

Faculté des sciences de la motricité

Comparaison de l'apprentissage moteur entre le sujet sain et le patient AVC et les régions cérébrales associées

Une revue narrative

Autrice : Camille SLUYS

Promotrice : Coralie VAN RAVESTYN

Co-promotrice : Maria LEEUWERCK

Année académique : 2023-2024

Master en sciences de la motricité, orientation générale [120] : Finalité spécialisée :
kinésithérapie en neurologie adulte - MOTR2M

REMERCEMENTS

Au terme de ce mémoire qui clôture mes cinq années d'études, je souhaite remercier et exprimer ma profonde gratitude pour toutes les personnes présentes à mes côtés durant l'élaboration de ce travail.

D'abord, je tiens à remercier sincèrement ma promotrice, Coralie Van Ravestyn et ma co-promotrice, Maria Leeuwerck pour leur précieux conseils, pour leurs encouragements et pour leur relecture.

Merci aussi à ma famille de m'avoir soutenue pendant ce mémoire, votre présence a été d'une importance capitale pour moi.

Merci à toi Myriam pour ta bienveillance et ta relecture. Ta présence a été d'une aide précieuse.

Table des matières

REMERCEMENTS	3
INTRODUCTION	6
1 L'accident vasculaire cérébral	6
1.1 Tableau clinique.....	8
1.2 Les facteurs de risques.....	8
1.3 Les facteurs de la récupération	9
1.4 Rééducation des patients après AVC	10
1.5 La plasticité neuronale.....	11
1.6 Les différents types de déficiences post-AVC	12
1.6.1 Les déficiences motrices	12
1.6.2 Les déficiences cognitives.....	12
2 L'apprentissage moteur.....	13
2.1 Intérêt de l'apprentissage moteur	13
2.2 L'apprentissage implicite VS explicite	14
2.3 Les différentes catégories d'apprentissage	14
2.3.1 L'apprentissage basé sur l'erreur (error-based).....	15
2.3.2 L'apprentissage par renforcement.....	16
2.3.3 L'apprentissage dépendant de l'utilisation (UPD)	16
2.3.4 La stratégie cognitive	17
METHODE	19
RESULTATS	20
1 Etude sur l'apprentissage basé sur l'erreur.....	20
1.1 Résultats chez le sujet sain	20
1.2 Zones cérébrales associées	24
1.2.1 Le cervelet.....	24
1.2.2 Le cortex cingulaire antérieur	26
2 Etude sur l'apprentissage par renforcement	26
2.1 Résultats chez le sujet sain	26
2.2 Zones cérébrales associées	29
2.2.1 Les ganglions de la base	30

2.2.2	Le cortex moteur primaire (M1).....	30
3	L'interaction entre l'apprentissage basé sur l'erreur et l'apprentissage par renforcement	31
4	L'apprentissage moteur après un AVC.....	35
4.1	Comparaison de l'apprentissage moteur entre sujets sains et patients après un AVC 35	
4.2	Comparaison des zones cérébrales activées lors de l'apprentissage moteur chez les sujets sains et les patients après un AVC	41
	DISCUSSION	43
	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	46
	BIBLIOGRAPHIE	48

INTRODUCTION

1 L'accident vasculaire cérébral

L'accident vasculaire cérébral (=AVC) est une affection neurologique qui fait suite à une interruption du flux sanguin au niveau d'une ou plusieurs régions cérébrales (Wolfe, 2000).

Deux types d'AVC sont identifiés : l'AVC ischémique et hémorragique (Fig. 1).

1) L'AVC ischémique représente 80% des AVC. Il se caractérise par un début brutal et est le résultat de l'obstruction d'un vaisseau sanguin par un caillot qui interrompt dès lors la circulation sanguine dans le cerveau (Monsour & Borlongan, 2023).

2) De manière plus rare, l'AVC hémorragique résulte de la rupture de la paroi d'une artère cérébrale (Monsour & Borlongan, 2023). La région cérébrale normalement vascularisée se trouve dès lors privée de son apport sanguin habituel tandis que l'accumulation de sang en dehors des vaisseaux exerce une pression sur les structures cérébrales, pouvant ainsi provoquer une anoxie pour les neurones des régions environnantes (Rabier, 2020).

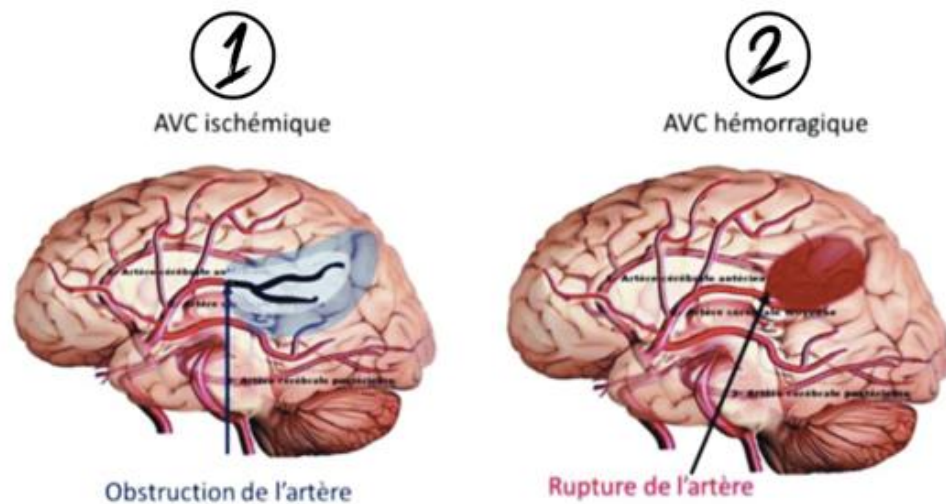


Fig.1 : Les deux types d'AVC : ischémique et hémorragique.

L'AVC ischémique est le résultat de l'obstruction d'un vaisseau sanguin par un caillot. Le blocage du débit sanguin engendre une anoxie cérébrale et la mort neuronale, ce qui provoque la perte de certaines fonctions cérébrales. L'AVC hémorragique est la conséquence de la rupture d'une artère cérébrale qui provoque un saignement dans le cerveau ou autour du cerveau. Adapté selon (Rabier, 2020).

L'AVC affecte 13,7 millions de personnes chaque année dans le monde et est la cause principale de handicap chronique chez l'adulte provoquant ainsi des dysfonctionnements moteurs et des paralysies chez 89% des individus hospitalisés en phase aiguë (Campbell et al., 2019 ; Monsour & Borlongan, 2023 ; Wolfe, 2000).

Il représente aussi la troisième cause de décès dans les pays en voie de développement et dans le monde Occidental avec un bilan de 5,5 millions de morts par an, derrière les maladies cardiovasculaires et les cancers. Il est aussi responsable de la deuxième cause de démence chez l'adulte, après la maladie d'Alzheimer (Campbell et al., 2019; Hyenne et al., 2007).

Un homme sur quatre et près d'une femme sur cinq risquent de subir un AVC au cours de leur vie dans le monde. Inversement, les femmes sont davantage susceptibles de succomber à un AVC que les hommes (16% contre 8%) ? Ceci est dû au fait que l'âge moyen de survenue de l'AVC est plus élevé chez les femmes (73 ans) et que leur espérance de vie dépasse celle des hommes (Wolfe, 2000).

1.1 Tableau clinique

L'AVC entraîne généralement une perte soudaine de certaines fonctions cérébrales due à une réduction ou une absence d'apport sanguin dans plusieurs parties du cerveau. L'individu présentera en conséquence un déficit neurologique, englobant des perturbations dans les fonctions motrices, sensorielles, cognitives, sociales ou autres dont la gravité dépendra de l'étendue, de la localisation ainsi que de la région cérébrale touchée (Recondo, 2004).

Sur le plan moteur, les déficits les plus importants sont identifiés du côté de l'hémicorps contralatéral à la lésion. Les symptômes peuvent inclure une hémiparésie, une aphasie, une dysphagie et une surdité unilatérale brutale (Campbell et al., 2019). 89% des patients hospitalisés en phase aiguë ont des problèmes au niveau des fonctions motrices (Hendricks et al., 2002).

Des troubles sensitifs (hypo ou anesthésie) tels que la perte de sensibilité superficielle, de sensibilité profonde et de sensibilité thermo-algique ont également été observés chez des patients ayant subi un AVC, avec une échelle de fréquence variant de 11% à 85% (Recondo, 2004; Yelnik, 2022).

Environ deux tiers des patients post-AVC sont concernés par des troubles cognitifs, pouvant engendrer des perturbations psycho-affectives telles que la dépression et l'anxiété (Recondo, 2004).

Enfin, 20 à 30% des patients présentent aussi des troubles visuels, des troubles de la verticalité et une négligence visuospatiale (Recondo, 2004).

1.2 Les facteurs de risques

Plus de 90% des AVC sont liés à une mauvaise hygiène de vie telle que l'hypertension artérielle (>160/90 mmHg), un faible niveau d'activité physique, le diabète,

l'hypercholestérolémie, la consommation élevée d'alcool et de tabac ainsi que l'obésité (Campbell et al., 2019).

Parallèlement, des facteurs non modifiables tels que l'âge, la génétique, la pollution atmosphérique et le sexe peuvent être associés aux AVC (Campbell et al., 2019).

Enfin, certaines causes cardiaques comme la fibrillation auriculaire, les troubles de la coagulation sanguine, les maladies hématologiques et les infarctus du myocarde peuvent aussi provoquer des AVC (Kouakou N'goran et al., 2015).

1.3 Les facteurs de la récupération

La Figure 2 illustre les différents processus physiologiques en cas d'AVC ischémiques et hémorragiques au cours des six premiers mois suivant le début de l'AVC (Bernhardt et al., 2017).

La phase hyper aiguë survient au tout début de l'AVC et dure en général 24h. Elle induit une mort neuronale et à la formation d'un hématome cérébral important.

Ensuite, la phase aiguë (jour 1 à jour 7 post-AVC) correspond au processus d'inflammation et de cicatrisation. [OBJ]

Plus tard, la phase subaiguë (entre la première semaine et les trois mois suivant l'AVC) se marque par une plasticité endogène du cerveau et par une amélioration importante des déficits qui tend à se stabiliser lors de l'arrivée en phase chronique.

Pour finir, lors de la phase chronique (six mois post AVC), les déficits et la plasticité cessent de s'améliorer et atteignent un plateau (Bernhardt et al., 2017).

La récupération la plus importante des déficits moteurs et des déficits comportementaux s'observe au cours des premières semaines ou des premiers mois suivant un AVC (Bernhardt et al., 2017).

Une interaction entre les mécanismes biologiques tels que la plasticité cérébrale et les mécanismes comportementaux tels que l'apprentissage moteur souligne l'importance

d'une prise en charge précoce pour favoriser l'amélioration fonctionnelle des patients (Napon et al., 2013).

Ce mémoire se focalisera principalement sur *la rééducation par l'apprentissage moteur*.

