avec la pratique physique, l'imagerie motrice a démontré des résultats prometteurs pour la rééducation, notamment la marche, après un AVC (6).

En synthèse, pour pouvoir engager au mieux les mécanismes en jeu dans l'imagerie motrice, il semble important que l'illusion du mouvement soit bien évoquée chez le sujet. Or, comme nous l'avons vu, un certain nombre de déficiences physiques et cognitives peuvent perturber le mouvement à la fois dans ses aspects de planification, de production et de contrôle. Il existe par ailleurs un certain nombre de déficiences qui peuvent altérer la perception et l'intégration du schéma corporel. Par ailleurs, il existe peu de données sur les différences entre membre inférieur et supérieur d'une part, et sur les mouvements proximaux vs distaux.

3. Objectif de l'étude

L'objectif de cette étude était de déterminer les facteurs associés aux capacités de perception d'illusion du mouvement, autrement dit d'imagerie motrice, d'un point de vue interne ou externe, chez les patients ayant été victimes d'un accident vasculaire cérébral :

- En s'intéressant aux membres inférieur et supérieur atteints, et en dissociant les articulations proximales et distales.
- En étudiant l'impact des troubles sensitifs, moteurs et de la négligence spatiale.

PATIENTS ET MÉTHODE

1. Design expérimental

Il s'agissait d'une étude exploratoire monocentrique, prospective, analytique.

Les différents tests se déroulaient dans le service de Rééducation Neurologique Cérébrolésion du CHU de Lille.

2. Critères d'éligibilité

2.1 Critères d'inclusion

Les critères d'inclusion étaient :

- patients âgés de 18 à 80 ans ;
- victimes d'un AVC unilatéral unique (quelle qu'en soit l'étiologie) ;
- responsable d'une hémiparésie (au moins au stade initial).

2.2 Critères de non inclusion

Nous n'avons pas inclus les patients :

- présentant une atteinte cognitive ou sensorielle ne permettant pas la bonne compréhension du protocole de l'étude ;
- présentant une atteinte motrice non unilatérale ;
- présentant une pathologie sur-ajoutée (neurologique ou locomotrice) responsable d'une atteinte neuromotrice ;
- ne sachant pas lire ou écrire le français ;
- sous mesure de protection judiciaire.

3. Évaluations

Le recrutement et l'évaluation des participants étaient réalisés par un seul évaluateur.

3.1 Évaluation des capacités de perception de l'illusion du mouvement

Les participants effectuaient les tests d'imagerie motrice selon une perspective interne (kinesthésique) ou externe (visuelle), via :

- le questionnaire standardisé MIQ-3f ;
- des items d'évaluation spécifiques ajoutés pour mieux dissocier les mouvements du membre supérieur.

Les participants effectuaient donc un test d'imagerie motrice interne selon le MIQ-3f («a»), et selon les items d'évaluation spécifiques («b»), ainsi que d'imagerie motrice externe selon le MIQ-3f («c») et selon les items d'évaluation spécifiques («d»). Lors de la réalisation des tests, afin d'éviter un éventuel biais de performance, les différentes modalités (a, b, c ou d) étaient randomisées par blocs aléatoires (soit «abcd» ou «abdc» ou «bcad» etc).

Concernant la position de départ, que ce soit pour le MIQ-3f ou le protocole standardisé du membre supérieur, les participants étaient assis (sur une chaise ou dans un fauteuil roulant), les deux mains posées sur les cuisses (excepté pour les patients en triple flexion du membre supérieur).

3.1.1 MIQ-3f (Annexe 1)

Dans ce questionnaire, il leur était demandé de réaliser des tâches mentales pour une variété de mouvements et ensuite d'apprécier les capacités à percevoir l'illusion de mouvement (auto-évaluation). Les estimations données n'étaient pas conçues pour évaluer la bonne ou la mauvaise qualité de la façon dont ces tâches mentales étaient exécutées. Elles visaient à mettre en évidence la capacité des sujets à se représenter ces tâches dans des mouvements différents. Chacun des énoncés décrivait une action ou un mouvement particulier. Le patient revenait à la position de départ du mouvement entre chaque type de mouvement.

Ensuite en fonction de ce qui leur était demandé de faire :

1. soit le patient formait une image mentale visuelle du mouvement selon une perspective interne, kinesthésique (comme s'il était à l'intérieur de son propre corps et qu'il voyait les actions de sa propre perspective).
2. soit le patient formait une image mentale visuelle du mouvement selon une perspective externe (comme s'il se regardait lui-même sur une vidéo).

Après avoir accompli la tâche mentale exigée, le patient devait estimer la facilité avec laquelle il était capable de l'effectuer, selon l'échelle d'imagerie kinesthésique (5.2) ou selon l'échelle d'imagerie visuelle pour la perspective externe (Figure 5.1), l'estimation subjective allant de 1 à 7 (1 : très difficile ; 7 : très facile). Il était demandé au patient de réaliser 4 tâches mentales (d'un point de vue kinesthésique ou externe), soit un score total allant de 4 à 28.

1	2	3	4	5	6	7
Très difficile à visualiser	Difficile à visualiser	Assez difficile à visualiser	Neutre (ni facile ni difficile)	Assez facile à visualiser	Facile à visualiser	Très facile à visualiser

Figure 5.1 : échelle d'imagerie visuelle

1	2	3	4	5	6	7
Très difficile à sentir	Difficile à sentir	Assez difficile à sentir	Neutre (ni facile ni difficile)	Assez facile à sentir	Facile à sentir	Très facile à sentir

Figure 5.2 : échelle d'imagerie kinesthésique

D'après une étude de Monsma et al. en 2022 (20), un score moyen du questionnaire MIQ-3f ≥ 5 est interprété comme une capacité d'imagerie motrice normale.

3.1.2 Items additionnels

Le MIQ a certaines limites, dont une exploration peu importante du membre inférieur et l'impossibilité de bien dissocier les mouvements proximaux et distaux.

Nous avons sélectionné six mouvements fonctionnels de la vie quotidienne, à la fois proximaux et distaux : la flexion et extension du coude, la pronation et la supination de l'avant-bras, la flexion et l'extension des doigts. En effet, ces mouvements sont intéressants, car ils sont essentiels pour permettre au patient une indépendance minimale, par exemple dans l'alimentation autonome (pronation et flexion des doigts, flexion du coude), la préhension avec l'exploration de l'espace antérieur.

Nous n'avons pas inclus les mouvements d'abduction et d'antéflexion d'épaule parce qu'ils étaient déjà pris en compte dans le MIQ-3f.

Enfin, le mouvement de flexion dorsale de cheville a été ajouté.

Dans l'ordre, les participants prenaient une position de départ assis, les mains posées sur les cuisses. Ensuite, ils s'imaginaient, selon une perspective interne ou externe, suivre le protocole suivant : « imaginez que vous fléchissez votre bras (flexion du coude) jusqu'à ce que votre main puisse toucher votre épaule. Étendez-le ensuite au maximum, le plus loin possible (extension du coude) comme si vous alliez chercher une pomme loin devant vous (pronation). Ramenez la pomme vers vous comme si vous alliez la croquer (supination), puis lâcher-là. Imaginez que vous serrez les doigts afin de faire un poing très fort et contemplez votre main, puis détendez-vous doigts et tendez-les au maximum (flexion puis extension des doigts). Enfin, imaginez que vous levez la pointe du pied le plus haut possible tout en gardant le talon au sol (flexion dorsale de cheville) ».

3.2 Évaluation des déficiences

3.2.1 Déficience motrice

- La force globale était cotée aux membres supérieurs et inférieurs parétiques selon l'échelle MRC (21). Pour rappel, cette échelle classe la force selon 6 grades (0 : pas de contraction ; 1 : contraction sans mouvement ; 2 : mouvement non possible contre pesanteur ; 3 : mouvement possible contre pesanteur mais pas contre résistance ; 4 : mouvement possible contre résistance ; 5 : force du mouvement normale). Les 6 mouvements évalués du membre supérieurs étaient l'antéflexion et l'abduction d'épaule, la flexion du coude, la flexion et extension de poignets, et la flexion des doigts. La force motrice était cotée selon un score de 0 (aucune contraction musculaire) à 30 (force motrice du membre supérieur normale). Les 3 mouvements évalués du membre inférieur étaient la flexion de hanche, l'extension de genou et la flexion dorsale de cheville (score total de 0 à 15). Dans l'étude de Kleyweg RP et al. en 1991 (21), le « MRC-sumscore » a été utilisé et reflète la force musculaire globale du patient. Il se calcule en additionnant l'ensemble des valeurs. Un de ses avantages est sa haute fiabilité inter-évaluateurs

(corrélation $r^2 = 0,96$), et sa sensibilité accrue chez les patients sévèrement atteints par rapport aux scores plus fonctionnels.

- Le Fugl-Meyer Assessment (FMA) était réalisé. Il s'agit d'un index moteur fondé sur la performance, spécifique à l'AVC, chez les patients hémiparétiques. Il apporte une dimension fonctionnelle, et est conçu pour évaluer la fonction motrice, mais également la sensibilité, l'équilibre, les amplitudes articulaires et la douleur articulaires. Plus le score est élevé, plus la récupération est considérée comme avancée. Concernant la fonction motrice, les patients ont été classés selon des seuils établis dans la littérature (22), notamment d'après une étude de Page SJ et al. qui définit une atteinte sévère (score total du FM ≤ 22), modérée (FM entre 23–47), et légère (FM ≥ 48), pour un score maximal de 66. Concernant la fonction articulaire, nous avons considéré qu'un score total ≥ 15 comme un faible niveau de rétraction articulaire, ainsi qu'un faible niveau de douleur lors de la mobilisation passive.

3.2.2 Déficiences sensibles

- La partie sensitive du Fugl Meyer était utilisée pour évaluer la sensibilité épicrotique et arthrokinétique (sens de position du membre dans l'espace).
- La sensibilité épicrotique était évaluée par toucher sur l'ensemble du bras, de l'avant-bras, et de la face palmaire de la main. Elle était cotée selon la présence d'une anesthésie (soit 0 point), hypoesthésie (1 point) ou normale (2 points).
- La sensibilité arthrokinétique était mesurée par la variation du sens de position dans l'espace des segments du membre supérieur, à partir de l'articulation de l'épaule, du coude, du poignet puis de l'interphalangienne du pouce. Le patient avait les yeux fermés et devait dire, par exemple à partir de l'articulation interphalangienne du premier rayon, si son pouce était positionné en haut, en bas, ou s'il ne savait pas. L'arthrokinésie est cotée sur les 4 articulations évaluées, selon la présence de 0, 1 ou 2 succès (soit 0 point), 3 succès sur 4, ou alors 100% de bonnes réponses (8 points).
- Enfin, la sensibilité vibratoire était mesurée à l'aide d'un diapason au niveau la saillie osseuse de l'extrémité distale de l'ulna pour le membre supérieur, et de la malléole interne pour le membre inférieur. Elle était cotée selon la présence d'une appaesthésie (soit 0 point), hypopallesthésie (1 point) ou pallesthésie normale (2 point).

3.2.3 Négligence spatiale

Trois tests étaient utilisés dans cette étude pour évaluer différents aspects de la négligence.

- **Le test des cloches (Annexe 2)**

Il s'agissait d'un test de négligence de type visuo-attentionnel dans l'espace extrapersonnel.

Au cours de ce test, il est demandé au patient d'entourer les 35 cloches contenues sur une feuille de format A4 au sein de 280 autres dessins distracteurs. Les cloches sont réparties en 7 colonnes, chacune de ces colonnes contenant 5 cloches et 40 autres figurines.

Un patient ayant omis d'entourer les cloches de la colonne située la plus à gauche présente une négligence modérée, alors qu'une omission dans des colonnes plus centrales sera un signe d'une négligence plus importante de l'espace gauche. L'oubli de 6 cloches ou plus, à droite ou à gauche de la page indique une négligence spatiale unilatérale. Le score est coté selon l'omission de 5 cloches ou moins (2 points), entre 6 et 15 cloches omises (1 point), ou plus de 16 cloches omises (0 points).

- **Le test de bissection de ligne :**

Ce test met en évidence une négligence de type visuo-spatiale autrement dit, de l'espace extrapersonnel contralésionnel, c'est-à-dire que le patient ignore ou sous-explore l'espace du côté opposé à la lésion cérébrale (souvent après une lésion de l'hémisphère droit entraînant une négligence de l'hémichamp gauche). Par exemple, un patient avec une lésion à droite marquera souvent le "milieu" de la ligne trop à droite, en raison d'une négligence de l'extrémité gauche. On demande au patient de tracer un trait vertical au milieu d'une ligne horizontale imprimée sur une feuille de papier. Il n'existe pas de seuil universel, mais un écart par rapport à la ligne médiane supérieur à 6,5 mm est considéré comme anormal.