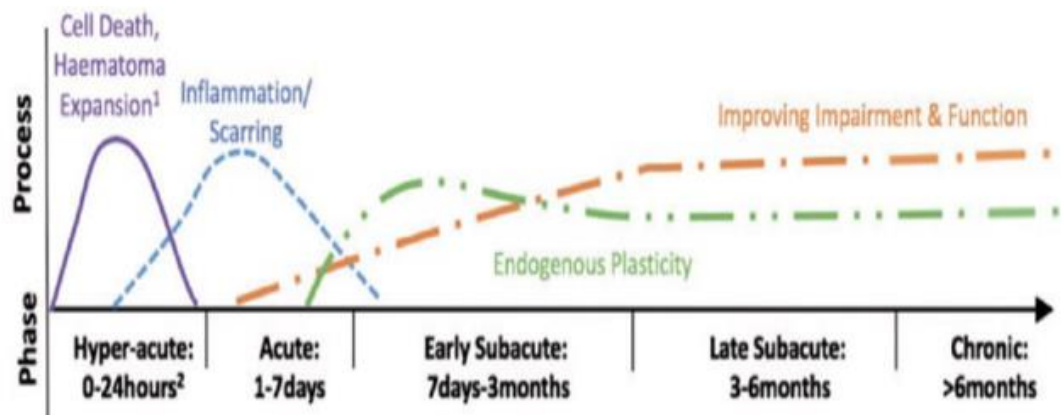


Fig.2 : Les phases physiologiques critiques après l'accident vasculaire cérébral. Dans les premières heures suivant l'AVC, le cerveau présente une mort neuronale et la formation d'un hématoïme. La première semaine est marquée par une phase inflammatoire et de cicatrisation. Entre la première semaine et les trois mois suivant l'AVC, une plasticité endogène importante est observée, caractérisée par la capacité du cerveau à se réorganiser et à régénérer à la suite d'un AVC. La plasticité endogène tend à diminuer lors de la phase subaiguë (entre 3 et 6 mois post AVC). En phase chronique (6 mois post AVC), une stabilisation de l'amélioration des déficits et des fonctions est observée (Bernhardt et al., 2017).

1.4 Rééducation des patients après AVC

La rééducation au début de la phase subaiguë commence dès la première semaine suivant l'AVC et vise principalement à minimiser les séquelles et à éviter l'évolution vers un infarctus constitué. C'est durant cette phase que **la plasticité neuronale** (voir plus loin) est la plus importante, rendant cette période cruciale pour la récupération du patient (Bernhardt et al., 2017). Elle commence principalement sept jours après l'AVC et dure jusqu'à trois mois (Yelnik, 2022).

En phase chronique, la rééducation est principalement axée sur l'amélioration de l'exécution de tâches fonctionnelles en utilisant les fonctions motrices préservées dans le but de retrouver la mobilité et l'autonomie des patients.

La classification Internationale du Fonctionnement, du Handicap et de la Santé (CIF) est désormais un outil utile pour élaborer des objectifs clairs avec le patient. Elle ajoute une perspective sociale en mettant l'accent sur la participation (Albert & Kesselring, 2012).

1.5 La plasticité neuronale

Pendant longtemps, les recherches scientifiques suggéraient que les axones et les dendrites étaient fixes et immuables. Cependant, à l'heure actuelle, de nombreux résultats d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) ont montré que l'apprentissage d'une nouvelle séquence motrice (soit implicite, soit explicite) pouvait favoriser la plasticité cérébrale en impliquant des modifications synaptiques, une régénération cellulaire et une modification de la représentation corticale corporelle qui permettent aux neurones sains de récupérer les fonctions auparavant dirigées par les neurones lésés (Deroide et al., 2010).

Ainsi, une rééducation basée sur des stratégies d'apprentissage et de répétitions serait relativement intéressante durant la phase aigüe de l'AVC pour renforcer les circuits neuronaux et rétablir les compétences fonctionnelles.

1.6 Les différents types de déficiences post-AVC

1.6.1 Les déficiences motrices

La déficience la plus courante et la plus largement reconnue à la suite d'un AVC est la déficience motrice qui entraîne une réduction ou une perte du contrôle musculaire, de l'autonomie et/ou du mouvement. Elle concerne environ 80% des patients et les affecte dans leurs activités quotidiennes, limitant ainsi leur capacité à accomplir certaines tâches essentielles à la vie de tous les jours (Einstad et al., 2021).

Elle regroupe l'hémiplégie qui est une déficience motrice qui affecte l'hémicorps contralatéral, la spasticité qui correspond à une exagération des réflexes tendineux et des spasmes musculaires découlant d'une lésion des motoneurones supérieurs et enfin l'ataxie qui est définie comme un trouble de la coordination des mouvements volontaires et de l'équilibre sans faiblesse musculaire.

Bien que la déficience motrice tende à s'améliorer spontanément au cours des trois premiers mois après l'accident, la moitié de ces patients souffre toujours d'une incapacité motrice liée à l'AVC trois mois plus tard.

C'est pourquoi la réadaptation après un AVC se concentre en grande partie sur la récupération des mouvements altérés et des fonctions associées (Langhorne et al., 2009).

1.6.2 Les déficiences cognitives

Certains patients, avec une prévalence allant de 11 à 42%, présentent des troubles cognitifs majeurs après un AVC qui peuvent persister dans la phase subaiguë et dans la phase chronique (Albert & Kesselring, 2012).

Ces troubles touchent les fonctions exécutives (syndrome dysexécutif), la communication, l'attention, la cognition globale ainsi que la mémoire (Einstad et al., 2021; Orrell et al., 2006).

Les déficits cognitifs varient en fonction du territoire vasculaire touché par l'AVC. Par exemple, une lésion de l'artère cérébrale antérieure et/ou postérieure semble être davantage associée aux déficiences cognitives qu'au déficiences motrices (Tatemichi et al., 1994).

Il est donc important d'inclure les informations cognitives dans la rééducation des individus post-AVC afin de créer des conditions optimales d'apprentissage (Tatemichi et al., 1994).

2 L'apprentissage moteur

2.1 Intérêt de l'apprentissage moteur

L'apprentissage moteur est la capacité d'acquérir de nouvelles compétences, de les améliorer par l'entraînement et de les encoder dans la mémoire à long terme menant à un changement relativement permanent de la performance et de l'habileté motrice (Krakauer et al. 2006).

Des études récentes ont permis de mieux comprendre les différents processus d'apprentissage qui sous-tendent l'apprentissage moteur, notamment (1) l'apprentissage basé sur l'erreur, (2) l'apprentissage par renforcement, (3) l'apprentissage dépendant de l'utilisation et (4) l'apprentissage par stratégies cognitives qui ont tous le même objectif commun : apprendre une nouvelle compétence motrice.

2.2 L'apprentissage implicite VS explicite

L'apprentissage moteur est souvent considéré comme un phénomène implicite. Cependant, les deux types de mémoires, tant implicite qu'explicite sont importantes pour la plupart des types d'apprentissage moteur (Marinelli et al., 2017).

La mémoire implicite est une mémoire non déclarative et inconsciente qui se divise en quatre catégories : l'apprentissage procédural, l'amorçage qui est le fait d'influencer la réponse par un indice, l'apprentissage associatif et enfin, l'apprentissage non associatif (Marinelli et al., 2017).

L'apprentissage procédural concerne les connaissances acquises mais non verbalisables par le langage et fonctionne grâce à plusieurs aires corticales dont les ganglions de la base et l'amygdale qui jouent un rôle dans la formation d'habitudes.

La plupart des habilités motrices impliquent des connaissances procédurales qui nécessitent peu d'attention une fois acquises (Winstein et al., 2014).

L'apprentissage moteur implicite semble constituer une intervention prometteuse pour améliorer l'apprentissage moteur chez le patient après un AVC (Kal et al., 2016).

La mémoire explicite déclarative est définie comme la capacité à se souvenir consciemment d'un mouvement précédemment appris et à le reproduire (Wood et al., 2023). Elle englobe la mémoire épisodique qui représente le souvenir des événements et la mémoire sémantique qui concerne les connaissances actuelles sur le monde.

Il suffit d'un seul fait pour mettre en place la mémoire épisodique alors que la mémoire sémantique se construit par répétitions.

2.3 Les différentes catégories d'apprentissage

L'apprentissage moteur est un processus complexe qui fait interagir plusieurs formes d'apprentissage simultanément. Comme le décrit Spampinato et Celnik (2021), il faut

une contribution de chaque type d'apprentissage qui sous-tendent l'apprentissage moteur pour qu'une action se produise.

Les humains utilisent l'apprentissage moteur pour exécuter des tâches quotidiennes tout au long de leur vie. Ce processus requiert différentes formes d'apprentissage distinctes à savoir l'apprentissage basé sur l'erreur, le renforcement, la stratégie cognitive et la plasticité dépendante de l'utilisation. Toutes ces formes d'apprentissage utilisent des substrats neuronaux et des stratégies différentes pour conduire au résultat souhaité.

2.3.1 L'apprentissage basé sur l'erreur (error-based)

La capacité du système moteur à s'adapter aux changements et aux perturbations de l'environnement est fondamentale pour la réalisation des mouvements de la vie quotidienne (Galea et al., 2011).

Par exemple, un joueur de tennis doit apprendre à s'adapter à différents terrains, aux poids des différentes raquettes, à différentes conditions météorologiques (poids plus lourd de la balle de tennis en cas de pluie) nécessitant ainsi un processus de contrôle flexible pour réussir à frapper la balle suivante (Spampinato & Celnik, 2021).

L'apprentissage basé sur l'erreur désigne la capacité à ajuster la manière dont une action déjà acquise est exécutée pour maintenir la performance correctement après une perturbation de l'environnement ou d'une modification dans le corps (Taylor & Ivry, 2012).

Ce type d'apprentissage consiste donc à réduire les erreurs de prédiction sensorielle afin de ramener les performances aux niveaux de pré-perturbation (Spampinato & Celnik, 2021).

De ce fait, lorsque l'erreur de prédiction est nulle et que le résultat est prévisible, l'apprentissage ne se produit pas.

Cet apprentissage a une composante à la fois implicite et explicite et peut déjà s'apprendre en un seul essai, permettant ainsi à l'individu de s'adapter très rapidement, même après une perturbation aléatoire.

2.3.2 L'apprentissage par renforcement

Contrairement à l'apprentissage basé sur l'erreur qui est quantifié et qui compense une erreur que l'individu connaît déjà, l'apprentissage par renforcement est binaire et l'individu apprend une nouvelle capacité qui est basé sur un simple feedback concernant le succès ou l'échec du mouvement.

Lorsque le mouvement est réussi, le cerveau est récompensé par une libération de dopamine, ce qui encourage l'individu à répéter la même action.

Cet apprentissage n'obtient pas de retours sensoriels pour évaluer si le mouvement a été réussi ou non (Truong et al., 2023).

En d'autres termes, l'apprentissage par renforcement permet à l'individu de sélectionner et de reproduire des actions qui mènent à des résultats positifs (Spampinato & Celnik, 2021).

Cet apprentissage réduit la variabilité et augmente la précision des mouvements tout en améliorant leur exécution par la répétition, ce qui permet d'utiliser moins de contrôle cognitif et de rendre le mouvement plus automatique (Spampinato & Celnik, 2021).

Il est à la fois implicite (procédural) et explicite (déclaratif) (De Brouwer et al., 2022).

2.3.3 L'apprentissage dépendant de l'utilisation (UPD)

L'apprentissage dépendant de l'utilisation (UPD) consiste à orienter le mouvement de l'individu en fonction de sa dernière exécution induit par la simple répétition de mouvements (Diedrichsen et al., 2010).

En d'autres mots, des mouvements répétés augmentent la probabilité que les mouvements ultérieurs se fassent dans cette même direction. Cet apprentissage requiert beaucoup de répétitions avec un engagement cognitif de l'apprenant pour comprendre la tâche.

En effet, plusieurs études ont montré que des mouvements passifs ou trop guidés ne montraient pas d'amélioration dans le comportement moteur ou dans la plasticité cérébrale (Leech et al., 2022).

De plus, contrairement à l'apprentissage basé sur l'erreur qui se produit sur une échelle de temps très rapide, l'apprentissage dépendant de l'utilisation s'apprend sur une très longue période.

2.3.4 La stratégie cognitive

L'apprentissage basé sur la stratégie cognitive fait référence à l'utilisation d'une stratégie de mouvement intentionnelle de la part de l'individu pour induire un changement de comportement moteur (Leech et al., 2022). Cet apprentissage débute lorsque l'individu reçoit un retour sur une erreur de mouvement par rapport un objectif défini.

La stratégie cognitive peut être utilisée en clinique par les kinésithérapeutes lorsqu'ils fournissent des commentaires aux patients cognitivement intacts (indices verbaux concernant un exercice mal réalisé par exemple) et qu'ils demandent aux patients explicitement des stratégies pour corriger le mouvement (Leech et al., 2022).