- **Le fluff test :**

Il s'agit d'un test de négligence de type personnelle c'est-à-dire de son propre corps, et de prise de conscience du schéma corporel. Il consiste en le retrait de cibles fixées sur le devant des vêtements du patient. Trois autocollants étaient placés à droite (A-C) et trois à gauche (D-F) de la ligne médiane du corps, six le long du bras déficient du sujet (G-L), six le long de la jambe droite (M-R), et six le long de la jambe gauche (S-Y). Aucune cible n'est placée sur le bras sain, car la tâche était réalisée avec ce bras. Il y avait donc un

total de 15 cibles sur le côté parétique du corps et 9 sur le côté sain. Le sujet a les yeux fermés et est assis pendant la pose des cibles, sans être informé du nombre de cibles présentes. Une fois la pose terminée, le sujet doit retirer les autocollants tout en gardant les yeux fermés. Il n'y avait aucune limite de temps, et le test prenait fin lorsque le sujet a ou pense avoir retiré tous les autocollants.

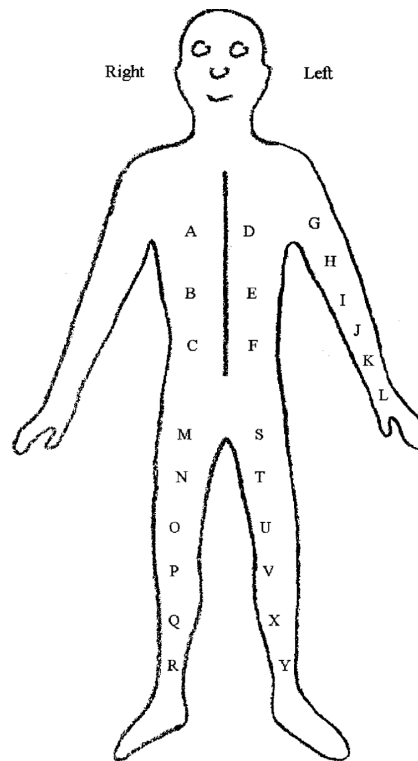


Figure 6 : Schéma représentatif du Fluff Test (52)

D'après une étude antérieure (11), le seuil initial du Fluff Test définit la performance des patients comme normale lorsque plus de 13 cibles sur 15 sont détachées du côté atteint. Une performance était normale pour le côté sain si au moins 8 cibles sur 9 étaient détachées. Ainsi, dans notre étude, nous avons comptabilisé le nombre d'étiquettes omises du côté atteint, 2 cibles minimum omises étant considérées comme pathologique (11).

4. Analyses statistiques

Compte-tenu du faible effectif de l'étude, les données quantitatives sont présentées en médiane et intervalle interquartile, les autres données en effectif et pourcentages.

Pour la même raison, une approche non paramétrique a été utilisée. Les comparaisons intragroupes ont été réalisées à l'aide du test de Wilcoxon, les comparaisons intergroupes à l'aide du test de Mann-Whitney. Les test de corrélation de Spearman a été utilisé pour mesurer le lien entre la perception de l'imagerie motrice et les déficiences d'intérêt pour les paramètres quantitatifs, un test de Mann-Whitney pour les variables qualitatives.

Le niveau de significativité a été fixé à $p < 0,05$. Le logiciel libre JAMOVI (The jamovi project, 2025, <https://www.jamovi.org>) a été utilisé pour la réalisation des analyses.

RÉSULTATS

1. Participants

Un total de 13 patients ont été recrutés, dont 7 femmes (53,8%). L'âge médian était de 49 [21] ans. Tous les patients sauf un étaient droitiers (92,3%). Il y avait une majorité d'AVC ischémiques, soit 11 (84,6%). La lésion était gauche chez 8 patients (61,5%). Le délai post-AVC minimum était de 19 jours et maximum de 29 ans et 194 jours. Le délai médian était de 79 [136] jours. Les caractéristiques individuelles des patients figurent dans le tableau 1.

Patients	Age (ans)	Sexe	Latéralité	Type d'AVC	Hémisphère atteint	Localisation	Délai post AVC
1	31	F	D	I	G	NGC	J19
2	41	F	D	I	G	P ; T ; O : F ; NGC	J27
3	79	H	D	I	G	NGC ; TC	J44
4	59	H	D	I	D	C ; TC	J47
5	38	F	D	I	G	T ; F ; NGC	J50
6	71	H	D	I	D	P ; O ; F	J70
7	49	F	D	H	D	P ; T ; F	J79
8	46	F	D	I	D	P ; T ; F ; NGC	J119
9	38	H	D	H	G	NGC	J146
10	54	H	D	I	G	NGC	J183
11	65	H	G	I	D	P ; T ; O ; NGC	J200
12	56	F	D	I	G	P ; T ; F ; NGC	J221
13	35	F	D	I	G	Non connue	29 ans et 194 jours

Tableau 1 : caractéristiques individuelles des patients (*F* : femme ; *H* : homme ; *D* : droit ; *G* : gauche ; *I* : ischémique ; *H* : hémorragique ; *NGC* : noyaux gris centraux ; *T* : lobe temporal ; *P* : lobe pariétal ; *O* : lobe occipital ; *F* : lobe frontal ; *C* : cervelet ; *TC* : tronc cérébral)

La localisation des lésions était évaluable pour 12 patients. On observait que 9 patients (75%) avaient une lésion des noyaux gris centraux, soit la localisation la plus fréquente. À l'inverse, 3 patients présentaient une lésion de la région sous-tentorielle soit la fréquence de survenue la plus faible (25%), comprenant 1 patient pour la région cérébelleuse, et 2 patients pour le tronc cérébral. De manière similaire, la localisation occipitale était retrouvée chez 3 patients (25%). Enfin, on observait autant de patients présentant des lésions cérébrales frontales, pariétales et temporales, soient 6 patients (50%) pour chaque localisation. La répartition de la localisation des lésions cérébrales pour chaque patient est illustrée dans la figure 7.

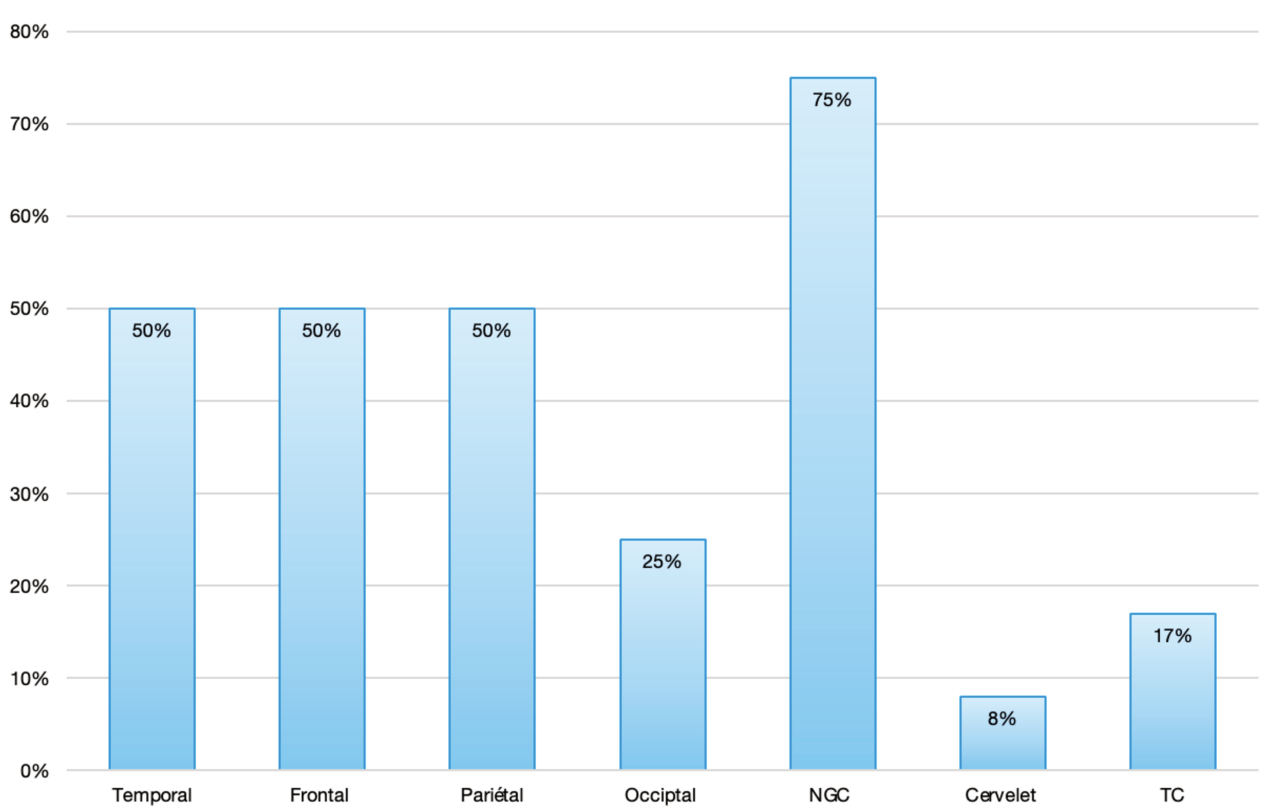


Figure 7 : fréquence de survenue des lésions cérébrales selon la localisation pour chaque individu (NGC : noyaux gris centraux ; TC : tronc cérébral).

2. Capacité de perception du mouvement

2.1. MIQ-3f

Concernant l'imagerie motrice externe, 8 patients (61,5%) avaient un score moyen non pathologique (soit ≥ 5). De même, concernant l'imagerie motrice kinesthésique, 8 patients avaient un score moyen ≥ 5 (61,5%).

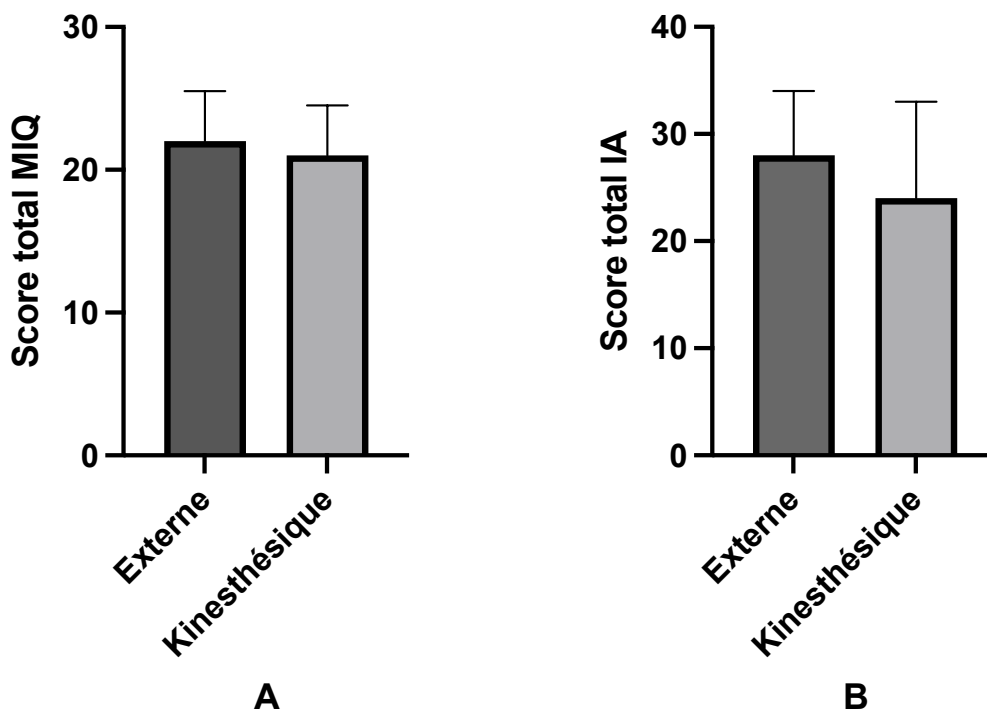
6 patients (46%) avaient un score non pathologique dans les 2 modalités, 3 patients (23%) avaient un score moyen pathologique dans les deux modalités (soit visualisation du mouvement plutôt difficile). 2 patients avaient un score pathologique uniquement pour la modalité kinesthésique (15,5%), de même 2 patients avaient un score pathologique uniquement pour la modalité externe (15,5%).

Les scores totaux médians n'étaient pas différents entre les deux modalités d'évaluation ($p = 0,432$), mesurés à 21 [5,7] d'un point de vue kinesthésique, et de 22 [7,7] d'un point de vue externe (Figure 8A).

2.2. Items additionnels du membre supérieur et inférieur

Pour le membre supérieur, concernant l'imagerie motrice externe, 9 patients (69%) avaient un score moyen non pathologique (soit ≥ 5). 6 patients (46%) en modalité kinesthésique. 6 patients (46%) avaient un score moyen non pathologique dans les 2 modalités, 4 patients (31%) avaient un score moyen pathologique dans les deux modalités, et 3 patients avaient un score moyen pathologique uniquement pour la modalité kinesthésique (23%).

Bien que le score en modalité externe soit plus élevé, les scores totaux médians n'étaient pas statistiquement différents entre les deux modalités d'évaluation ($p = 0,929$), mesurés à 24 [8,3] d'un point de vue kinesthésique, et de 28 [11,2] d'un point de vue externe (Figure 8B).



Figures 8 : comparaison du score total du MIQ-3f (8A) et du score total des items additionnels (8B) du membre supérieur selon une perspective externe ou kinesthésique. *Les données présentées sont la médiane et l'intervalle interquartile.*

Pour le membre inférieur, seul le mouvement de flexion dorsale de cheville du côté atteint était évalué. 8 patients avaient un score moyen non pathologique à la fois pour la modalité externe ou la modalité kinesthésique. 7 patients (54%) avaient un score moyen non pathologique dans les 2 modalités, 4 patients (31%) avaient un score moyen pathologique dans les deux modalités, 1 patients avaient un score moyen pathologique pour la modalité kinesthésique (7,5%), et 1 patients avaient un score moyen pathologique pour la modalité externe (7,5%).

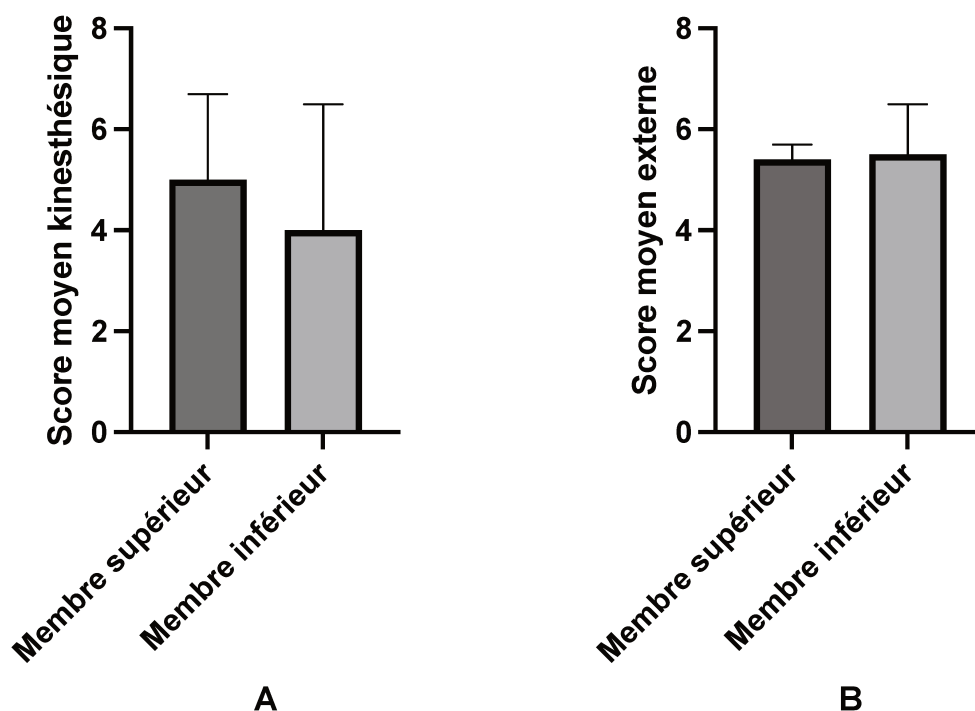
Bien que le score en modalité externe soit plus élevé, les score totaux médians n'étaient pas statistiquement différents entre les deux modalités d'évaluation ($p = 0,666$), mesurés à 5 [4] d'un point de vu kinesthésique, et de 6 [6] d'un point de vu externe.

2.3. Comparaison de l'illusion du mouvement des membres supérieurs et inférieurs

Le nombre d'items entre les membres supérieurs et les membres inférieurs n'étant pas égal, nous avons comparé les scores moyens pour chaque participant.

D'un point de vue kinesthésique (Figure 9A), on constatait que l'illusion du mouvement du membre supérieur avait tendance à être plus facile à percevoir par rapport à celle du membre inférieur, sans différence significative ($p = 0,328$), mesurés à 5 [1,5] au membre supérieur, et à 4 [1,7] au membre inférieur.

D'un point de vue externe (Figure 9B), on observait que la facilité d'illusion du mouvement était comparable au membre supérieur et au membre inférieur ($p = 0,600$), mesurés à 5,4 [1,9] au membre supérieur, et à 5,5 [2] au membre inférieur.



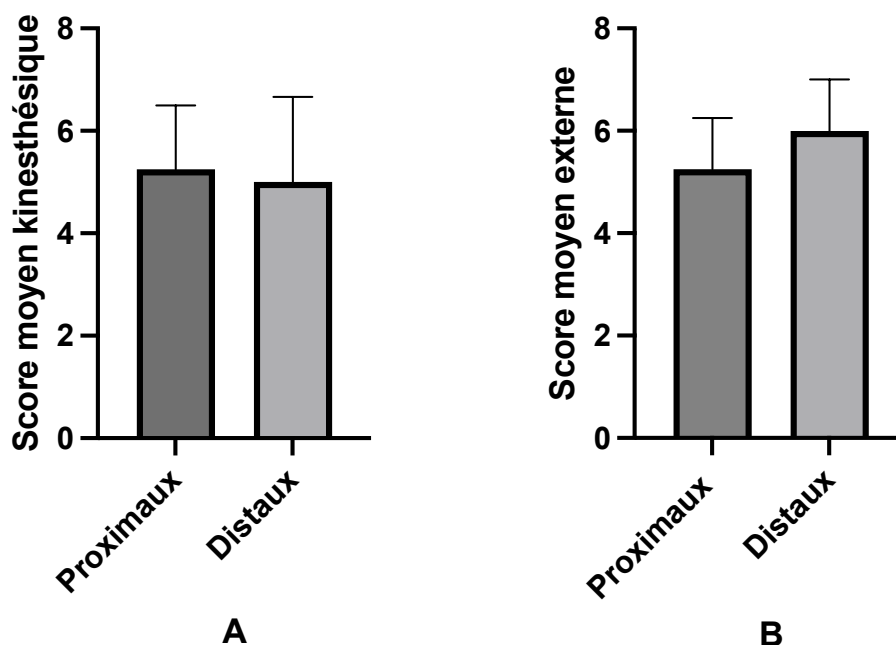
Figures 9: comparaison des capacités d'illusion du mouvement selon une perspective kinesthésique (9A) et externe (9B), du membre supérieur et du membre inférieur (moyenne des scores du MIQ-3f et des items additionnels confondus).

Les données présentées sont la médiane et l'intervalle interquartile.

2.4. Comparaison de l'illusion des mouvements distaux et proximaux

D'un point de vue kinesthésique (Figure 10A), on constatait que d'illusion des mouvements proximaux était quasiment aussi facile à percevoir que les mouvements distaux, ($p = 1,000$), mesurés à 5,25 [1,4] pour les mouvements proximaux, et à 5 [1,7] pour les mouvements distaux.

D'un point de vue externe (Figure 10B), on observait que l'illusion des mouvements distaux avait tendance à être plus facile à visualiser par rapport à celle des mouvements proximaux, cependant, les scores médians n'étaient pas statistiquement différents ($p = 0,622$), mesuré à 5,25 [1,85] pour les mouvements proximaux, et à 6,00 [2,34] pour les mouvements distaux.



Figures 10: comparaison des capacités d'illusion du mouvement selon une perspective kinesthésique (10A) et externe (10B), de mouvements proximaux et distaux (moyenne des scores du MIQ et items additionnels confondus).

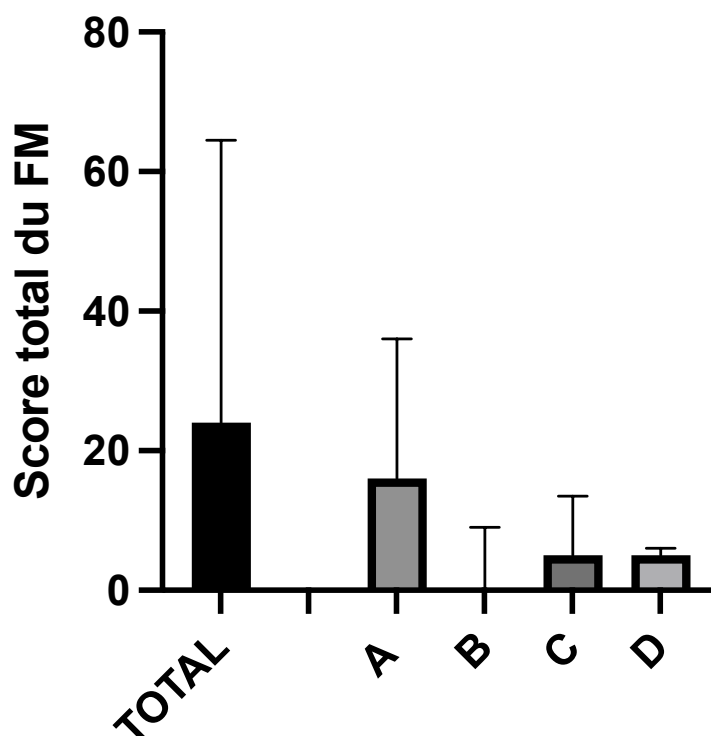
Les données présentées sont la médiane et l'intervalle interquartile.

3. Déficiences associées

Le score médian total du **Fugl Meyer moteur** (comprenant les parties A, B,C et D) était de 24/66 [25,1] (Figure 11). Les scores individuels allaient de 0 à 66, traduisant une hétérogénéité importante entre les patients. Le score médian pour l'extrémité supérieure proximale (partie A) était de 16 [14,1]. Concernant le poignet (partie B), le score médian était nul [4,6]. Concernant la main (partie C), la médiane était de 5 [5,7]. L'évaluation de la vitesse et la coordination du membre supérieur (partie D) retrouvait un score médian de 5 [1,7].

5 patients (38,5%) avaient une atteinte sévère, 3 patients (23%) une atteinte modérée, et 5 patients une atteinte légère ou pas d'atteinte, soit un score total de 66 (38,5%).

Les performances des patients aux différentes évaluations sont présentées dans le tableau 2.



Figures 11: scores médians du Fugl Meyer (FM) et des différentes sous-parties (partie A sur 36 points, partie B sur 10 points, partie C sur 14 points, partie D sur 6 points).

Sur le plan du **testing moteur** selon l'échelle MRC au membre supérieur atteint, pour les 6 mouvements évalués de 0 à 5, le score minimal était de 0 (absence globale de contraction) et le score maximal de 30 (force motrice normale). Le score du testing moteur retrouvait une médiane à 14 [12,2] au membre supérieur et 11 [4,8] au membre inférieur. On comptait 3 patients (23%) avec une force motrice comparable par rapport au côté sain au membre supérieur atteint, et 3 patients (23%) avec une force motrice comparable par rapport au côté sain pour le membre inférieur atteint.

Concernant la **sensibilité épicrotique** selon le Fugl Meyer sensitif, la médiane était de 2 [1,3]. 6 patients avaient une sensibilité épicrotique conservée (46%), 6 avaient une hypoesthésie modérée (46%) et 1 présentait une anesthésie (8%).

Concernant la **sensibilité profonde** :

- **pallesthésique**, 5 patients avaient une hypopallesthésie modérée (38%), et 8 patients un niveau de pallesthésie normal (62%).
- **proprioceptive** selon le Fugl Meyer sensitif, la médiane était de 8 [2,8] pour un maximum de 8. Plus le score était élevé, plus l'arthrokinésie était préservée. 7 patients étaient indemnes de trouble arthrokinétiques (54%), 3 patients présentaient des troubles minimes à modérés (23%), 2 patients présentaient des troubles modérés à sévères (15%), et 1 patient présentait des troubles sévères (8%).

La sous-échelle de mobilité articulaire passive reflète la bonne conservation de l'amplitude articulaire (pas de raideur ni de limitation) si le score est maximal. L'évaluation des **amplitudes articulaires** selon le Fugl Meyer retrouvait un score médian de 17 [4,9] pour un maximum de 24, soit globalement peu de rétraction articulaire retrouvée dans notre échantillon. 4 patients (31%) avaient un score <15, soit un niveau de rétraction articulaire global important au membre supérieur atteint.

L'évaluation de la **douleur** selon le Fugl Meyer retrouvait un score médian de 20 [7,85] pour un maximum de 24. Un score maximal reflète une absence de douleur, et un score minimal une douleur importante à la mobilisation passive. 3 patients (23%) avaient un score <15, soit un niveau de douleur important.

Concernant l'évaluation de la **négligence** :

-5 patients (38%) avaient un score pathologique au Fluff test soit au minimum 2 cloches omises du côté atteint. La médiane était de 1 [1,2]. 3 patients étaient négligents à gauche, et 2 étaient négligents à droite.

-3 patients (23%) avaient un score pathologique au test des cloches. 2 patients étaient négligents à gauche, et 1 était négligent à droite.

-2 patients (15%) avaient un score pathologique au test de bissection de ligne. 1 patient était négligent à gauche, et 1 était négligent à droite.