Lorsque la cognition de l'individu est saine, la stratégie cognitive se réalise de manière rapide. Cependant, chez les patients dont la cognition est altérée, comme c'est souvent le cas après un AVC, la stratégie cognitive est plus lente.

Comme mentionné plus haut, l'UPD prend du temps à se mettre en place et la stratégie cognitive nécessite une composante cognitive intacte de la part de l'individu pour fonctionner.

Pour toutes ces raisons, ces deux types d'apprentissage semblent moins prometteurs en rééducation après un AVC. On ne développera donc pas davantage ces points dans ce mémoire.

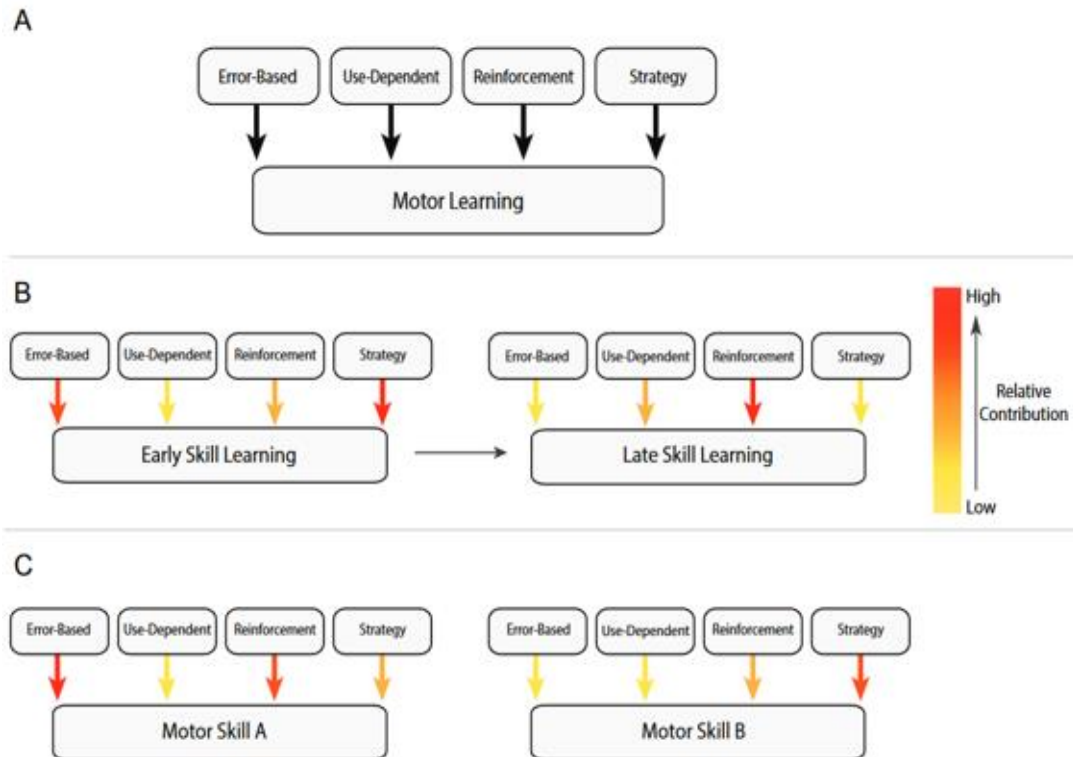


Fig.3 : Processus sous-jacents de l'apprentissage moteur

Chacune de ces formes d'apprentissage est constamment impliquée pour guider la performance de nos mouvements vers un objectif commun. (B) Les contributions de ces différentes formes d'apprentissage sont présentes différemment tout au long du déroulement temporel du même entraînement moteur. La couleur rouge représente une haute contribution tandis que la couleur jaune signifie une contribution moins importante. (C) De plus, les contributions de ces différentes formes d'apprentissage varient en fonction du type de tâche motrice à effectuer (Spampinato & Celnik, 2021).

METHODE

Ce mémoire est basé sur l'analyse de différents articles de la littérature scientifique publiés entre 1994 et 2024, concernant l'apprentissage moteur chez les sujets sains, chez les sujets après un AVC et s'intéresse aux zones cérébrales concernées par différents types d'apprentissage moteur.

Ces articles proviennent de différentes bases de données : Google Scholar, Pubmed, Embase, Library Cochrane

Les mots clés utilisés sont : STROKE, MOTOR LEARNING, NEUROIMAGERY, NEUROREHABILITATION, NEURAL SUBSTRATES

Des références croisées ont également été utilisées.

Le but de ce mémoire est (1) de rassembler les connaissances actuelles sur l'apprentissage moteur en se focalisant sur l'apprentissage basé sur l'erreur et l'apprentissage basé sur le renforcement sur les sujets sains en définissant les zones cérébrales associés à ces types d'apprentissage, (2) de comparer les capacités d'apprentissage moteur entre les sujets sains et les patients ayant subi un AVC et de tenter de relier les différences observées à des territoires cérébraux activés différemment en cas de lésion cérébrale induite par l'AVC.

RESULTATS

1 Etude sur l'apprentissage basé sur l'erreur

1.1 Résultats chez le sujet sain

Dans une étude récente réalisée par Nardi et al. (2024), des individus sains ont été immergés dans un monde virtuel intégrant une table, une queue ainsi que des boules de billard. Cette immersion permettait de modifier certains paramètres visuels sans interférer avec les mouvements complexes de la vie réelle. (**Figure 4**)

Dans la première expérience, le retour visuel était basé uniquement sur l'erreur, c'est à dire que les participants ne recevaient aucun retour sur la réussite ou non de leur tir. Au lieu de cela, dès que la boule blanche touchait la boule cible, les deux boules disparaissaient et les participants se concentraient alors uniquement sur la trajectoire initiale de leur coup.

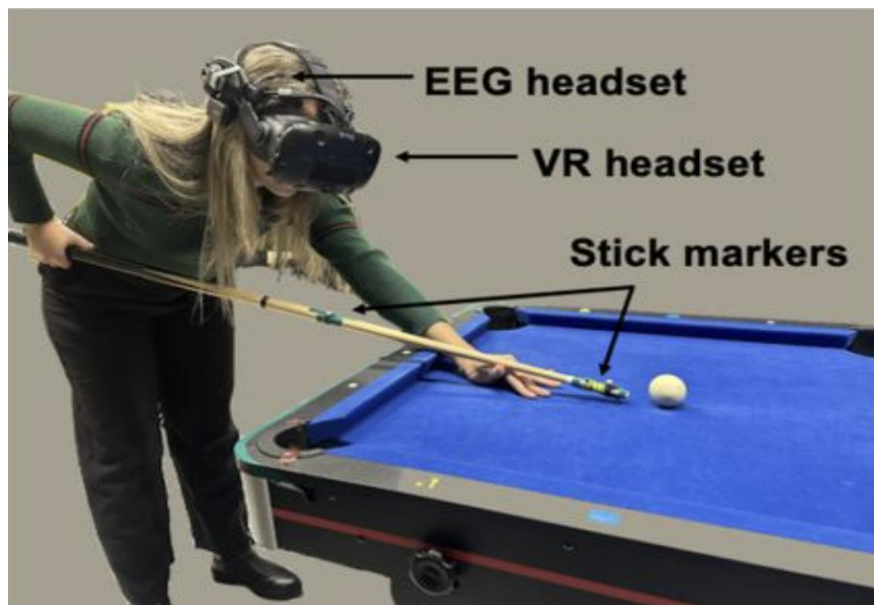


Fig.4 Disposition de l'expérience. Les participants jouent au billard et sont plongés dans un environnement virtuel. (Nardi et al., 2024)

Comme illustré dans la **Figure 5**, les participants ont commencé avec une phase de référence (Baseline) comprenant septante-cinq essais de tir sur la boule blanche sans perturbation et avec un retour visuel personnalisé dans la VR (= réalité virtuelle).

Ensuite, une perturbation (Rotation) a été appliquée sur la trajectoire de la boule blanche (cinq degrés de rotation par rapport à la trajectoire initiale de la boule blanche) avec également un retour visuel pendant cent cinquante essais.

Pour finir, la phase final (Washout) a été menée sans perturbation et avec un retour visuel complet pendant vingt-cinq essais.

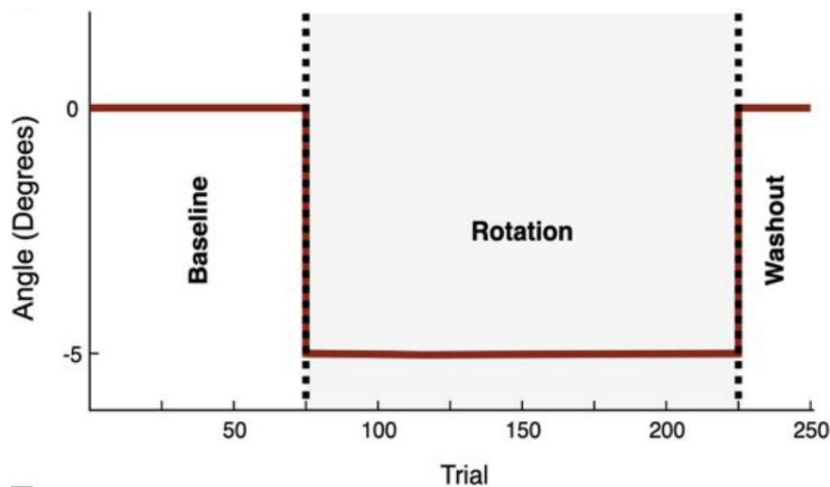


Fig.5 : Structure de l'expérience. 3 phases (Baseline, Rotation, Washout). La zone grise représente la zone d'une perturbation tandis que la ligne rouge représente l'angle idéal. (Nardi et al., 2024)

Lors de la phase de rotation, la trajectoire de la boule blanche a été perturbée et les participants ajustaient leur tir en fonction de l'erreur observée. Lors de cette phase, l'apprentissage basé sur l'erreur a été caractérisée par une courbe double exponentielle qui s'est ralentie avec le temps (**Figure 6**).

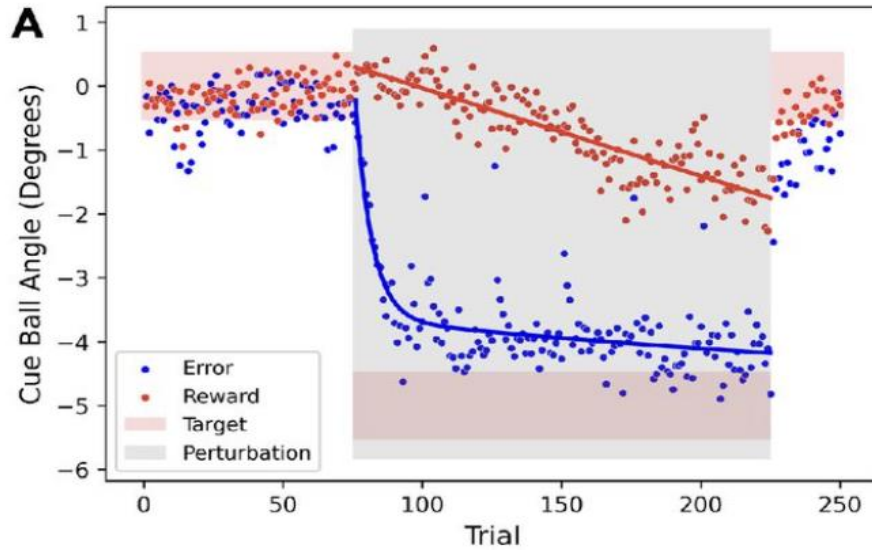


Fig.6 : Angle moyen de la boule par essais.

Zone grise : perturbation. Zone rose : angles réussis.