Pt	MIQ	IA	MS	MI	PROX	DIST	FM MOT	MOT MS	MOT MI	PAL	FM EPI	FM PRO	FM AA /24	FM DOU /24	Fluff test	Test des cloches	BISS
1	Kin : 7 Ext : 6	Kin : 7 Ext : 6	Kin : 7 Ext : 5,2	Kin : 7 Ext : 6	Kin : 7 Ext : 6	Kin : 7 Ext : 6	0	0	4	2	4	8	24	24	P	N	N
2	Kin : 6 Ext : 6,75	Kin : 4,2 Ext : 3,6	Kin : 5 Ext : 4,4	Kin : 3 Ext : 3,5	Kin : 5,25 Ext : 5,5	Kin : 3,33 Ext : 3	4	0	2	1	2	8	16	20	P	P	N
3	Kin : 6,75 Ext : 7	Kin : 7 Ext : 7	Kin : 7 Ext : 6,2	Kin : 6,5 Ext : 7	Kin : 6,75 Ext : 7	Kin : 7 Ext : 7	65	30	15	2	4	8	21	24	N	N	N
4	Kin : 4,75 Ext : 2	Kin : 3,6 Ext : 1	Kin : 3,8 Ext : 2,1	Kin : 4 Ext : 3	Kin : 3,75 Ext : 2	Kin : 4 Ext : 1	66	30	15	2	2	8	23	24	N	N	N
5	Kin : 6 Ext : 7	Kin : 7 Ext : 7	Kin : 6,8 Ext : 6,4	Kin : 7 Ext : 7	Kin : 6,75 Ext : 7	Kin : 7 Ext : 7	50	24	12	2	2	2	24	24	N	N	N
6	Kin : 3 Ext : 3	Kin : 2,6 Ext : 2	Kin : 3,4 Ext : 2,4	Kin : 2 Ext : 2	Kin : 3,75 Ext : 3	Kin : 2 Ext : 2	21	14	15	1	4	8	15	19	P	N	P
7	Kin : 3 Ext : 1	Kin : 4,4 Ext : 1	Kin : 4,2 Ext : 1,6	Kin : 5 Ext : 1	Kin : 3,75 Ext : 1	Kin : 5,33 Ext : 1	23	9	9	1	4	2	14	16	N	N	N
8	Kin : 5 Ext : 3,75	Kin : 6,2 Ext : 6	Kin : 6,6 Ext : 5,9	Kin : 3 Ext : 4	Kin : 5,5 Ext : 5	Kin : 5,67 Ext : 6	13	3	7	1	0	4	14	8	P	P	N
9	Kin : 6,25 Ext : 5,5	Kin : 6,2 Ext : 6,6	Kin : 6,2 Ext : 5,2	Kin : 6,5 Ext : 6,5	Kin : 6,25 Ext : 5,75	Kin : 6,33 Ext : 7	24	12	11	2	2	4	13	16	N	N	N
10	Kin : 3 Ext : 6	Kin : 4,6 Ext : 5,2	Kin : 4 Ext : 4	Kin : 4 Ext : 5,5	Kin : 3,25 Ext : 4,5	Kin : 5 Ext : 6	66	30	14	2	4	8	24	24	N	N	N
11	Kin : 5,25 Ext : 4	Kin : 2 Ext : 5,4	Kin : 2,8 Ext : 5,2	Kin : 4 Ext : 3	Kin : 4 Ext : 5	Kin : 2 Ext : 5	12	1	2	1	2	1	10	8	P	P	N
12	Kin : 4 Ext : 5	Kin : 4,8 Ext : 5,6	Kin : 4,6 Ext : 4,4	Kin : 4 Ext : 6	Kin : 4 Ext : 5,25	Kin : 5 Ext : 6,3	64	29	12	2	4	8	22	23	N	N	N
13	Kin : 6 Ext : 5,5	Kin : 5,4 Ext : 7	Kin : 5,8 Ext : 5,6	Kin : 5,5 Ext : 6,5	Kin : 6,25 Ext : 6,5	Kin : 5 Ext : 7	33	17	11	2	2	5	17	0	N	N	P

Tableau 2 : scores moyens des tests d'imagerie motrice et performances individuelles de chaque participant (*Pt* : patients ; *IA* : items additionnels ; *MIQ* : questionnaire MIQ-3f ; *MS* : membre supérieur ; *MI* : membre inférieur ; *FM MOT* : Fugl Meyer moteur score total /66 ; *MOT MS* : testing moteur des membres supérieurs /30 ; *MOT MI* : testing moteur des membres inférieurs /15 ; *PAL* : pallesthésie ; *FM EPI* : Fugl Meyer de la sensibilité épicrotique ; *FM PRO* : Fugl Meyer de la sensibilité proprioceptive ; *FM AA* : évaluation des amplitudes articulaires selon le Fugl Meyer ; *FM DOU* : évaluation de la douleur selon le Fugl Meyer ; *BISS* : test de bissection de ligne ; *P* : pathologique ; *N* : normal ; *KIN* : perspective kinesthésique ; *EXT* : perspective externe).

4. Association entre déficiences et capacités de perception d'illusion du mouvement

Concernant les caractéristiques individuelles des patients, les sujets présentant une lésion droite avaient tendance à avoir une perception moins bonne de l'illusion motrice quelle que soit sa modalité. Les résultats étaient tous significatifs sauf pour le MIQ en modalité kinesthésique, le score moyen des items additionnels du membre supérieur en modalité externe et le score moyen des items additionnels du membre inférieur en modalité kinesthésique (Tableau 3).

Aucun lien n'a été mis en évidence avec la latéralité, le sexe, l'âge et le délai depuis l'AVC.

Concernant les déficiences, la sévérité n'était, pour la plupart d'entre elles, pas associée à la perception de l'illusion du mouvement (Tableau 4). On notait tout de même une association significative entre la sévérité de l'atteinte de la pallesthésie et les capacités d'imagerie motrice du membre inférieur d'un point de vue externe ($\rho = 0,744$; $p = 0,004$) et kinesthésique ($\rho = 0,667$; $p = 0,013$).

Pour la négligence, au test de bissection de ligne, les sujets présentant un test pathologique avaient une moins bonne perception de l'illusion du mouvement uniquement pour le membre inférieur en modalité kinesthésique. Pour l'ensemble des tests, les patients présentant une négligence unilatérale avaient tendance à avoir une perception moins bonne de l'illusion motrice quelle que soit sa modalité, de manière prédominante au membre inférieur. Cependant, les résultats n'étaient pas significatifs (Tableau 5).

		Lésion gauche	Lésion droite	p
MIQ-3f	Kinesthésique	6 [0,875]	4,75 [2]	0,064
	Externe	6 [1,313]	3 [1,75]	0,004
Items membre supérieur	Kinesthésique	6 [1,95]	3,8 [0,8]	0,048
	Externe	5,6 [0,850]	1,9 [3,8]	0,160
Items membre inférieur	Kinesthésique	6 [2,625]	4 [1]	0,074
	Externe	6,25 [0,75]	3 [1]	0,006

Tableau 3 : statistiques descriptives (médianes et écarts interquartiles) du MIQ-3f et items additionnels du membre supérieur et inférieur, selon une perspective externe ou kinesthésique, en fonction de la latéralité de la lésion.

		MIQ kinesthésique	MIQ externe	MI externe	MI kinesthésique	MS externe	MS kinesthésique
Delai post AVC (jours)	Rho	-0,389	-0,295	0,022	-0,159	0,417	-0,391
	p	0,189	0,328	0,943	0,603	0,157	0,187
Âge	Spearman's rho	-0,456	-0,293	-0,368	-0,476	-0,15	-0,523
	p-value	0,117	0,332	0,216	0,1	0,624	0,066
FM moteur : extrémité du MS	Spearman's rho	-0,234	0,1	0,36	0,188	0,144	-0,09
	p-value	0,441	0,746	0,228	0,539	0,639	0,771
FM moteur : poignet	Spearman's rho	-0,223	0,2	0,245	0,082	-0,006	-0,069
	p-value	0,465	0,511	0,42	0,791	0,984	0,822
FM moteur : main	Spearman's rho	-0,158	0,131	0,384	0,173	0,158	0,084
	p-value	0,607	0,669	0,195	0,572	0,607	0,786
FM moteur : coordination vitesse	Spearman's rho	-0,386	-0,004	0,15	-0,197	-0,051	-0,279
	p-value	0,193	0,988	0,625	0,518	0,868	0,356
FM moteur global	Spearman's rho	-0,275	0,07	0,308	0,146	0,033	-0,091
	p-value	0,362	0,819	0,305	0,635	0,914	0,768
Testing moteur MS	Spearman's rho	-0,269	0,09	0,318	0,11	0,022	-0,082
	p-value	0,375	0,769	0,289	0,721	0,942	0,791
Testing moteur MI	Spearman's rho	-0,289	-0,021	0,174	0,007	-0,216	-0,097
	p-value	0,338	0,946	0,569	0,982	0,478	0,752
FM : sensibilité épicritique	Spearman's rho	-0,238	0,046	-0,071	0,135	-0,26	-0,064
	p-value	0,434	0,881	0,818	0,659	0,392	0,835
FM sensibilité proprioceptive	Spearman's rho	-0,012	0,202	0,045	-0,23	-0,479	0,045
	p-value	0,969	0,509	0,883	0,449	0,098	0,884
FM : amplitude articulaire	Spearman's rho	0,095	0,478	0,406	0,359	-0,067	0,313
	p-value	0,757	0,099	0,169	0,228	0,828	0,298
FM : douleur articulaire	Spearman's rho	0,12	0,457	0,274	0,313	-0,163	0,247
	p-value	0,695	0,117	0,366	0,297	0,594	0,416
Pallesthésie du MS	Spearman's rho	0,385	0,467	0,744	0,667	0,256	0,423
	p-value	0,194	0,108	0,004	0,013	0,398	0,15

Tableau 4 : analyses statistiques des performances individuelles des patients (MS : membre supérieur ; MI : membre inférieur ; FM : Fugl Meyer)

		MIQ kinesthésique	MIQ externe	MI externe	MI kinesthésique	MS externe	MS kinesthésique
Fluff test	Pathologique	5,25 [1]	4 [2,2]	3,5 [1]	3 [1]	4,8 [0,6]	5 [3,2]
	Non pathologique	5,38 [2,3]	5,5 [2]	6,25 [1,75]	5,25 [2,5]	5,6 [1,5]	5,2 [2,2]
Test des cloches	Pathologique	5,25 [0,5]	4 [1,5]	3,5 [0,5]	3 [0,5]	5,4 [0,6]	5 [1,9]
	Non pathologique	5,38 [2,9]	5,5 [2,5]	6 [2,8]	5,25 [2,5]	5,2 [2,9]	5,2 [2,6]
Test de bissection de ligne	Pathologique	4,5 [1,5]	4,88 [1,875]	2,75 [0,75]	2,5 [0,5]	3,2 [1,6]	4,2 [0,8]
	Non pathologique	5,25 [1,75]	5,5 [2,125]	6 [3]	5 [2,5]	5,6 [0,9]	5,8 [2,6]

Tableau 5 : statistiques comparant les tests pathologiques et non pathologiques des épreuves de négligence, des scores du MIQ-3f et items additionnels du membre supérieur et inférieur, selon une perspective externe ou kinesthésique (MS : membre supérieur ; MI : membre inférieur). Les données présentées sont la médiane et l'intervalle interquartile.

DISCUSSION

La présente étude s'est intéressée aux facteurs influençant la perception de l'illusion de mouvement du membre supérieur atteint après un AVC, selon deux modalités : kinesthésique et externe.

Ces résultats préliminaires sont limités par le faible nombre de sujets. Les analyses montrent que les performances de l'imagerie motrice étaient assez comparables en modalités externe et interne. Nous n'avons pas mis en évidence de différence entre membres inférieurs et supérieurs, et entre mouvements proximaux et distaux. L'étude du lien entre perception du mouvement et les différentes déficiences a montré peu de résultat significatif, mais il semble que les patients lésés droits et ceux présentant des troubles proprioceptifs avaient de moins bonnes capacités.

1. Capacité de perception de l'illusion du mouvement d'un point de vue kinesthésique et externe

Les résultats de notre étude ne montrent pas de différence de capacité de perception d'illusion du mouvement entre les modalités kinesthésique et externe. On aurait pu s'attendre à des performances d'imagerie motrice externe significativement plus performantes, car les patients étaient potentiellement moins impactés par les difficultés proprioceptives (ces dernières étant plus sollicitées lors de l'imagerie motrice kinesthésique). Une étude de Liepert J et al. en 2012 (58) a ainsi montré qu'une altération proprioceptive chez des patients avec déficit du membre supérieur après un AVC compromettait l'imagerie motrice kinesthésique (mesurée par chronométrie mentale) et était accompagné d'une diminution de l'excitabilité cortico-spinale (en stimulation magnétique transcrânienne). En ce sens, une atteinte des voies proprioceptives (au niveau du cortex pariétal postérieur) peut avoir plusieurs conséquences : empêcher la

mise à jour des représentations internes du corps en mouvement, altérer la planification et le contrôle moteur, dégrader l'imagerie motrice kinesthésique, ou conduire à des troubles de conscience corporelle la négligence ou l'asomatognosie. Le cerveau est alors perturbé sur la position et le mouvement du corps dans l'espace, représentant une base fondamentale à l'élaboration schéma corporel, défini par une représentation dynamique, inconsciente et sensorimotrice du corps (59).