Bleu : retour visuel avec erreur : apprentissage rapide suivi d'une phase lente. (Nardi et al., 2024).

Dans cette expérience réalisée sur des sujets sains, on constate donc que l'apprentissage basé sur l'erreur permet à des sujets de s'adapter très rapidement à la perturbation induite en corrigeant leur tir mais ensuite la performance s'améliore plus lentement.

Une autre étude réalisée précédemment par Truong et ses collègues (2023) montrent des résultats similaires.

Cette expérience analyse les différents effets de l'entraînement sur la précision des lancers au basket-ball selon l'apprentissage basé sur l'erreur.

Les participants sont répartis en quatre groupes : Le premier groupe recevait un retour sensoriel visuel de leur lancer (apprentissage basé sur l'erreur), le deuxième groupe recevait un retour basé sur la récompense, c'est-à-dire un retour sur la réussite ou l'échec de leur lancer (apprentissage par renforcement) et avait les yeux cachés. Le troisième groupe comprenait un retour mixte (retour sensoriel puis de récompense) et enfin, le dernier groupe (groupe témoin) ne recevait aucun retour.

Quatre mesures ont été prises à différents moments de la semaine, à savoir un jour avant l'entraînement (PreT), immédiatement après (J0), un jour après et sept jours après.

Tous les participants ont réalisé douze lancers lors du test de pré-entraînement.

Pour la séance d'entraînement, tous les groupes ont réalisé cent vingt lancers (dix blocs de douze lancers) sauf le groupe témoin qui a marché pendant vingt-cinq minutes.

Pour les mesures, tous les participants ont dû réaliser douze lancers comme lors du test de pré-entraînement immédiatement, un jour, et sept jours après l'entraînement (**Figure 7**) (Truong et al., 2023).

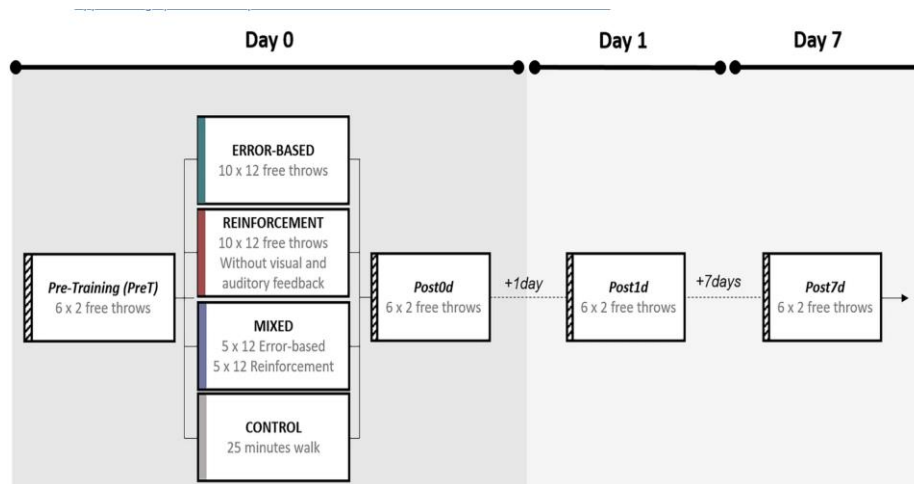


Fig.7 Procédure expérimentale. Tous les participants ont réalisé 6 blocs de 2 lancers lors du test de pré-entraînement. Lors de l'entraînement, ils sont répartis en 4 groupes différents et ils ont effectué 120 lancers sauf les participants du groupe témoin qui ont marché pendant 25 minutes. Immédiatement (J0), un jour et sept jours plus tard, ils ont réalisé 6 blocs de 2 lancers comme lors du pré entraînement (Truong et al., 2023).

Les résultats de l'étude montrent que les participants du groupe qui ne recevaient qu'un retour sensoriel avaient directement un effet de précision du lancer (treize/quinze participants). Cependant, entre le premier et le septième jour de l'étude, l'effet de cette précision a diminué (**Figure 8**).



Fig.8 Valeurs moyennes de précision du lancer pour le groupe avec un apprentissage basé sur l’erreur : *Les triangles noirs indiquent une amélioration significative entre les tests, tandis que les triangles blancs indiquent une diminution de la précision significative. Les flèches vertes et les flèches rouges indiquent respectivement le nombre de participants qui ont amélioré, diminué leur précision de lancer au basket-ball (Truong et al., 2023).*

Cette expérience montre donc que l’apprentissage basé sur l’erreur (identifié via un retour sensoriel) permet d’améliorer très rapidement (J0 et J1) la précision de l’activité motrice (le lancer du ballon) mais que la performance diminue avec le temps (à J7).

1.2 Zones cérébrales associées

1.2.1 Le cervelet

Plusieurs études ont mis en évidence l’implication du cervelet dans la formation de prédictions pour anticiper les événements futurs. En effet, il génère des modèles internes qui font des prédictions sensibles sur toutes nos actions à partir d’une commande motrice créée au sein du cortex prémoteur. Les prédictions faites par le cervelet sont ensuite comparées aux afférences sensorielles réelles résultant du

mouvement qui sont traitées dans le cortex pariétal et/ou de l'olive bulbaire (Habas, 2022).

En cas de discordance entre les prédictions et les afférences sensorielles, un signal d'erreur est envoyé au cortex pour ajuster la commande motrice et au cervelet pour adapter le modèle interne, notamment au cours de l'apprentissage basé sur l'erreur (**Figure 9**) (Habas, 2022).

En d'autres mots, le cervelet calcule l'erreur entre le mouvement planifié et celui réalisé pour adapter le geste et est impliqué dans la stratégie implicite involontaire.

Plusieurs chercheurs ont montré que le cervelet est fortement activé au début de l'apprentissage d'une tâche motrice mais que son activité diminuait par la suite, une fois que les mouvements de la tâche motrice étaient bien appris (Doyon et al., 2009).

Cela renforce l'idée que le cervelet joue un rôle important dans l'apprentissage basé sur l'erreur. En effet, comme mentionné plus haut, l'apprentissage basé sur l'erreur est souvent activé au début du processus d'apprentissage et diminue par la suite.

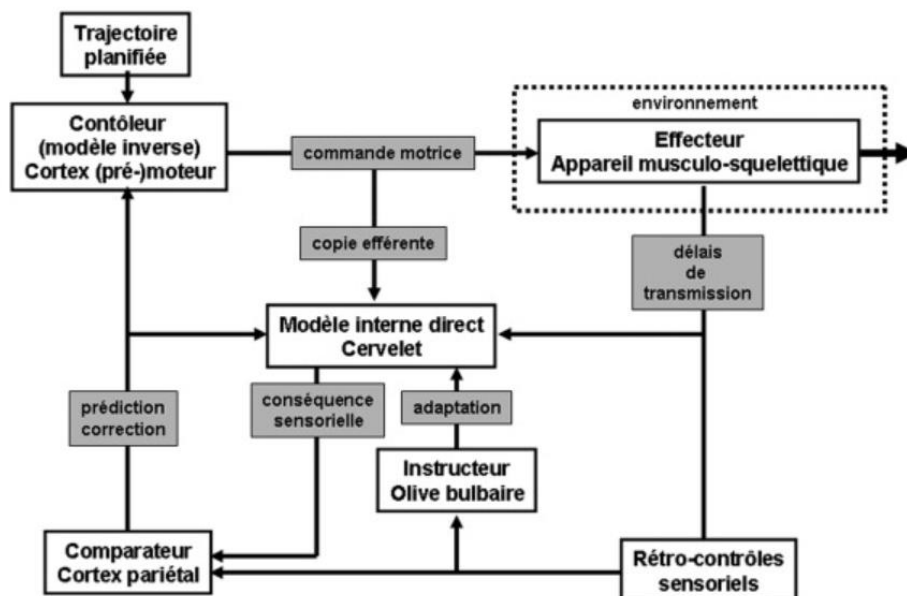


Fig.9 : Le modèle interne du cervelet. Les micro-complexes cérébelleux formeraient un modèle interne permettant de prédire les conséquences sensorielles à partir d'une copie de la commande motrice générée au sein du cortex prémoteur, transmise via la voie cortico-ponto-cérébelleuse et les fibres moussues. Cette prédiction serait comparée aux afférences

sensorielles consécutives au mouvement au sein du cortex pariétal et/ou de l'olive bulbaire. En cas de discordance entre la prédiction et les afférences, un signal d'erreur serait envoyé au cortex pour corriger la commande motrice et au cervelet pour adapter le modèle interne (Habas, 2022).

En clinique, les personnes souffrant de troubles cérébelleux rencontrent des difficultés lorsqu'elles doivent adapter un comportement connu à un changement soudain des conditions environnementales (Spampinato & Celnik, 2021).

1.2.2 Le cortex cingulaire antérieur

Le cortex cingulaire antérieur contribuerait à l'amélioration de la performance en développant une stratégie cognitive plus importante, souvent appelée composante « explicite » lors de l'apprentissage basé sur l'erreur (De Brouwer et al., 2022; Seidler et al., 2013).

De plus, le cervelet possède des connexions qui communiquent avec le cortex moteur et le cortex préfrontal, ce qui renforce l'idée qu'ils pourraient travailler ensemble pour réduire les erreurs de nos mouvements (De Brouwer et al., 2022).

Les patients souffrant de lésions au niveau du cortex cingulaire antérieur éprouvent des difficultés à décrire la perturbation subie ou à identifier quelle action aurait été plausible pour contrebalancer cette perturbation (Taylor & Ivry, 2012).

2 Etude sur l'apprentissage par renforcement

2.1 Résultats chez le sujet sain

Selon l'étude de Nardi et ses collègues (2024), les participants recevaient dans cette deuxième expérience, une information directe sur la réussite ou non de leur tir, le retour visuel était donc basé uniquement sur la récompense en cas de réussite du tir.

Comme lors de la première expérience, lors de la phase de rotation, la trajectoire de la boule blanche était perturbée et les participants ajustaient leur tir en fonction de la perturbation observée.

Lors de cette phase, l'expérience avec un retour visuel de récompense a montré une amélioration de la réussite des tirs lente et progressive caractérisée par une courbe linéaire (**Figure 10**).

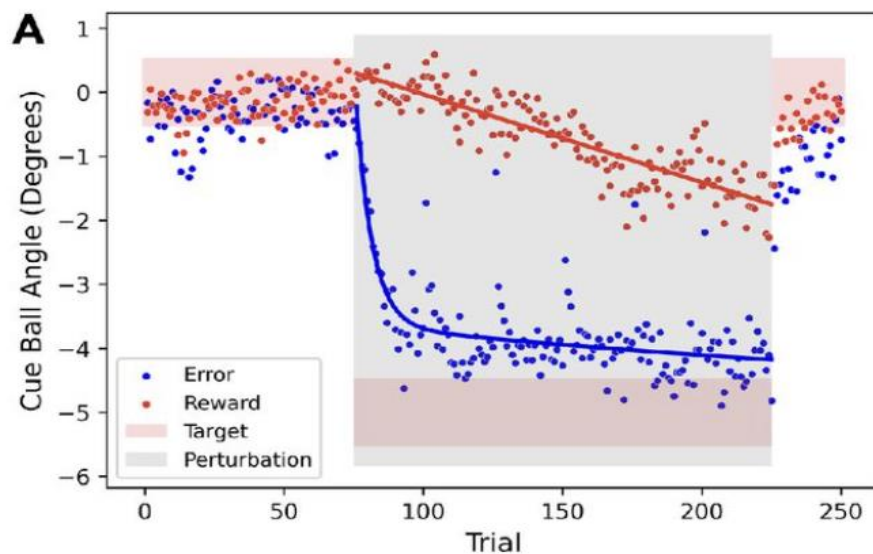


Fig.10 : Angle moyen de la boule par essais (*Nardi et al., 2024*).