À l'opposé, la perspective externe mobilise davantage la conception du schéma corporel tel qu'il est construit en modalité allocentrée. Or, des troubles du schéma corporel sont décrits en post-AVC, chez les patients présentant une négligence spatiale en particulier (63) (64).

2. Quelle est la spécificité des membres (inférieur vs supérieur) et caractère proximal ou distal du mouvement ?

Les résultats de notre étude ne montrent pas de **spécificité des membres** dans les capacités d'illusion du mouvement selon les perspectives, kinesthésique ou externe. Ces résultats peuvent être confrontés à une étude de Harirchian et al. en 2008 (47) qui observe en IRM fonctionnelle, que l'imagerie motrice des membres supérieurs permet une activation plus latéralisée au niveau du cortex prémoteur (certes attendue, compte-tenu de la somatotopie du cortex moteur primaire), mais surtout plus marquée que celle des membres inférieurs. Cela pourrait suggérer que l'imagerie motrice des membres supérieurs est perçue comme plus facile et plus précise, probablement en raison de la complexité et de la précision des mouvements qui y sont associés. De plus, le membre supérieur a une motricité davantage balistique et orientée vers une tâche spécifique comparativement aux membres inférieurs où les activations lors de la marche ou la posture sont moins conscientes.

Par ailleurs, une autre étude de Mizuguchi et al. en 2014 (46) montre que des régions cérébrales jouent un rôle clé dans la représentation des actions lors de l'imagerie motrice, indépendamment du membre impliqué. Cette dernière a étudié en IRM fonctionnelle chez des sujets sains des tâches mentales d'extension et flexion de la main ou de la cheville, et a retrouvé que certaines régions cérébrales étaient activées lors de l'imagerie motrice des mains et des pieds de manière indépendante. Ces régions incluaient l'aire motrice supplémentaire, le gyrus frontal inférieur et le cortex prémoteur ventral. De plus, la littérature antérieure utilisant des techniques d'électrophysiologie fonctionnelle montrent aussi des différences d'amplitude d'activation entre l'imagerie motrice de membres supérieurs et inférieurs (les représentations motrices des membres inférieurs sont plus profondes et parfois moins faciles à détecter par EEG du fait de leur localisation corticale). Ceci explique pourquoi la détection en imagerie motrice des membres inférieurs est souvent plus difficile que celle des membres supérieurs.

Les **mouvements axiaux** (proximaux), n'était pas mieux perçus en imagerie motrice que les **mouvements distaux** plus fins, au sein des deux perspectives. Une de nos hypothèses était que les mouvements distaux seraient mieux représentés, surtout en imagerie motrice externe, car il s'agit de mouvements plus conscients en vie quotidienne, et mieux perçus visuellement. Ces résultats vont dans le même sens qu'une étude de Ranganathan et al. visant à déterminer dans quelle mesure un entraînement mental sans exercice physique pouvait améliorer la force musculaire, en comparant deux groupes musculaires (axial ou distal) du bras dominant chez des individus sains. Les auteurs ont démontré qu'un entraînement purement par imagerie motrice pouvait induire une augmentation de la force musculaire, plus marquée pour les mouvements distaux (les gains de force étaient traduits par une augmentation significative du potentiel cortico-musculaire en EEG). Leurs hypothèses se fondaient sur les différences en termes de représentation corticale et de projections nerveuses selon le type de muscle (distal ou

proximal). De manière similaire à notre hypothèse, une étude de S. Gäumann et al. en 2021 (36), relève que les patients sont plus susceptibles de choisir une perspective interne du mouvement pour l'imagination de mouvements axiaux, contrairement aux mouvements distaux où la perspective externe est plus sollicitée.

3. Quels facteurs influencent l'imagerie motrice ?

Notre étude suggère que plusieurs caractéristiques ou déficiences des participants altèrent les capacités d'imagerie motrice.

Nos résultats montrent que les performances des patients présentant une **lésion de l'hémisphère droit** étaient moindres par rapport à celles des patients avec une lésion de l'hémisphère gauche. Dans la littérature, les résultats sont contrastés sur cet aspect. Un travail de Malouin et al. en 2008 (29) n'a pas trouvé d'influence du côté de la lésion sur la facilité de perception de l'imagerie motrice après un AVC, qui reste similaire après appariement selon l'âge. Une étude de Celine Craje et al. en 2010 (28) a constaté que les patients atteints d'une lésion hémisphérique gauche avaient de moins bonnes capacités de kinesthésie (que ce soit pour le membre sain ou plégique). Ceci s'expliquerait par le fait que les problèmes moteurs après une lésion de l'hémisphère gauche sont plus graves, probablement en raison de la dominance de l'hémisphère gauche pour la planification de l'action. Cette dernière hypothèse est toutefois contestable, tant on sait le rôle majeur aussi de l'hémisphère droit dans la planification du mouvement, la construction du schéma corporel, le repérage visuo-spatial (du corps comme des cibles) et dans l'intégration multimodale.

Prises une à une, les déficiences ont montré moins de lien avec les capacités de perception de l'imagerie motrice. Au-delà d'un manque potentiel de puissance, ce résultat

témoigne probablement du fait qu'il s'agit d'une association de déficiences qui est à l'origine des difficultés de perception de l'illusion de mouvement.

Nous ne pouvons pas conclure sur la **latéralité**, car un seul patient était gaucher. Une étude de Zapala et al. (50) a étudié comment la latéralité (droitier ou gaucher) influence l'imagerie motrice kinesthésique et l'imagerie visuo-motrice externe, en s'intéressant aux oscillations cérébrales visible à l'EEG dans les bandes alpha (8–13 Hz) et bêta (15–30 Hz), connues pour être impliquées dans la planification et l'imagerie motrice. Chez les droitiers pendant l'imagerie kinesthésique, on observe une désynchronisation alpha/bêta plus forte dans l'hémisphère gauche (régions motrices contro-latérales à la main dominante), alors que chez les gauchers le pattern est moins latéralisé et implique davantage les régions occipitales, en particulier pendant l'imagerie externe. Au total, les droitiers rapportent une aisance plus élevée en imagerie kinesthésique alors que les gauchers tendent à privilégier l'imagerie externe. Les résultats d'une autre étude en IRM fonctionnelle (51) montrent que lors de l'exécution réelle du mouvement, les gauchers recrutaient un réseau bilatéral étendu, tandis que chez les droitiers, l'activité était plus latéralisée. Au niveau cortical, l'imagerie motrice kinesthésique a révélé un schéma similaire chez les droitiers et les gauchers, avec une activation bilatérale pour la main dominante. En revanche, au niveau sous-cortical, pendant l'imagerie kinesthésique, seuls les droitiers montraient l'implication du cervelet postérieur. Dans l'ensemble, l'exécution recrute davantage le cortex sensorimoteur primaire, alors que l'imagerie recrute plus les aires associatives (pariétales et prémotrices).

Aucune corrélation significative n'a été retrouvée entre le **type d'AVC** (ischémique ou hémorragique) et le **délai post-AVC**.

Notre étude n'a pas trouvé de corrélation significative entre la clarté de l'imagerie motrice du membre supérieur et la sensibilité **épicritique** ou la sensibilité **proprioceptive**. En revanche, la sensibilité pallesthésique est significativement corrélée au score d'imagerie motrice du membre supérieur des items additionnels d'un point de vue kinesthésique et externe.

L'illusion du mouvement et le schéma corporel peuvent être perturbés par un certain nombre de déficiences, en premier lieu les déficiences proprioceptives (caractérisées par une altération de la perception de la position et du mouvement d'un membre, par une mauvaise intégration des signaux proprioceptifs et visuels). De plus, on note un désapprentissage acquis, qui correspond à la perte de capacité à effectuer des mouvements automatiques ou appris, lié à une altération de la mémoire procédurale pour les mouvements (d'où la difficulté à réapprendre les mouvements après une lésion cérébrale), surtout en lien avec la parésie, mais aussi avec la proprioception. En ce sens, on comprend que le schéma corporel, c'est-à-dire la conscience corporelle de propriété du corps, est perturbée en raison d'un manque d'intégration des signaux sensoriels. Un déficit proprioceptif marqué peut altérer la qualité des représentations corporelles internes, ce qui limite la précision et l'efficacité des processus d'imagerie motrice. En effet, la proprioception contribue fortement à la mise à jour du schéma corporel et à la simulation mentale des mouvements.

Nous n'avons pas mis en évidence de lien statistique entre la **négligence spatiale** quelle que soit sa modalité (péripersonnelle ou personnelle) et les scores d'imagerie motrice. Cependant, bien que les différences ne soient pas significatives, on retrouvait une tendance à une perception moins bonne de l'illusion du mouvement chez les patients présentant une négligence unilatérale plus marquée, quelle que soit sa modalité, de manière prédominante au membre inférieur. Ces résultats ne vont pas dans le sens de

certaines études antérieures, comme celle de Vromen et al. en 2011 (31), où la présence d'une négligence unilatérale semblait altérer la capacité à effectuer des tâches d'imagerie motrice visuelle chez les patients ayant subi un AVC droit. En effet, du fait de la compétence de l'hémisphère droit dans le traitement des informations spatiales (lobe pariétale postérieur), l'héminégligence concerne le plus souvent l'hémi-espace gauche corporel et/ou extracorporel (32). La négligence spatiale est donc responsable d'un manque d'initiation du mouvement du côté affecté et d'une altération de la planification spatiale du mouvement, du fait du manque de prise en compte de l'espace du côté parétique.

Nous n'avons pas mis en évidence de lien statistique entre la **fonction motrice** et l'imagerie motrice, que ce soit pour le score du Fugl Meyer ou le testing moteur. Ce lien n'avait jamais été étudié. Une étude de Page et al. en 2000 (34), a montré que les patients ayant bénéficié d'une combinaison entre un programme de rééducation et de l'imagerie motrice ont présenté une amélioration significativement plus importante du Fugl-Meyer que ceux ayant reçu le programme de rééducation seul a montré que l'augmentation du score du Fugl Meyer était statistiquement significative dans le groupe entraîné par l'imagerie mentale par rapport au groupe contrôle (entraînement fonctionnel seul), indiquant que l'imagerie motrice combinée à l'entraînement fonctionnel améliorait davantage la motricité du bras que l'entraînement seul. Ces résultats sont contradictoires avec une étude de Martínez-Rolando (35) dont les résultats ont montré que la capacité à générer de l'imagerie motrice kinesthésique est liée significativement à la force physique chez les patients post-AVC (contrairement à l'imagerie motrice externe). D'autres études (40) ont montré que le non-usage d'un membre pendant une courte période induit des changements au niveau cortical et affecte les performances motrices (41). Ces altérations sont dues à l'immobilisation, ce qui entraîne une dysfonction des signaux proprioceptifs vers le système sensori-moteur. Ces résultats sont cohérents avec ceux de Toussaint et

Meugnot (42) concernant la plasticité fonctionnelle de la représentation sensorimotrice induite par une courte période d'immobilisation ou une condition de privation sensorielle chez des sujets sains. Ainsi, l'altération des performances motrice par le non-usage du membre conforte que l'activité physique est un élément essentiel dans la qualité de l'illusion du mouvement.

Aucune corrélation significative n'était retrouvée entre l'imagerie motrice et la **douleur à la mobilisation passive**. Une étude de Haslam et al. en 2023 (37) a montré que l'imagerie interne était altérée après un AVC, et que la douleur n'expliquait pas directement ces déficits (pas de différence significative selon le côté douloureux). Au contraire, en dehors de l'AVC, une étude de Heerkens et al. en 2018 (38) a montré que la douleur chronique (au niveau du cou, des épaules et des bras) modifie la représentation corporelle et la performance en imagerie motrice. Cependant, les déficits d'imagerie motrice n'étaient pas directement corrélés à l'intensité de la douleur, ce qui suggère que ces troubles reflètent plutôt des altérations corticales de la représentation corporelle (plutôt que l'intensité douloureuse).

La **mobilité passive articulaire** réduite est principalement retrouvée au niveau de l'épaule et est secondaire à de la spasticité ou à une immobilisation prolongée. L'ensemble constitue un frein au mouvement actif. Une étude de Meugnot et al. en 2014 (39) met en évidence qu'une immobilisation de la main pendant 24 heures altère la performance de la rotation de la main en imagerie motrice interne, ce qui suggère qu'une réduction de la mobilité articulaire modifie les processus d'imagerie motrice. Au total, les études précédentes suggèrent que la présence de limitations articulaires passives ou de douleurs à la mobilisation, en particulier au niveau de l'épaule, peut perturber la facilité et la clarté des images mentales, voire générer des représentations motrices biaisées ou incomplètes. Ces éléments sont d'autant plus importants que l'imagerie motrice repose sur

l'intégration multisensorielle et sur la mémoire motrice des mouvements déjà vécus. Ainsi, chez les patients présentant des altérations sensorielles, des enraidissements ou des douleurs importantes, les stratégies d'imagerie motrice sont limitées.