L'apprentissage basé sur la récompense permet donc une amélioration lente mais progressive au cours du temps de la performance motrice.

La seconde étude de Truong et ses collègues (2023) montre que les participants du groupe qui recevaient un retour binaire (récompense) avaient une précision faible le jour même de l'entraînement mais de manière non significative (huit/quinze participants ont maintenu la précision acquise pendant l'entraînement tandis que seulement quatre/quinze participants ont montré une diminution de précision).

Entre le premier et le septième jour, la précision des lancers a augmenté chez tous les participants de manière significative (**Figure 11**).

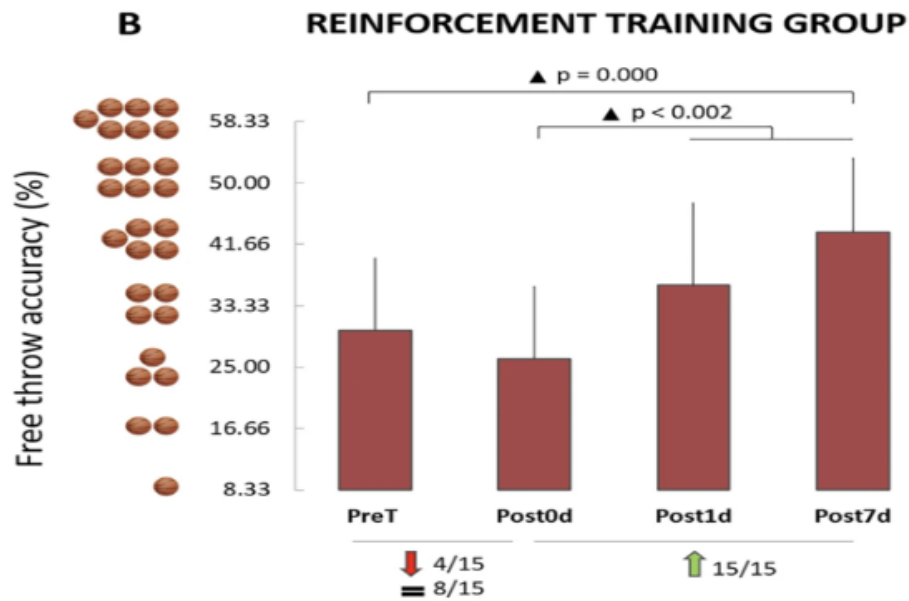


Fig.11 Valeurs moyennes de précision du lancer pour le groupe avec un apprentissage basé sur le renforcement. Le symbole « égal » (=) indique le nombre de participants qui ont maintenu leur précision de lancer au basket-ball (Truong et al., 2023).

A nouveau cette expérience démontre que l'apprentissage basé sur le renforcement s'acquiert progressivement au cours du temps.

Pour savoir si l'effet de la consolidation de la précision à long terme diffère en fonction du type d'entraînement utilisé, une autre expérience a été réalisée avec quinze nouveaux participants.

Tous les tests étaient les mêmes que l'expérience principale. Seule la séance d'entraînement était différente. Les participants ont dû reproduire volontairement des tirs libres et se sont volontairement fixés sept objectifs différents (lancer 5 cm à côté du panier par exemple) répartis aléatoirement tout au long de l'entraînement.

Les analyses ont montré qu'il y avait une amélioration de la précision du lancer directement après l'entraînement avec une consolidation un jour plus tard.

Sept jours plus tard, les données indiquent que la précision du lancer des participants a diminué (huit/quinze participants ont diminué leur précision au lancer). (**Figure 12**)

De plus, un test statistique a montré que la précision des participants du groupe qui lançaient leur ballon de manière aléatoire était inférieure à celle des participants du groupe qui recevaient un entraînement de type binaire, ce qui rend l'apprentissage par renforcement plus intéressant (c'est à dire lancer correct du ballon dans le panier) car il améliore la précision des lancers des participants (Truong et al., 2023).

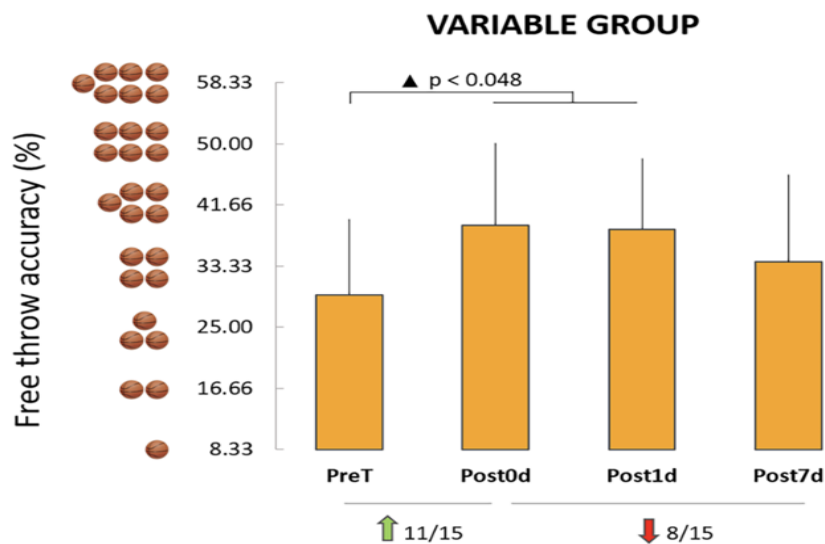


Fig.12 Valeurs moyennes de la précision du lancer franc pour le groupe variable et les quatre tests.

Selon le type d'entraînement (aléatoire ou binaire), cette expérience montre que la performance du lancer diminue lorsque l'entraînement est aléatoire.

2.2 Zones cérébrales associées

De nombreuses études ont montré que les ganglions de la base et le cortex moteur primaire (M1) jouaient un rôle essentiel dans l'apprentissage par renforcement (Spampinato & Celnik, 2021).

En effet, ces derniers utilisent les erreurs de prédiction de la récompense pour encourager l'action souhaitée ou inhiber l'action non désirée (Spampinato & Celnik, 2021).

2.2.1 Les ganglions de la base

Les ganglions de la base, et en particulier le striatum, jouent un rôle important dans la planification et l'exécution de l'apprentissage par renforcement (Doyon et al., 2009).

Plusieurs études ont montré que l'activité du striatum augmentait après la réussite d'une tâche pour laquelle le participant avait une connaissance implicite et/ou explicite complète. (Doyon et al., 2009 ; Leech et al., 2022).

De plus, les chercheurs ont montré que le striatum reste activé tout au long de l'apprentissage (contrairement au cervelet dont l'activité diminue) et cette observation est cohérente avec les travaux de Truong et ses collègues (2023) et de Nardi et ses collègues (2024) mentionnés plus haut (Doyon et al., 2009).

Enfin, les résultats de nombreuses études réalisées sur des primates montrent qu'en bloquant le striatum à l'aide du muscimol, un agoniste des récepteurs GABAA, l'apprentissage de nouvelles séquences motrices est altéré (Doyon et al., 2009).

En clinique, les patients qui ont une défaillance des ganglions de la base, comme c'est le cas pour les patients présentant la maladie de Parkinson ou la maladie de Huntington montrent un ralentissement des mouvements globaux et ont un déficit dans l'apprentissage de nouvelles séquences motrices (Doyon et al., 2009).

2.2.2 Le cortex moteur primaire (M1)

Des études récentes ont montré que l'apprentissage par renforcement induit une plasticité importante dans M1 et que cette région cérébrale est utilisée dans la réduction de la variabilité et l'augmentation de la précision. Cela peut être lié aux connexions entre les noyaux gris centraux et le cortex moteur primaire (Leech et al., 2022).

3 L'interaction entre l'apprentissage basé sur l'erreur et l'apprentissage par renforcement

En laboratoire, le plus souvent les études considèrent séparément l'apprentissage basé sur l'erreur et l'apprentissage par renforcement. Or, dans le monde réel, ces deux types d'apprentissages ont souvent tendance à se produire simultanément (Nardi et al., 2024)

Les joueurs de billard, par exemple, ajustent leur prochain coup en fonction de la différence entre leur objectif et le résultat réel, en utilisant l'apprentissage basé sur l'erreur. De même, si leur coup est réussi, ils auront tendance à répéter la même action et utiliseront dès lors l'apprentissage par renforcement.

Dans l'étude de Nardi et ses collègues (2024), les résultats montrent des différences significatives entre les deux méthodes d'apprentissage et l'utilisation exclusive d'un retour visuel d'erreur ou de récompense n'est pas suffisante pour induire un apprentissage optimal et persistant au cours du temps.

En effet, l'apprentissage basé sur l'erreur est plus rapidement mis en place que l'apprentissage par renforcement mais la performance diminue au cours du temps tandis qu'elle continue de s'améliorer pour les deux types d'apprentissage (Nardi et al., 2024).

En clinique, lorsque l'apprentissage par récompense est présenté seul, le mouvement est effectué de manière lente et inefficace. En effet, sans retour sensoriel, les participants n'ont aucune idée de ce qu'ils doivent faire pour réussir leur mouvement et ils doivent donc essayer de nombreuses choses différentes afin de réussir leur tâche.

Une interaction entre l'apprentissage basé sur l'erreur et l'apprentissage basé sur la récompense est donc hautement probable.

L'étude de Truong et ses collègues (2023) a montré les avantages des apprentissages combinés pour les participants du groupe mixte, c'est-à-dire une amélioration rapide de la performance directement après l'entraînement (quatorze/quinze participants) suivi d'une consolidation de la précision. Entre le jour même de l'entraînement, et le

septième jour, onze participants sur quinze ont maintenu ou augmenté leur précision (Figure 13).

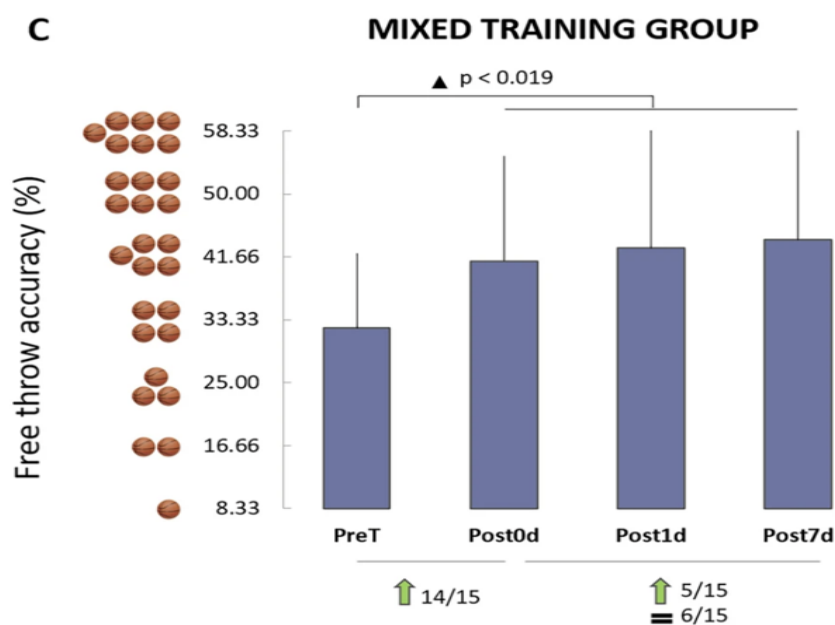


Fig.13 Valeurs moyennes de précision du lancer pour le groupe mixte. (Truong et al., 2023).

Chez les participants du groupe témoin, aucune amélioration de la précision ni de consolidation de la précision à long terme n'a été observée (Figure 14).

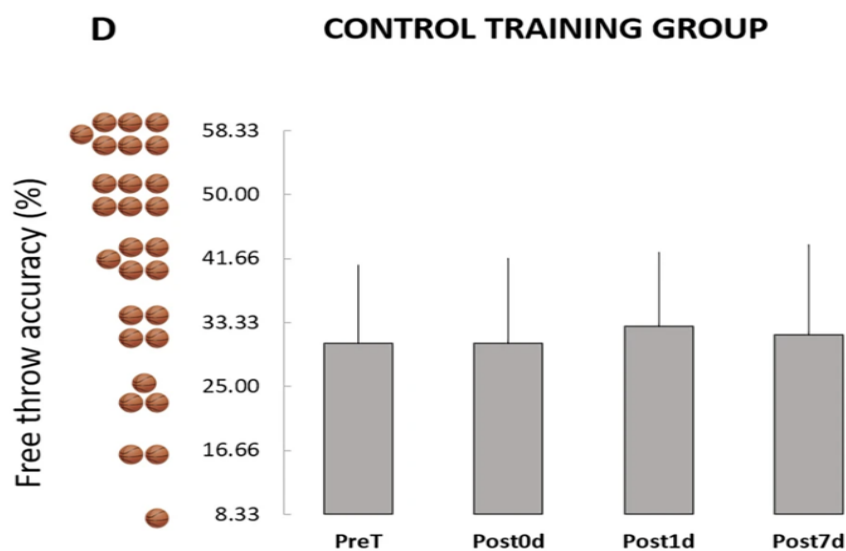


Fig.14 Valeurs moyennes de précision du lancer pour le groupe témoin. (Truong et al., 2023).

La combinaison des deux méthodes d'apprentissage basé sur l'erreur et basé sur le renforcement permet d'améliorer la performance très rapidement et de maintenir cette performance au cours du temps.

En résumé, la précision du lancer était supérieure chez les participants du groupe avec un retour sensoriel par rapport à ceux du groupe qui ne recevaient pas de retour sensoriel.

De plus, la précision du lancer était supérieure chez les participants du groupe qui recevaient un retour de récompense par rapport à ceux du groupe qui ne recevaient pas de feedback de récompense.

Les résultats de cette étude montrent également qu'il y a un résultat immédiat (seulement après quelques essais) mais qui ne persiste pas à long terme lors de l'apprentissage basé sur l'erreur alors qu'il y a un résultat moins rapidement mis en place lors de l'apprentissage basé sur le renforcement.

Néanmoins, lors de l'apprentissage basé sur la récompense (renforcement), il y a une rétention de la mémoire à long terme.

Le groupe mixte combinait les avantages de l'apprentissage par erreurs et par renforcement avec un apprentissage immédiat et une forte consolidation à long terme.

Ce qui amène à conclure qu'une combinaison des deux apprentissages est intéressante lors de l'apprentissage d'un nouveau mouvement.

Prenons l'exemple d'un patient, qui à la suite de son AVC, a une douleur au niveau de l'épaule. Il a pour objectif d'atteindre sa tête sans douleur. Pour cela, il devra placer des objets avec des poids différents sur une étagère en essayant de ne pas provoquer de douleur au niveau de son épaule. Il utilisera dès lors à la fois l'apprentissage par renforcement et l'apprentissage basé sur l'erreur. En effet, si le patient envisage qu'atteindre sa tête sans douleur est une réussite, il entrainera dès lors un apprentissage par renforcement. De plus, le fait de répéter le placement d'objets avec différents poids sur l'étagère induira des erreurs de prédictions sensorielles et cela favorisera le mouvement sans douleur (Leech et al., 2022).

La Figure 15 reprend les différences et les similitudes entre l'apprentissage basé sur l'erreur et l'apprentissage par renforcement selon différents critères examinés ci-avant.

	Apprentissage basé sur l'erreur	Apprentissage par renforcement
Zones cérébrales associées	Cervelet LTM Cortex frontal Cortex pariétal	Ganglions de la base LTM M1
Echelle temporelle	Forte activation au début de l'apprentissage, faible activation à la fin de l'apprentissage	Faible activation au début de l'apprentissage, forte activation à la fin de l'apprentissage (consolidation)
Performance	Rapide à mettre en place	Lente
Retour	Sensoriel	Binaire
Composantes	Implicite Explicite	Implicite Explicite ?

Fig.15 : Tableau synthèse des similitudes et des différences entre deux différentes catégories d'apprentissage moteur chez les sujets sains. L'efficacité de l'apprentissage basé sur l'erreur est importante au début de l'apprentissage et diminue par la suite. L'apprentissage basé sur l'erreur peut se mettre en place très rapidement, déjà après une seule répétition. Il est basé sur un retour sensoriel qui peut être visuel, auditif ou proprioceptif. Il se produit automatiquement et implicitement. Il dépend principalement du cervelet mais d'autres régions cérébrales sont impliquées comme le cortex temporal (LTM), le cortex pariétal et le cortex frontal. L'apprentissage par renforcement met plus de temps à se mettre en place mais persiste sur le long terme. Il est basé sur un retour binaire. Il se produit implicitement et des études récentes suggèrent qu'il se produirait de manière explicite. Il dépend principalement des ganglions de la base mais le LTM et également le cortex moteur primaire (M1) y contribuent également ; Adapté selon (Spampinato & Celnik, 2021).

4 L'apprentissage moteur après un AVC

De nos jours, l'étude de l'apprentissage moteur à la suite d'un AVC reste peu rapportée. De fait, la plupart des études réalisées chez les patients ayant subi un AVC se sont concentrées sur la récupération motrice et le contrôle moteur (Moore et al., 2022).

Comme décrit précédemment dans ce mémoire, différents types d'apprentissage moteur ont été identifiés, et ceux-ci semblent pouvoir être impliqués différemment en fonction de la localisation de la lésion suite à l'AVC (Krakauer, 2006).

Il peut être difficile de démontrer un déficit d'apprentissage chez les patients lorsque les performances sont déjà détériorées au départ (Krakauer, 2006). Ces différents éléments rendent l'étude de l'apprentissage moteur post-AVC complexe.

Plusieurs études suggèrent que l'apprentissage moteur est tout de même possible après un AVC et qu'il s'agit d'une partie clé de la rééducation pour reconfigurer le réseau neuronal résiduel (Krakauer, 2006).

Après avoir décrit les études concernant *l'apprentissage basé sur l'erreur et l'apprentissage par renforcement* chez le sujet sain, nous allons nous concentrer sur ces deux types d'apprentissage qui sont les plus utilisés en rééducation, chez les patients après un AVC. Ces apprentissages contiennent une composante implicite ce qui peut faciliter la rééducation post AVC même en présence de troubles cognitifs suite à l'AVC. (Krakauer, 2006).

4.1 Comparaison de l'apprentissage moteur entre sujets sains et patients après un AVC

Moore et ses collègues (2022) ont réalisé une expérience sur des sujets sains et des patients avec un AVC subaigu ou chronique (inclusion entre 14 jours et quatre ans après leur AVC, médiane = cinquante-trois jours).

Les individus avaient le bras contralésionnel (pour les patients avec un AVC) et le bras dominant (pour les sujets sains) placé dans un exosquelette et devaient déplacer un curseur blanc entre deux cibles. (**Figure 16**)

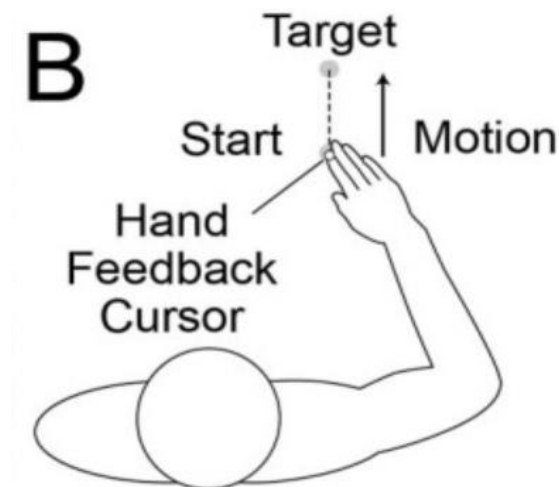


Fig.16 : Disposition de l'expérience : Les participants devaient déplacer un petit curseur blanc entre deux cibles en face d'eux. Chaque essai a commencé avec le curseur ramené à une position centrale. Après une courte période d'attente, une cible est apparue devant eux à 10 cm. Une fois la cible atteinte, ils ont maintenu le curseur dessus pendant un bref instant.

Les participants devaient atteindre la cible (Baseline) initialement en ligne droite. Ensuite, le mouvement de la main vers l'avant a entraîné une déviation du curseur vers la gauche (Rotation visuomotrice = perturbation). Les participants ont dû corriger leur déviation vers la droite pour ramener le curseur sur la cible (Adaptation).

Tout d'abord, lors de la phase de référence (Baseline), ils ont effectué vingt-cinq mouvements sans adaptation particulière. Ensuite, la position du curseur a été déviée vers la gauche par rapport à sa position de départ (Perturbation) et les participants étaient soumis à cette modification pendant cent vingt-cinq mouvements.

Pour finir, lors de la phase finale (Washout), la perturbation a été supprimée de manière inattendue et les individus ont dû se débarrasser de l'adaptation acquise précédemment pendant vingt-cinq mouvements. (**Figure 17**)

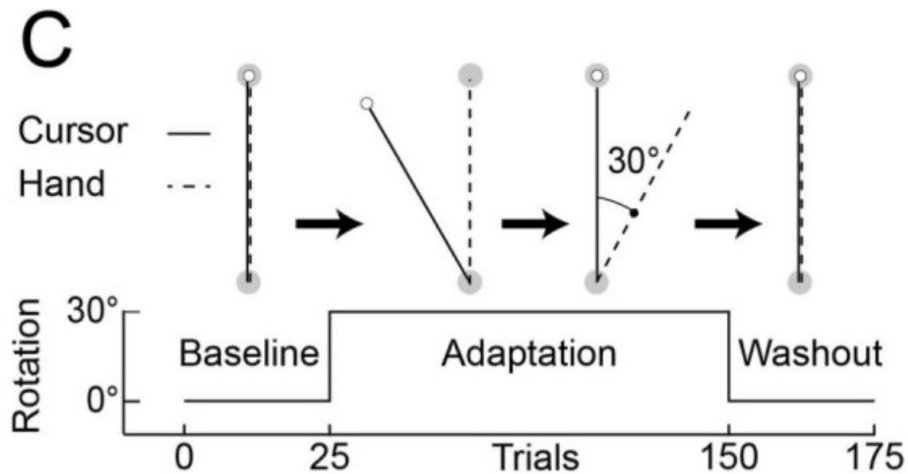


Fig.17 : Protocole expérimental. Les participants ont commencé par 25 essais (Baseline), suivis de 125 essais d'adaptation avec une perturbation visuo-motrice de 30° dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, puis enfin 25 essais pour supprimer l'adaptation acquise précédemment (Washout) (Moore et al., 2022).

Comme le montre **La Figure 18**, les chercheurs constatent que lors du **premier** essai d'adaptation, les trois participants ont directement atteint la cible.

Dans l'adaptation **initiale**, le participant du groupe témoin a mieux ajusté sa direction vers la cible que les patients représentatifs ayant subi un AVC.

Malgré un handicap moteur léger, l'un des participants représentatifs ayant subi un AVC a présenté une adaptation incomplète.

En revanche, un autre participant représentatif ayant une déficience motrice modérée a réussi à s'adapter à un niveau comparable à celui du participant du groupe témoin qui était presque complète (adaptation **finale**).