4. Forces et limites de l'étude

Ce travail est le premier à évaluer de manière simultanée l'imagerie motrice en prenant en compte non seulement les performances globales, mais aussi un gradient proximo-distal et les différences entre le membre inférieur et supérieur, tout en mesurant les liens de ces caractéristiques avec un ensemble de déficiences sensitivo-motrices et cognitives (négligence spatiale unilatérale).

Afin de limiter au maximum un biais de performance de la part des participants, les tests d'imagerie mentale selon les deux protocoles (MIQ-3f et items additionnels) et selon les deux perspectives (kinesthésique ou externe), étaient randomisés par bloc.

Notre étude souffre de plusieurs limites.

Tout d'abord, la taille de l'échantillon était de taille réduite, entraînant un manque de puissance statistique, d'où la nécessité de poursuivre les inclusions de patients.

Un seul évaluateur était impliqué pour l'ensemble des tests : une méthodologie stricte aurait pris deux évaluateurs différents pour la réalisation des tests d'imagerie motrice et l'évaluation initiale des participants.

De plus, la population n'était pas homogène, notamment en termes de délai post-AVC, d'âge et de répartition entre droitiers et gauchers. Par ailleurs, certains patients avaient déjà pratiqué l'imagerie mentale au cours de séances de rééducation, entraînant un biais de confusion.

De plus, il existait parfois une certaine hétérogénéité de motivation non contrôlable des patients concernant la réalisation de l'imagerie motrice. Il existe peu d'outils de mesure objectif pour évaluer la participation réelle des patients à la tâche d'imagerie motrice. L'étude de Gäumann et al. en 2023 (60) propose une solution de mesure objective pour évaluer si un patient après un AVC s'engage réellement dans une tâche d'imagerie motrice, en mesurant la fréquence cardiaque qui s'avère être un indicateur fiable de l'engagement des patients dans l'imagerie motrice. À noter que les mouvements oculaires (captés par électro-oculographie et l'électroencéphalographie) et la saturation en oxygène enregistrée pendant l'imagerie motrice ne reflètent pas ceux de l'exécution physique (60). Une autre étude de 2018 (61) a suggéré que la spectroscopie fonctionnelle infrarouge (mesurant le taux d'hémoglobine oxygénée) pourrait servir d'outil fiable pour évaluer l'engagement volontaire des utilisateurs : en effet, la taux d'hémoglobine était plus marqué et plus étendue autour du cortex sensorimoteur lorsque les participants réalisaient un exercice combiné par imagerie motrice et mobilisation passive, comparé à un exercice par mobilisation passive seule (61).

De plus, les patients avec des troubles cognitifs sévères n'ont pas été inclus, rendant l'extrapolation des résultats difficile à l'ensemble de la population, limitant donc la validité externe.

Enfin, lors de la réalisation des tests d'imagerie mentale, il pouvait exister un biais de performance des individus par entraînement à l'apprentissage de l'imagerie mentale. En conséquence, les tâches mentales les plus tardivement réalisées auraient pu être mieux réussies que les plus précoces. Cette limite est toutefois minorée par la présentation des tests dans un ordre randomisé.

5. Perspectives futures

5.1 Poursuite des inclusions de patients

Afin d'augmenter la puissance statistique de notre étude, il convient d'augmenter le nombre de participants.

5.2 Comparaison de la réalité virtuelle et thérapie miroir

Notre étude a étudié les facteurs influençant l'imagerie motrice du membre supérieur. Dans un premier temps, il serait intéressant d'étudier si la réalité virtuelle et la thérapie miroir potentialise les capacités d'illusion du mouvement.

Dans un second temps, nous pourrions étudier l'influence de la réalité virtuelle et la thérapie miroir comme outil potentiel dans la rééducation du membre supérieur, et comparer ces deux techniques de rééducation en terme d'efficacité clinique. Notre étude avait pour objectif d'évaluer les facteurs susceptibles d'influencer la perception de l'imagerie motrice du membre supérieur après un AVC.

CONCLUSION

Notre étude avait pour objectif d'évaluer les facteurs susceptibles d'influencer la perception de l'imagerie motrice du membre supérieur après un AVC.

Les résultats montrent que les performances en imagerie motrice étaient comparables selon les modalités kinesthésique et externe. Aucune différence significative n'a été observée entre les membres supérieurs et inférieurs, bien que l'on aurait pu s'attendre à une meilleure performance pour les membres supérieurs, dont la motricité est davantage orientée vers une tâche spécifique.

De même, aucune différence notable n'a été constatée entre les mouvements proximaux et distaux. Une meilleure performance en imagerie motrice externe pour les mouvements distaux aurait pourtant pu être anticipée, ces derniers étant plus facilement perçus visuellement et plus fréquemment sollicités dans la vie quotidienne.

Par ailleurs, les patients présentant une lésion de l'hémisphère droit ainsi que ceux avec des troubles proprioceptifs semblaient avoir des capacités d'imagerie motrice plus limitées. L'exploration des liens entre perception du mouvement et des déficiences associées a révélé peu de résultats statistiquement significatifs.

Néanmoins, il convient de souligner que ces observations doivent être interprétées en prenant en compte le faible effectif de participants. Des études futures, incluant plus de patients, permettraient d'approfondir ces résultats et d'explorer l'apport potentiel de la réalité virtuelle et de la thérapie miroir comme outils de rééducation du membre supérieur, en comparant leur efficacité clinique respective.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) García Carrasco, D., & Aboitiz Cantalapiedra, J. (2016). Efectividad de la imaginería o práctica mental en la recuperación funcional tras el ictus: revisión sistemática. *Neurología*, 31(1), 43–52.
- (2) Braun, S. M., Kleynen, M., Schols, J., Schack, T., Beurskens, A., & Wade, D. (2008). Using mental practice in stroke rehabilitation: a framework. *Clinical Rehabilitation*, 22(7), 579–591.
- (3) Liu, X., Zhang, W., Li, W., Zhang, S., Lv, P., & Yin, Y. (2023). Effects of motor imagery based brain-computer interface on upper limb function and attention in stroke patients with hemiplegia: a randomized controlled trial. *BMC Neurology*, 23, 136.
- (4) Monteiro KB, Cardoso MDS, Cabral V, Santos A, Silva PSD, Castro JBP, et al. Effects of Motor Imagery as a complementary resource on the Rehabilitation of Stroke Patients: a Meta-analysis of Randomized trials. *J stroke Cerebrovasc diseases: official J Natl Stroke Association*. 2021;30 8:105876.
- (5) Sacco, R. L., Kasner, S. E., Broderick, J. P., Caplan, L. R., Connors, J. J., Culebras, A., Elkind, M. S. V., George, M. G., Hamdan, A. D., Higashida, R. T., et al. (2013). An updated definition of stroke for the 21st century: a statement for healthcare professionals from the American Heart Association/American Stroke Association. *Stroke*, 44(7), 2064–2089.
- (6) Tingting Yan, Wei Liang, Carmen W. H. Chan, Yao Shen, Shuling Liu, Mingzi Li (2024). Effects of motor imagery training on gait performance in individuals after stroke: a systematic review and meta-analysis. *Disability and Rehabilitation*, 19 April 2024, pages 1–15.
- (7) Stephan KM, Fink GR, Passingham RE, Silbersweig D, Ceballos-Baumann AO, Frith CD, et al. (1995). Functional anatomy of the mental representation of upper extremity movements in healthy subjects. *J Neurophysiol* 1995;73:373–86.
- (8) Sharma, N., Pomeroy, V. M., & Baron, J.-C. (2006). Motor imagery: A backdoor to the motor system after stroke? *Stroke*, 37(7), 1941–1952.
- (9) Lebon, F., Gueugneau, N., & Papaxanthis, C. (2013). Modèles internes et imagerie motrice. *Movement & Sport Sciences – Science & Motricité*, 82, 51–61
- (10) Hanakawa, T., Immisch, I., Toma, K., Dimyan, M. A., Van Gelderen, P., & Hallett, M. (2003). Functional properties of brain areas associated with motor execution and imagery. *Journal of Neurophysiology*, 89(2), 989–1002.

- (11) Cocchini, G., & Beschin, N. (2022). The Fluff test: Improved scoring system to account for different degrees of contralesional and ipsilesional personal neglect in brain damaged patients. *Neuropsychological Rehabilitation*, 32(1), 69–83.
- (12) Molenberghs, P., Sale, M. V., & Mattingley, J. B. (2012). Is there a critical lesion site for unilateral spatial neglect? A meta-analysis using activation likelihood estimation. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6, 78
- (13) Nudo, R. J. (2013). Recovery after brain injury: mechanisms and principles. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 887.
- (14) Cramer, S. C. (2000). Stroke recovery: how the computer reprograms itself. *Neuronal plasticity: the key to stroke recovery* (Kananskis, Alberta, Canada, 19–22 March 2000). *Molecular Medicine Today*, 6(7), 301–303.
- (15) Carmichael, S. T. (2006). Cellular and molecular mechanisms of neural repair after stroke: Making waves. *Annals of Neurology*, 59(5), 735–742.
- (16) Carmichael, S. T. (2006). Cellular and molecular mechanisms of neural repair after stroke: Making waves. *Annals of Neurology*, 59(5), 735–742.
- (17) Hu, J., Li, C., Hua, Y., Liu, P., Gao, B., Wang, Y., & Bai, Y. (2020). Constraint-induced movement therapy improves functional recovery after ischemic stroke and its impacts on synaptic plasticity in sensorimotor cortex and hippocampus. *Brain Research Bulletin*, 159, 36–47.
- (18) Dromerick, A. W., Lang, C. E., Birkenmeier, R. L., Wagner, J. M., Miller, J. P., Videen, T. O. & Edwards, D. F. (2009). Very Early Constraint-Induced Movement during Stroke Rehabilitation (VECTORS): A single-center RCT. *Neurology*, 73(3), 195–201.
- (19) Matsuda, F., Sakakima, H., & Yoshida, Y. (2011). The effects of early exercise on brain damage and recovery after focal cerebral infarction in rats. *Acta Physiologica*, 201(2), 275–287
- (20) Monsma EV, Gregg MJ, Seiler B, Sacko RS, Hall CR, (2022). Convergent validity and sex invariant factor structure of the Movement Imagery Questionnaire-3 – Second version (MIQ-3S), *Musculoskeletal Science & Practice*, 59:102537.
- (21) Kleyweg RP, van der Meché FG, Schmitz PI (1991). Interobserver agreement in the assessment of muscle strength and functional abilities in Guillain–Barré syndrome. *Muscle Nerve*. 1991;14(11):1103-9.
- (22) Page, S. J., Fulk, G. D., & Boyne, P. (2012). Clinically important differences for the upper-extremity Fugl-Meyer Scale in people with minimal to moderate impairment due to chronic stroke. *Physical Therapy*, 92(6), 791–798

- (23) Heilman, K. M., Watson, R. T., & Valenstein, E. (1993). Neglect and related disorders. In K. M. Heilman & E. Valenstein (Eds.), *Clinical neuropsychology* (3rd ed., pp. 279–336). Oxford University Press.
- (24) Gracies, J.-M. (2005). Pathophysiology of spastic paresis. II: Emergence of muscle overactivity. *Muscle & Nerve*, 31(5), 552–571.
- (25) Hackett, M. L., & Pickles, K. (2014). Part I: Frequency of depression after stroke: An updated systematic review and meta-analysis of observational studies. *International Journal of Stroke*, 9(8), 1017–1025.
- (26) Liu, L., Xu, M., Marshall, I. J., Wolfe, C. D. A., Wang, Y., & O'Connell, M. D. L. (2023). Prevalence and natural history of depression after stroke: A systematic review and meta-analysis of observational studies. *PLOS Medicine*, 20(3), e1004200.
- (27) Page, S. J., Levine, P., & Leonard, A. (2007). Mental practice in chronic stroke: Results of a randomized, placebo-controlled trial. *Stroke*, 38(4), 1293–1297.
- (28) Crajé, C., van der Graaf, C., Lem, F., Geurts, A., & Steenbergen, B. (2010). Determining specificity of motor imagery training for upper limb improvement in chronic stroke patients: A training protocol and pilot results. *International Journal of Rehabilitation Research*, 33(4), 359–362.
- (29) Malouin, F., Richards, C. L., Durand, A., & Doyon, J. (2008). Clinical assessment of motor imagery after stroke. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 22(4), 330–340.
- (30) Le Franc, S., Bonan, I., Fleury, M., Butet, S., Barillot, C., Lécuyer, A., & Cogné, M. (2021). Visual feedback improves movement illusions induced by tendon vibration after chronic stroke. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 18, 156.
- (31) Vromen, A., Verbunt, J. A., Rasquin, S., & Wade, D. T. (2011). Motor imagery in patients with a right hemisphere stroke and unilateral neglect. *Brain Injury*, 25(4), 387–393.
- (32) Neurologie, par le Collège des enseignants de neurologie, 5^e édition, 2019, 624 pages.
- (33) Liu, K. P., Chan, C. C., Lee, T. M., & Hui-Chan, C. W. (2004). Mental imagery for promoting relearning for people after stroke: a randomized controlled trial. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 85(9), 1403–1408.
- (34) Page, S. J. (2000). Imagery improves upper extremity motor function in chronic stroke: a pilot study. *Occupational Therapy Journal of Research*, 20(3), 200–215
- (35) Martínez-Rolando, L., Martín-Casas, P., & Pérez-Pérez, T. (2024). Assessment of motor imagery and its relationship to functional impairment in post-stroke patients: A descriptive cross-sectional study. *Journal of Clinical Medicine*, 13(19), 5929.