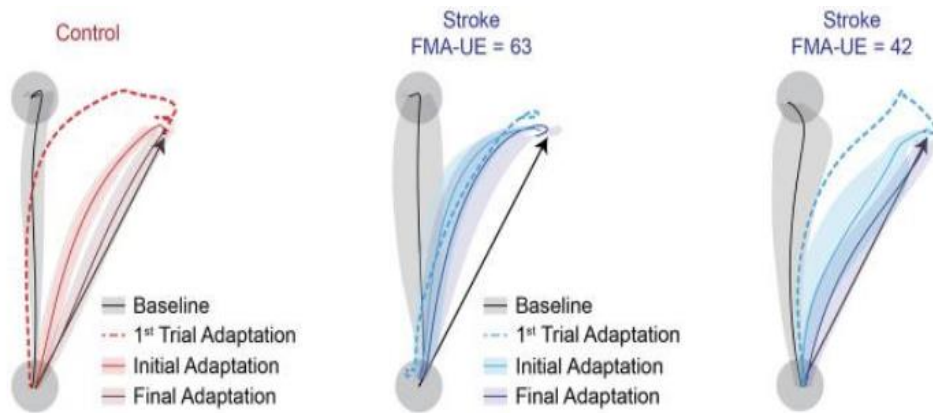


Fig.18 : Trajectoires de la main chez les patients sains et chez les patients ayant subi un AVC. Trois participants sont comparés : un participant du groupe contrôle, un participant avec une déficience motrice légère et une adaptation faible et un participant avec une déficience modérée mais une bonne adaptation (Moore et al., 2022).

Pour conclure, les résultats de cette expérience montrent une réduction significative de l'adaptation initiale chez les patients AVC mais les capacités motrices n'étaient pas assez mauvaises pour être classées comme altérées.

Cependant, l'adaptation **après** une rotation visuomotrice est réduite chez les individus souffrant d'un AVC par rapport aux individus sains mais ils arrivent tout de même à compenser.

Les participants ayant subi un AVC ont nécessité plus de répétitions pour s'adapter par rapport aux participants du groupe contrôle. Près de la moitié des participants AVC n'ont pas atteint des niveaux d'adaptation normaux après les cent vingt-cinq mouvements dans la phase d'adaptation. Cela soulève des questions importantes sur la planification de la rééducation post-AVC, suggérant que connaître le nombre d'essais nécessaires pour chaque individu peut aider à personnaliser la rééducation.

Meehan et ses collègues (2011) ont également mené une étude sur des sujets sains et des sujets ayant subi un AVC ischémique droit au stade chronique (12 mois post-AVC).

Dans cette étude, les participants devaient manipuler un joystick et effectuer un suivi continu le long d'une forme d'onde sinusoïdale. Les sujets AVC réalisaient la tâche avec le bras parétique (gauche) tandis que les sujets sains utilisaient leur bras dominant.

Les participants devaient effectuer à la fois des séquences aléatoires et répétées. Ils ont effectué un total de dix essais de deux cent cinquante répétitions avec deux niveaux de suivis moteurs (séquences aléatoires et répétées) sur une durée de six jours.

L'exécution de séquences à la fois aléatoires et répétées ont permis de prendre en compte deux types de résultats différents.

En effet, une amélioration dans les séquences aléatoires reflète une amélioration du contrôle moteur général tandis que l'amélioration au cours des séquences répétées prend en compte l'amélioration de l'apprentissage moteur implicite qui est la capacité d'acquérir des compétences par la pratique sans se souvenir consciemment des éléments de performance améliorés.

Les participants n'étaient pas informés de l'existence de la séquence répétitive et devaient suivre la cible aussi précisément que possible chaque jour, en contrôlant la position du curseur à l'aide du joystick.

La performance motrice a été évaluée au début de la pratique (jour 1), tout au long de la pratique (jours 2 à 6), et en fin d'expérience (jour 7) (**Figure 19**).

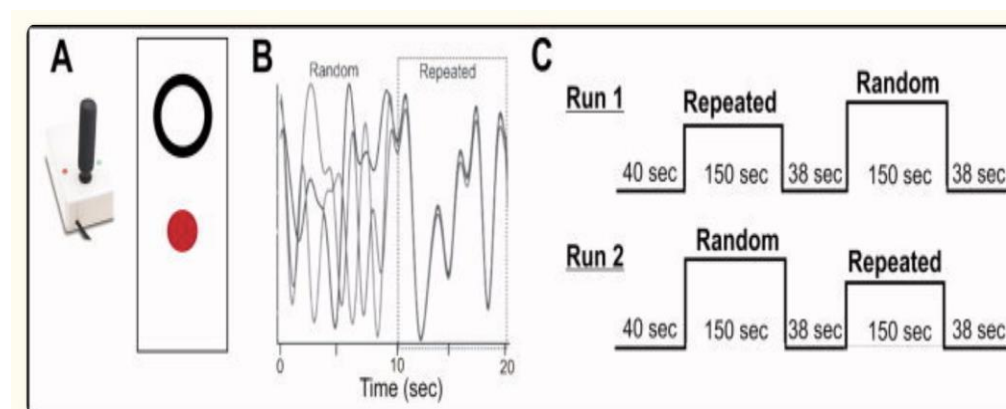


Fig.19 Protocole de l'expérience (A) Représentation de la cible et de la position des participants ainsi que du joystick utilisé par les participants lors de la tâche. (B) Exemples de séquences de suivi aléatoires et répétées qui comprenaient les blocs de 20 s au cours des jours 2 à 6. (C) Un exemple de l'évolution temporelle de la tâche comportementale lors de l'acquisition les jours 1 et 7. Pour les premiers tests de pratique et de rétention, les séquences aléatoires et répétées ont été présentées dans des blocs séparés de 150 s.

Comme le montre la **Figure 20**, le premier jour, les sujets du groupe AVC avaient plus de difficulté avec la tâche que les sujets sains quel que soit le type de séquence (aléatoires/ répétées).

Entre le deuxième et le sixième jour, les sujets sains et les sujets AVC ont une capacité similaire à améliorer leur performance au fil de la pratique avec une meilleure amélioration pour la séquence répétée par rapport à la séquence aléatoire (Meehan et al., 2011). Cependant, les patients AVC montrent tout de même des erreurs de suivi plus fréquentes par rapport au groupe contrôle. (Meehan et al., 2011).

En conclusion, les deux groupes ont montré une amélioration significative de l'apprentissage moteur avec un meilleur résultat pour les séquences répétées par rapport aux séquences aléatoires et avec un taux d'erreur plus élevé chez les individus ayant subi un AVC par rapport aux individus sains.

Cela signifie que la capacité d'acquérir de nouvelles capacités motrices n'est pas tout à fait abolie chez les patients AVC mais mettrait plus de temps à se mettre en place.

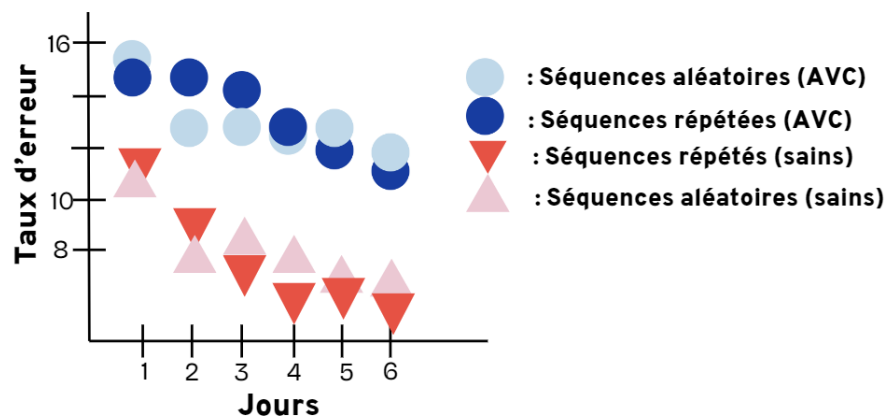


Fig.20 : Suivi des performances chez les sujets sains et chez les patients ayant subi un AVC. Les performances ont été évalués au début de la pratique (jour 1), en cours de l'apprentissage (jour 2 à 6) et lors de la fin de l'expérience (jour 7) pour les séquences aléatoires et répétées. Adapté selon (Meehan et al., 2011).

4.2 Comparaison des zones cérébrales activées lors de l'apprentissage moteur chez les sujets sains et les patients après un AVC

Le schéma d'activité cérébrale varie clairement entre les sujets sains et les patients ayant subi un AVC. Les substrats neuronaux recrutés chez les individus ayant eu un AVC restent peu étudiés. Toutefois, quelques études ont été réalisées à ce sujet.

L'étude de Meehan et ses collègues (2011) révèle que chez **les sujets sains**, lors de la séquence aléatoire, il y a une activation importante du cortex préfrontal dorsolatéral (DLPFC) qui est responsable de l'attention et de la sélection de l'action et une diminution de l'activation du cortex prémoteur dorsal, responsable de la planification et de l'organisation des mouvements (PMd).

Cependant, lors de la séquence répétée, l'activation de la région DLPFC est diminuée chez les sujets sains alors que l'activation de la région du PMd augmente.

On peut en déduire que, au cours de l'apprentissage moteur chez les sujets sains, les demandes attentionnelles diminuent (réduction de l'activité du DLPFC). Après l'acquisition de la compétence, une phase plus automatique est observée, avec une activation majorée du PMd pour la séquence répétée.

Les sujets AVC chroniques n'ont pas montré la même transition d'activation du DLPFC vers le PMd, contrairement aux individus sains. En effet, ils ont une activation importante des zones préfrontales tout au long de l'apprentissage quel que soit le type de séquence (**Figure 21**).

La différence d'activation des zones cérébrales par rapport aux individus sains peut s'expliquer par le fait que les personnes ayant subi une lésion cérébrale requièrent plus d'attention lors de l'apprentissage d'une nouvelle tâche.

Il se peut également que les patients AVC aient un recrutement cérébral différent des individus sains en raison de la localisation de la lésion ou à cause de l'altération du traitement sensorimoteur de l'information (Meehan et al., 2011).

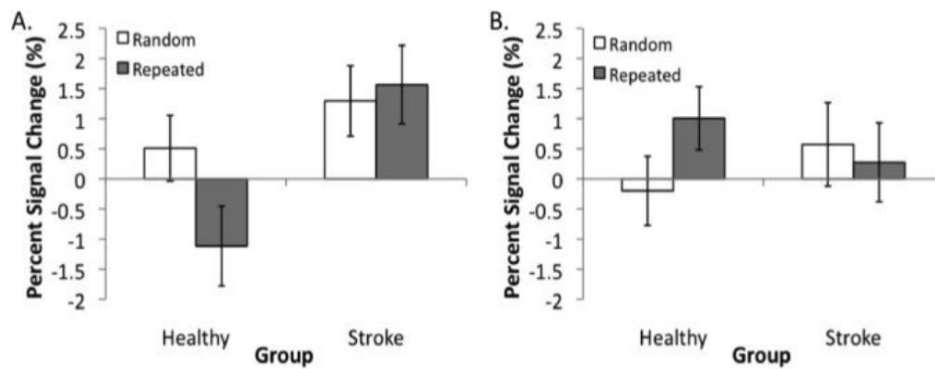


Fig.21 Différences d'activation du cortex préfrontal dorsolatéral gauche (DLPFC) et du cortex prémoteur gauche (PMd) entre les sujets sains et les patients AVC lors des séquences répétées et aléatoires. *En ce qui concerne le DLPFC chez les sujets sains, il y a une réponse BOLD (=réponse dépendante du niveau d'oxygénation sanguine) positive pour les séquences aléatoires mais une réponse BOLD négative pour les séquences répétées. Ce qui signifie une augmentation de l'activité cérébrale du DLPFC pour les séquences aléatoires et une diminution de cette activité pour les séquences répétées. Pour le DLPFC chez les sujets AVC, il n'y a aucune différence significative entre les réponses BOLD pour les séquences aléatoires et répétées. En effet, les réponses sont positives pour les deux types de séquences. Pour le PMd chez les sujets sains, la réponse BOLD est négative pour les séquences aléatoires mais on retrouve une réponse BOLD positive pour les séquences répétées. En ce qui concerne le PMd chez les sujets AVC, l'activation cérébrale est similaire pour les séquences aléatoires et répétées. (Meehan et al., 2011).*

Cependant, d'autres réseaux neuronaux compensatoires tels que le cortex somatosensoriel primaire contralésionnel, l'insula ipsilésionnelle et le gyrus temporal moyen sont impliqués dans l'apprentissage moteur chez les patients AVC (Meehan et al., 2011).