- (36) Gäumann, S., Gerber, R. S., Suica, Z., Wandel, J., & Schuster-Amft, C. (2021). A different point of view: the evaluation of motor imagery perspectives in patients with sensorimotor impairments in a longitudinal study. *BMC Neurology*, 21, Article 297.
- (37) Haslam, B. S., Butler, D. S., Cocks, T. S., Kim, A. S., & Carey, L. M. (2023). Body Schema as Assessed by Upper Limb Left/Right Judgment Tasks Is Altered in Stroke: Implications for Motor Imagery Training. *Journal of Neurologic Physical Therapy*, 47(1), 26–34.
- (38) Heerkens, R. J., Köke, A. J. A., Lotters, F. J. B., & Smeets, R. J. E. M. (2018). Motor imagery performance and tactile acuity in patients with complaints of arms, neck and shoulder. *Pain Management*, 8(4), 277–286.
- (39) Meugnot, A., Almecija, Y., & Toussaint, L. (2014). The embodied nature of motor imagery processes highlighted by short-term limb immobilization. *Experimental Psychology*, 61(3), 180–186.
- (40) Burianová, H., Sowman, P. F., Marstaller, L., Rich, A. N., Williams, M. A., Savage, G., Al-Janabi, S., de Lissa, P., & Johnson, B. W. (2016). Adaptive motor imagery: A multimodal study of immobilization-induced brain plasticity. *Cerebral Cortex*, 26(3), 1072–1080.
- (41) Huber, R., Ghilardi, M. F., Massimini, M., Ferrarelli, F., Riedner, B. A., Peterson, M. J., & Tononi, G. (2006). Arm immobilization causes cortical plastic changes and locally decreases sleep slow wave activity. *Nature Neuroscience*, 9(9), 1169–1176.
- (42) Toussaint, L., & Meugnot, A. (2013). Short-term limb immobilization affects cognitive motor processes. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 39(2), 623–632.
- (43) Heremans, E., Feys, P., Nieuwboer, A., Vercruyse, S., Vandenberghe, W., Sharma, N., & Helsen, W. F. (2011). Motor imagery ability in patients with early- and mid-stage Parkinson disease. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 25(2), 168–177.
- (44) Avanzino, L., Pelosin, E., Martino, D., & Abbruzzese, G. (2013). Motor timing deficits in sequential movements in Parkinson disease are related to action planning: a motor imagery study. *PLoS ONE*, 8(9): e75454.
- (45) Gil-Bermejo-Bernárdez-Zerpa, A., Moral-Muñoz, J. A., Lucena-Antón, D., & Luque-Moreno, C. (2021). Effectiveness of Motor Imagery on Motor Recovery in Patients with Multiple Sclerosis: Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(2), 498.

- (46) Mizuguchi, N., Nakata, H., & Kanosue, K. (2014). Effector-independent brain activity during motor imagery of the upper and lower limbs: an fMRI study. *Neuroscience Letters*, 581, 69–74.
- (47) Harirchian, M. H., Oghabian, M. A., Rezvanizadeh, A., & Bolandzadeh, N. (2008). Comparison of laterality index of upper and lower limb movement using brain activated fMRI. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 6916, 69161Q.
- (48) Ranganathan, V. K., Siemionow, V., Liu, J., & Yue, G. H. (2004). From mental power to muscle power—gaining strength by using the mind. *Neuropsychologia*, 42(7), 944–956.
- (49) Taub, E., Uswatte, G., Mark, V. W., & Morris, D. M. M. (2006). The learned nonuse phenomenon: implications for rehabilitation. *Eura Medicophys*, 42(3), 241–256
- (50) Zapala, D., Wriessnegger, S. C., Lugo-Figueroa, J., Heinzle, J., & Georgi, J. (2021). Handedness effects on motor imagery during kinesthetic and visual-motor conditions. *Scientific Reports*, 11, 8206
- (51) Crotti, M., Koschutnig, K., & Wriessnegger, S. C. (2022). Handedness impacts the neural correlates of kinesthetic motor imagery and execution: A fMRI study. *Journal of Neuroscience Research*, 100(4), 798–826.
- (52) Cocchini, G., Beschin, N., & Jehkonen, M. (2001). The Fluff Test: A simple task to assess body representation neglect. *Neuropsychological Rehabilitation*, 11(1), 17–31.
- (53) Robin, N., Coudevylle, G. R., Guillot, A., & Toussaint, L. (2020). French translation and validation of the Movement Imagery Questionnaire-third version (MIQ-3f). *Movement & Sport Sciences – Science & Motricité*, (108), 23-31
- (54) Fink, G. R., Marshall, J. C., Shah, N. J., Weiss, P. H., Halligan, P. W., Grosse-Ruyken, M., Ziemons, K., Zilles, K., & Freund, H.-J. (2000). Line bisection judgments implicate right parietal cortex and cerebellum as assessed by fMRI. *Neurology*, 54(6), 1324–1331.
- (55) Leonards, U., Sunaert, S., Van Hecke, P., & Orban, G. A. (2000). Attention mechanisms in visual search—an fMRI study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(Suppl. 2), 61–75.
- (56) Lee, S. H., Lee, J. Y., Kim, M. Y., Jeon, Y. J., Kim, S., & Shin, J. H. (2018). Virtual reality rehabilitation with functional electrical stimulation improves upper extremity function in patients with chronic stroke: A pilot randomized controlled study. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 99(8), 1447–1453.e1.

- (57)Rode, G., Halligan, P. W., Luauté, J., Rossetti, Y., & Boisson, D. (2021). Mirror therapy for unilateral neglect after stroke: A systematic review. *European Journal of Neurology*, 28(4), 1187–1197.
- (58)Liepert, J., Greiner, J., Nedelko, V., & Dettmers, C. (2012). Reduced upper-limb sensation impairs mental chronometry for motor imagery after stroke: Clinical and electrophysiological findings. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 26(5), 470–478
- (59)Proske, U., & Gandevia, S. C. (2012). The proprioceptive senses: Their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force. *Physiological Reviews*, 92(4), 1651–1697.
- (60)Gäumann, A., Aksöz, S., Behrendt, F., Wandel, C., Cappelletti, M., Krug, L., Mördner, L., Bill, P., Parmar, D., Gerth, H., Bonati, L., & Schuster-Amft, C. (2023). The challenge of measuring physiological parameters during motor imagery engagement in patients after a stroke. *Frontiers in Neuroscience*, 17.
- (61)Ramirez, R., Abreu, P., Cao, B., & Radvany, H. (2018). Assessment of user voluntary engagement during neurorehabilitation using functional near-infrared spectroscopy: a preliminary study. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 15, Article 74.
- (62)Liu, W., Cheng, X., Rao, J., Yu, J., Lin, Z., Wang, Y., Wang, L., Li, D., Liu, L., & Gao, R. (2024). Motor imagery therapy improved upper limb motor function in stroke patients with hemiplegia by increasing functional connectivity of sensorimotor and cognitive networks. *Frontiers in Human Neuroscience*, 18, 1295859.
- (63)Rousseaux, M., Sauer, A., Saj, A., Bernati, T., & Honoré, J. (2013). Mislocalization of tactile stimuli applied to the trunk in spatial neglect. *Cortex*, 49(10), 2607-2615.
- (64)Rousseaux, M., Sauer, A., Bernati, T., Leclercq, M., & Honoré, J. (2011). Distortions of perceptual body representation in neglect patients. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 54(S1), e206-e207.

ANNEXES

Annexe 1 : Questionnaire MIQ-3f

1. Position de départ : Debout, pieds joints, bras le long du corps.

Action : Montez votre genou aussi haut que possible afin de vous tenir sur une jambe. Le genou de la jambe levée doit être maintenu fléchi. Maintenant abaissez votre jambe jusqu'à ce que vous vous retrouviez en position pieds joints. Exécutez ces actions lentement.

Tâche Mentale : Prenez la position de départ. Essayez de vous sentir en train de faire le mouvement que vous venez d'exécuter sans le faire réellement. Maintenant, estimez la facilité ou la difficulté avec laquelle vous étiez capable de faire cette tâche mentale.

2. Position de départ : Debout, pieds légèrement écartés, bras le long du corps.

Action : Fléchissez complètement les jambes et sautez verticalement aussi haut que possible avec les deux bras étendus au dessus de votre tête. Réceptionnez vous pieds légèrement écartés en abaissant latéralement les bras le long du corps

Tâche Mentale : Prenez la position de départ. Essayez de vous voir en train de faire le mouvement que vous venez d'exécuter selon une perspective interne. Maintenant, estimez la facilité ou la difficulté avec laquelle vous étiez capable de faire cette tâche mentale.

3. Position de départ : Élevez latéralement (sur le côté) le bras de votre main non-dominante afin qu'il soit parallèle au sol, la paume vers le bas.

Action : Déplacez votre bras parallèlement au sol jusqu'à ce qu'il soit directement devant vous. Gardez votre bras tendu pendant le mouvement et faites le mouvement lentement.

Tâche Mentale : Prenez la position de départ. Essayez de vous voir en train de faire le mouvement que vous venez d'exécuter selon une perspective externe. Maintenant, estimez la facilité ou la difficulté avec laquelle vous étiez capable de faire cette tâche mentale et l'angle à partir duquel l'image était observée (voir la page annexe donnant la liste totale des différents angles).

4. Position de départ : Debout, pieds légèrement écartés, bras complètement étendus au-dessus de la tête.

Action : Lentement, fléchissez le haut du corps vers l'avant au niveau de la taille et essayez de toucher vos orteils avec le bout de vos doigts (ou si possible, touchez le sol avec le bout de vos doigts ou vos mains). Maintenant revenez à la position de départ en vous redressant avec les bras tendus au-dessus de votre tête.

Tâche Mentale : Prenez la position de départ. Essayez de vous sentir en train de faire le mouvement que vous venez d'exécuter sans le faire réellement. Maintenant, estimez la facilité ou la difficulté avec laquelle vous étiez capable de faire cette tâche mentale.

5. Position de départ : Debout, pieds joints, bras le long du corps.

Action : Montez votre genou aussi haut que possible afin de vous tenir sur une jambe. Le genou de la jambe levée doit être maintenu fléchi. Maintenant abaissez votre jambe jusqu'à ce que vous vous retrouviez en position pieds joints. Exécutez ces actions lentement.

Tâche Mentale : Prenez la position de départ. Essayez de vous voir en train de faire le mouvement que vous venez d'exécuter selon une perspective interne. Maintenant, estimez la facilité ou la difficulté avec laquelle vous étiez capable de faire cette tâche mentale.

6. Position de départ : Debout, pieds légèrement écartés, bras le long du corps.

Action : Fléchissez complètement les jambes et sautez verticalement aussi haut que possible avec les deux bras étendus au dessus de votre tête. Réceptionnez vous pieds légèrement écartés en abaissant latéralement les bras le long du corps

Tâche Mentale : Prenez la position de départ. Essayez de vous voir en train de faire le mouvement que vous venez d'exécuter selon une perspective externe. Maintenant, estimez la facilité ou la difficulté avec laquelle vous étiez capable de faire cette tâche mentale et l'angle à partir duquel l'image était observée (voir la page annexe donnant la liste totale des différents angles).

7. Position de départ : Élevez latéralement (sur le côté) le bras de votre main non-dominante afin qu'il soit parallèle au sol, la paume vers le bas.

Action : Déplacez votre bras parallèlement au sol jusqu'à ce qu'il soit directement devant vous. Gardez votre bras tendu pendant le mouvement et faites le mouvement lentement.

Tâche Mentale : Prenez la position de départ. Essayez de vous sentir en train de faire le mouvement que vous venez d'exécuter sans le faire réellement. Maintenant, estimez la facilité ou la difficulté avec laquelle vous étiez capable de faire cette tâche mentale.

8. Position de départ : Debout, pieds légèrement écartés, bras complètement étendus au-dessus de la tête.

Action : Lentement, fléchissez le haut du corps vers l'avant au niveau de la taille et essayez de toucher vos orteils avec le bout de vos doigts (ou si possible, touchez le sol avec le bout de vos doigts ou vos mains). Maintenant revenez à la position de départ en vous redressant avec les bras tendus au-dessus de votre tête.

Tâche Mentale : Prenez la position de départ. Essayez de vous voir en train de faire le mouvement que vous venez d'exécuter selon une perspective interne. Maintenant, estimez la facilité ou la difficulté avec laquelle vous étiez capable de faire cette tâche mentale.

9. Position de départ : Debout, pieds joints, bras le long du corps.

Action : Montez votre genou aussi haut que possible afin de vous tenir sur une jambe. Le genou de la jambe levée doit être maintenu fléchi. Maintenant abaissez votre jambe jusqu'à ce que vous vous retrouviez en position pieds joints. Exécutez ces actions lentement.

Tâche Mentale : Prenez la position de départ. Essayez de vous voir en train de faire le mouvement que vous venez d'exécuter selon une perspective externe. Maintenant, estimez la facilité ou la difficulté avec laquelle vous étiez capable de faire cette tâche mentale et l'angle à partir duquel l'image était observée (voir la page annexe donnant la liste totale des différents angles).

10. Position de départ : Debout, pieds légèrement écartés, bras le long du corps.

Action : Fléchissez complètement les jambes et sautez verticalement aussi haut que possible avec les deux bras étendus au-dessus de votre tête. Réceptionnez vous pieds légèrement écartés en abaissant latéralement les bras le long du corps

Tâche Mentale : Prenez la position de départ. Essayez de vous sentir en train de faire le mouvement que vous venez d'exécuter sans le faire réellement. Maintenant, estimez la facilité ou la difficulté avec laquelle vous étiez capable de faire cette tâche mentale.

11. Position de départ : Élevez latéralement (sur le côté) le bras de votre main non-dominante afin qu'il soit parallèle au sol, la paume vers le bas.

Action : Déplacez votre bras parallèlement au sol jusqu'à ce qu'il soit directement devant vous. Gardez votre bras tendu pendant le mouvement et faites le mouvement lentement.

Tâche Mentale : Prenez la position de départ. Essayez de vous voir en train de faire le mouvement que vous venez d'exécuter selon une perspective interne. Maintenant, estimez la facilité ou la difficulté avec laquelle vous étiez capable de faire cette tâche mentale.

12. Position de départ : Debout, pieds légèrement écartés, bras complètement étendus au-dessus de la tête.

Action : Lentement, fléchissez le haut du corps vers l'avant au niveau de la taille et essayez de toucher vos orteils avec le bout de vos doigts (ou si possible, touchez le sol avec le bout de vos doigts ou vos mains). Maintenant revenez à la position de départ en vous redressant avec les bras tendus au-dessus de votre tête.

Tâche Mentale : Prenez la position de départ. Essayez de vous voir en train de faire le mouvement que vous venez d'exécuter selon une perspective externe. Maintenant, estimez la facilité ou la difficulté avec laquelle vous étiez capable de faire cette tâche mentale et l'angle à partir duquel l'image était observée (voir la page annexe donnant la liste totale des différents angles).

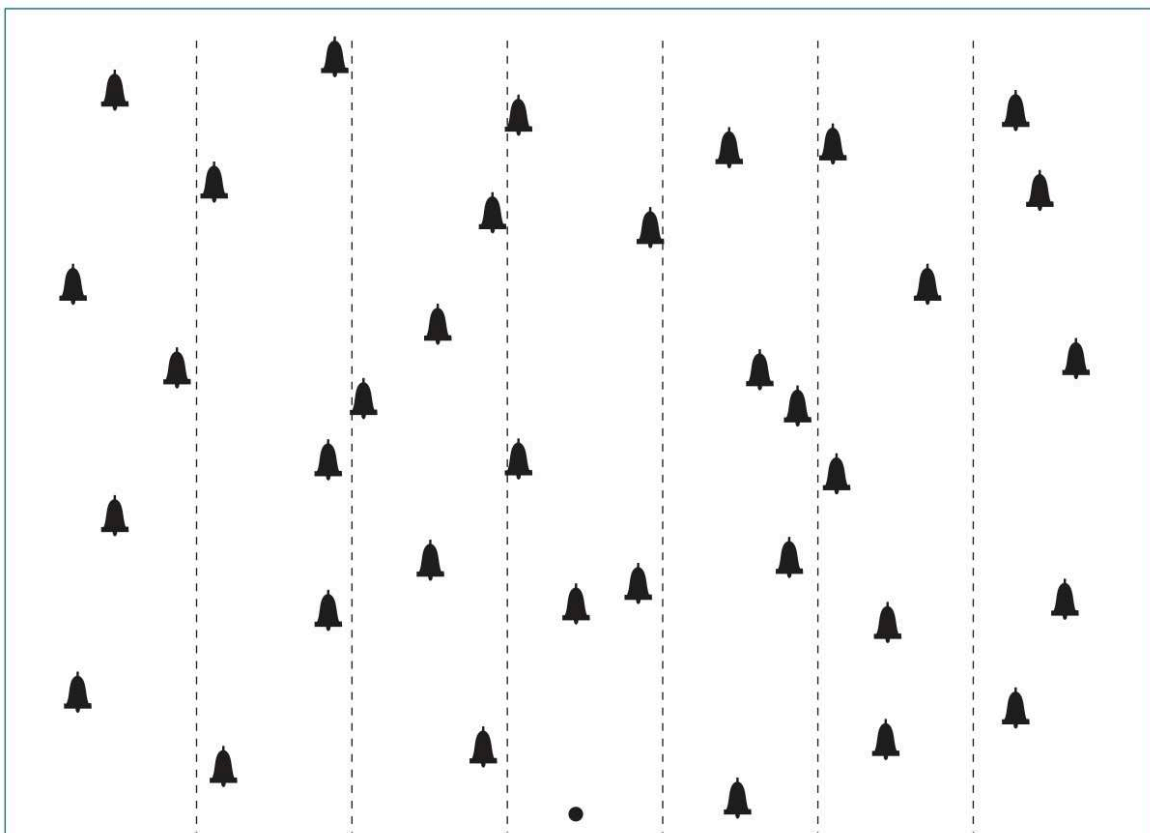
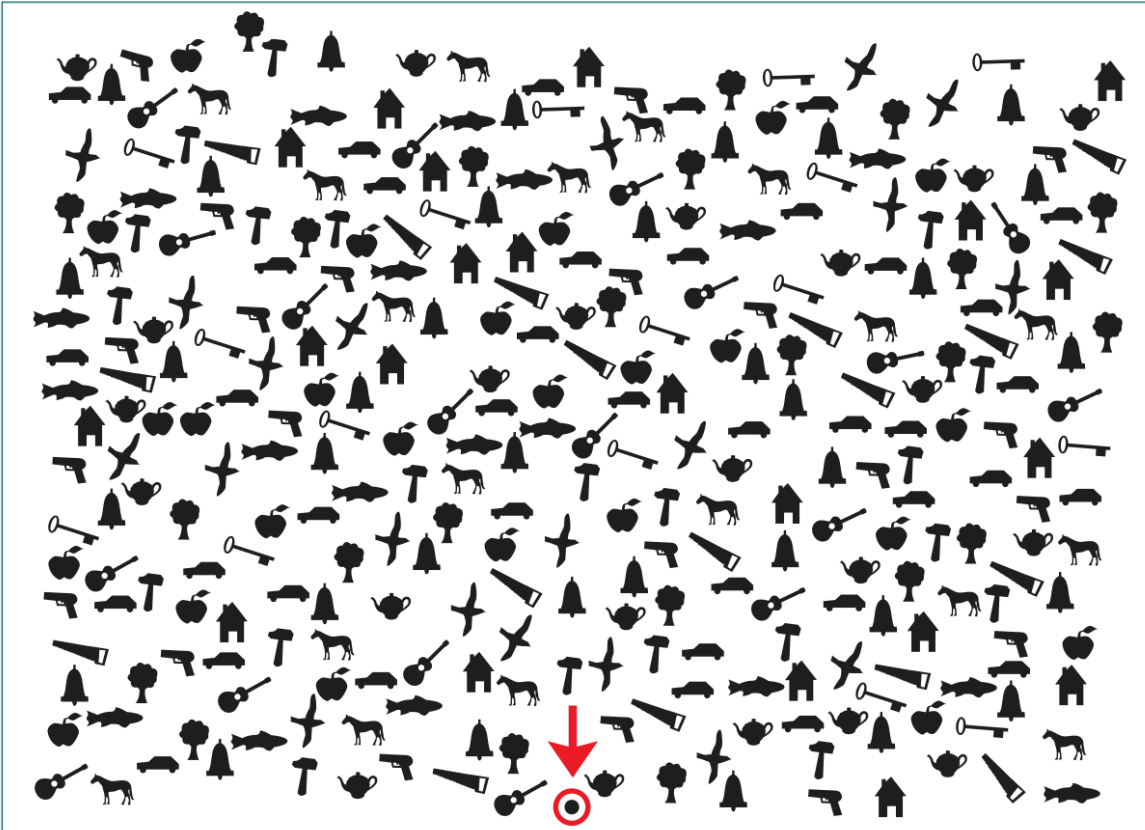
Echelle d'imagerie visuelle

1	2	3	4	5	6	7
Très difficile à visualiser	Difficile à visualiser	Assez difficile à visualiser	Neutre (ni facile ni difficile)	Assez facile à visualiser	Facile à visualiser	Très facile à visualiser

Echelle d'imagerie kinesthésique

1	2	3	4	5	6	7
Très difficile à sentir	Difficile à sentir	Assez difficile à sentir	Neutre (ni facile ni difficile)	Assez facile à sentir	Facile à sentir	Très facile à sentir

Annexe 2 : Test des cloches



AUTEURE : Nom : BOZON

Prénom : Penelope

Date de soutenance : 01/10/2025

Titre de la thèse : Facteurs associés à la perception de l'imagerie motrice post-AVC : étude préliminaire.

Thèse - Médecine - Lille 2025

Cadre de classement : Médecine Physique et de Réadaptation Neurologique

DES + FST/option : Médecine Physique et de Réadaptation

Mots-clés : imagerie motrice ; imagerie mentale ; neurones miroirs ; illusion du mouvement ; négligence spatiale unilatérale ; schéma corporel ; membre supérieur ; membre inférieur.

Résumé :

Contexte : les AVC représentent la première cause acquise de handicap neurologique, pouvant engendrer des déficiences motrices, sensibles, et cognitives, responsables d'un handicap fonctionnel majeur. La rééducation s'appuie sur le principe de neuroplasticité cérébrale, notamment en imagerie motrice. Cependant un certain nombre de déficiences peuvent perturber l'illusion du mouvement. L'objectif de cette étude était donc de déterminer les facteurs associés aux capacités de perception d'illusion du mouvement, autrement dit d'imagerie motrice, d'un point de vue kinesthésique ou externe, chez les patients ayant été victimes d'un accident vasculaire cérébral.

Méthode : Les tests se déroulaient dans le service de Rééducation Neurologique Cérébrolésion du CHU de Lille. Les patients réalisaient un questionnaire standardisé, le MIQ-3f, et des tâches mentales spécifiques des mouvements du membre supérieur. Des comparaisons entre performances du membre supérieur et inférieur ont été réalisées, tout comme celles entre mouvements proximaux et distaux. Les liens avec la sévérité des déficiences motrices et sensibles, la douleur et la négligence spatiale ont été explorés.

Résultats : treize patients ont été inclus. Les performances n'étaient pas différentes entre modalités (externe vs kinesthésique), membre supérieur et inférieur et proximal vs distal. Les sujets présentant une lésion hémisphérique droite avaient tendance à avoir une perception moins bonne de l'illusion motrice, pour le MIQ en modalité externe ($p=0,004$), pour le membre supérieur en modalité kinesthésique ($p=0,048$), et pour le membre inférieur en modalité externe ($p=0,006$). La sensibilité palloesthésique était significativement corrélée au score d'imagerie motrice du membre supérieur des items additionnels d'un point de vue kinesthésique ($p=0,013$) et externe ($p=0,004$). Aucun lien n'a été mis en évidence avec la latéralité, le sexe, l'âge et le délai depuis l'AVC. Concernant les déficiences, la sévérité n'était, pour la plupart d'entre elles, pas associée à la perception de l'illusion du mouvement.

Conclusion : Les résultats montrent que les performances en imagerie motrice étaient globalement comparables selon les modalités kinesthésique et externe, entre les membres supérieurs et inférieurs et entre les mouvements proximaux et distaux. Par ailleurs, les patients présentant une lésion de l'hémisphère droit ainsi que ceux avec des troubles proprioceptifs semblaient avoir des capacités d'imagerie motrice plus limitées.

Composition du Jury :

Président :

Monsieur le Professeur Arnaud DELVAL

Assesseurs :

Madame le Docteur Charlotte ROSSELIN

Madame le Docteur Anne BENOIT

Directeur de thèse :

Monsieur le Professeur Etienne ALLART