Les noyaux gris centraux s'activent autant chez les personnes saines que chez les personnes AVC dans cette expérience et autant pour une séquence aléatoire qu'une séquence répétée. Cependant, il semble que les noyaux gris centraux soient impliqués dans la planification de l'action sur base de mouvements appris chez les personnes saines alors qu'ils jouent plutôt un rôle compensatoire chez les patients AVC (Meehan et al., 2011).

DISCUSSION

Les mécanismes qui sous-tendent l'apprentissage moteur chez les personnes ayant subi un AVC restent un sujet vague et mal compris.

Les différentes composantes de l'apprentissage moteur ne sont pas indépendantes et interagissent sans arrêt l'une avec l'autre.

Dans ce mémoire, nous nous sommes focalisés sur l'apprentissage moteur basé sur l'erreur et sur l'apprentissage moteur par renforcement.

Nous avons sélectionné ces deux méthodes d'apprentissage moteur car ce sont les plus utilisés en rééducation motrice et ces deux méthodes comprennent une composante implicite, ce qui rend leur utilisation possible même en cas de troubles cognitifs.

D'autre part, les désavantages de l'apprentissage moteur dépendant de l'utilisation comprennent la nécessité d'un grand nombre de répétitions entraînant une très longue période d'apprentissage, et la nécessité d'un engagement cognitif adéquat car il a été montré que des mouvements passifs ou trop guidés étaient inutiles pour le comportement moteur et la plasticité cérébrale.

Les inconvénients de l'apprentissage moteur par la stratégie cognitive comprennent également la nécessité d'une composante cognitive non altérée, ce qui est rarement le cas après un AVC en phase aigüe.

L'apprentissage moteur basé sur l'erreur consiste à maintenir/corriger un mouvement **déjà appris** visant à compenser ou à s'adapter à une perturbation ou un changement dans le corps. C'est un apprentissage à la fois implicite et explicite, rapide à mettre en place (déjà après une seule répétition) mais dont l'efficacité diminue avec le temps.

L'apprentissage par renforcement est la capacité d'apprendre un **nouveau** mouvement par la répétition en obtenant **une récompense** (objectif atteint avec succès). C'est un apprentissage plus lent à mettre en place (répétitions du mouvement). Cet apprentissage est à la fois implicite et explicite. En effet, des travaux récents ont

montré l'implication d'une composante explicite avec une stratégie intentionnelle d'apprendre le nouveau mouvement (Leech et al., 2022).

Les résultats des études réalisées sur les sujets sains peuvent être résumés de la façon suivante :

- 1) La performance d'une tâche motrice est meilleure en cas de retour sensoriel (visuel, auditif ou proprioceptif) sur l'échec ou la réussite de la tâche lors de l'apprentissage ou en cas de feedback de récompense par rapport à l'absence de retour.
- 2) L'apprentissage est rapide mais ne persiste pas au cours du temps lorsque l'apprentissage est basé sur l'erreur.
- 3) L'apprentissage est plus lent, progressif mais persiste au cours du temps lorsque l'apprentissage est basé sur le renforcement (la récompense).
- 4) La combinaison des deux méthodes d'apprentissage permet un apprentissage immédiat et une consolidation à long terme.

Ensuite, nous avons considéré les différentes régions cérébrales associées à ces deux types d'apprentissage.

Concernant l'apprentissage basé sur l'erreur, le cervelet est majoritairement impliqué dans ce dernier avec sa composante implicite. Le cortex cingulaire antérieur contribuerait aussi à cet apprentissage avec l'amélioration de la performance en développant une stratégie cognitive plus importante, souvent appelée composante « explicite » lors de l'apprentissage basé sur l'erreur (De Brouwer et al., 2022; Seidler et al., 2013).

L'apprentissage par renforcement implique principalement les ganglions de la base mais le cortex moteur primaire et le cortex préfrontal joueraient aussi un rôle dans cet apprentissage.

Plusieurs études suggèrent toutefois qu'une grosse partie de la rééducation dépend de l'apprentissage moteur principalement au cours de la phase subaiguë en raison du phénomène de plasticité cérébrale et qu'il serait intéressant de le combiner avec cet apprentissage (Leech et al., 2022)

Peu d'études ont été faites comparant les personnes saines et les patients avec un AVC aigu. L'hypothèse est que les processus physiologiques et la récupération spontanée dans les premiers jours suivant l'AVC pourraient entraver les résultats et rendre ces études difficiles à interpréter.

Il a toutefois été montré, en comparant l'apprentissage moteur chez les sujets sains et les patients ayant subi un AVC, que les capacités motrices du patient AVC sont perfectibles grâce à une phase d'adaptation comprenant un nombre variable selon les individus de répétitions de mouvements. En outre, les patients AVC peuvent améliorer leur performance motrice et ont même la capacité d'acquérir de nouvelles capacités motrices mais ces capacités sont plus lentes à mettre en place que chez le sujet sain et nécessitent plus d'efforts, de répétitions et d'intensité.

Des différences importantes ont été constatées concernant les zones cérébrales activées lors de l'apprentissage moteur entre les sujets sains et les patients AVC.

Ainsi, chez le sujet sain, les zones cérébrales activées lors de l'apprentissage moteur comprennent, au début de l'apprentissage d'une nouvelle tâche motrice, le cortex préfrontal dorsolatéral impliqué dans l'attention et la sélection de l'action tandis qu'après l'acquisition de la compétence, c'est le cortex prémoteur dorsal responsable de la planification et de l'organisation du mouvement qui sera activé.

En revanche, chez le patient après un AVC, l'apprentissage d'une nouvelle tâche entraînera l'activation du cortex préfrontal dorsolatéral tout au long de l'apprentissage quelle que soit la complexité de la tâche motrice.

En cas de lésion cérébrale, le patient AVC doit donc activer en permanence les zones d'attention pour apprendre une nouvelle tâche contrairement au sujet sain.

D'autres hypothèses sont également soulevées pour différencier l'apprentissage moteur chez le patient AVC par rapport au sujet sain. Il est possible que (1) l'activation d'une zone cérébrale varie selon la localisation de la lésion, que (2) d'autres réseaux neuronaux compensatoires soient impliqués dans l'apprentissage moteur du patient AVC, que (3) les noyaux gris centraux impliqués dans la planification de l'action exercent un rôle compensatoire spécifiquement chez le patient AVC.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

En conclusion, ce travail de revue narrative a identifié l'implication de l'apprentissage moteur dans la rééducation par la kinésithérapie des patients ayant subi un AVC.

Les études, peu nombreuses actuellement, sont toutefois encourageante dans le sens où elles démontrent que les patients peuvent améliorer et même acquérir de nouvelles capacités motrices, après avoir subi un AVC, grâce à des méthodes d'apprentissage moteur basées sur l'erreur et sur le renforcement.

De nombreuses perspectives sont à envisager au cours d'études ultérieures comme la comparaison des résultats de l'apprentissage moteur en fonction de :

- La région cérébrale lésée
- Le type d'AVC ischémique ou hémorragique
- La phase au cours de laquelle cet apprentissage est mis en place (phase subaiguë vs phase chronique)
- L'importance des déficiences initiales motrices/cognitives du patient

Un autre point qui me semble aussi important est de différencier la capacité motrice de la capacité d'adaptation.

Des études supplémentaires fondamentales et cliniques sont donc nécessaires pour progresser dans la connaissance de l'apprentissage moteur et de son implication clinique pour les personnes ayant eu un AVC.

BIBLIOGRAPHIE

- Albert, S. J., & Kesselring, J. (2012). Neurorehabilitation of stroke. *Journal of Neurology*, 259(5), 817-832. <https://doi.org/10.1007/s00415-011-6247-y>
- Bernhardt, J., Hayward, K. S., Kwakkel, G., Ward, N. S., Wolf, S. L., Borschmann, K., Krakauer, J. W., Boyd, L. A., Carmichael, S. T., Corbett, D., & Cramer, S. C. (2017). Agreed Definitions and a Shared Vision for New Standards in Stroke Recovery Research : The Stroke Recovery and Rehabilitation Roundtable Taskforce. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 31(9), 793-799. <https://doi.org/10.1177/1545968317732668>
- Campbell, B. C. V., De Silva, D. A., Macleod, M. R., Coutts, S. B., Schwamm, L. H., Davis, S. M., & Donnan, G. A. (2019). Ischaemic stroke. *Nature Reviews. Disease Primers*, 5(1), 70. <https://doi.org/10.1038/s41572-019-0118-8>
- De Brouwer, A. J., Areshenkoff, C. N., Rashid, M. R., Flanagan, J. R., Poppenk, J., & Gallivan, J. P. (2022). Human variation in error-based and reinforcement motor learning is associated with entorhinal volume. *Cerebral Cortex*, 32(16), 3423-3440. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhab424>
- Deroide, N., Nih, L. R., Dinh, R. Y. T., Lévy, B., & Kubis, N. (2010). [Cerebral plasticity : From bench to bedside in stroke treatment]. *La Revue De Medecine Interne*, 31(7), 486-492. <https://doi.org/10.1016/j.revmed.2009.08.014>
- Diedrichsen, J., White, O., Newman, D., & Lally, N. (2010). Use-dependent and error-based learning of motor behaviors. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 30(15), 5159-5166. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5406-09.2010>
- Doyon, J., Bellec, P., Amsel, R., Penhune, V., Monchi, O., Carrier, J., Lehericy, S., & Benali, H. (2009). Contributions of the basal ganglia and functionally related brain structures to motor learning. *Behavioural Brain Research*, 199(1), 61-75. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2008.11.012>
- Einstad, M. S., Saltvedt, I., Lydersen, S., Ursin, M. H., Munthe-Kaas, R., Ihle-Hansen, H., Knapskog, A.-B., Askim, T., Beyer, M. K., Næss, H., Seljeseth, Y. M., Ellekjær, H., & Thingstad, P. (2021). Associations between post-stroke motor and cognitive function : A cross-sectional study. *BMC Geriatrics*, 21(1), 103. <https://doi.org/10.1186/s12877-021-02055-7>
- Galea, J. M., Vazquez, A., Pasricha, N., de Xivry, J.-J. O., & Celnik, P. (2011). Dissociating the roles of the cerebellum and motor cortex during adaptive learning : The motor cortex retains what the cerebellum learns. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, 21(8), 1761-1770. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhq246>

- Goodman, G. W., Do, T. H., Tan, C., & Ritzel, R. M. (2023). Drivers of Chronic Pathology Following Ischemic Stroke : A Descriptive Review. *Cellular and Molecular Neurobiology*, 44(1), 7. <https://doi.org/10.1007/s10571-023-01437-2>
- Habas, C. (2022). Cervelet et cognition. *Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine*, 206(1), 38-49. <https://doi.org/10.1016/j.banm.2021.06.022>
- Hendricks, H. T., van Limbeek, J., Geurts, A. C., & Zwarts, M. J. (2002). Motor recovery after stroke : A systematic review of the literature. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 83(11), 1629-1637. <https://doi.org/10.1053/apmr.2002.35473>
- Hyenne, A., Jeanblanc, G., Osseby, G.-V., Giroud, M., & Combier, E. (2007). Caractérisation des différents types de prise en charge des accidents vasculaires cérébraux en France : Des unités neuro-vasculaires aux services conventionnels. *Revue Neurologique*, 163(12), 1215-1226. [https://doi.org/10.1016/S0035-3787\(07\)78406-0](https://doi.org/10.1016/S0035-3787(07)78406-0)
- Kal, E., Winters, M., van der Kamp, J., Houdijk, H., Groet, E., van Bennekom, C., & Scherder, E. (2016). Is Implicit Motor Learning Preserved after Stroke? A Systematic Review with Meta-Analysis. *PloS One*, 11(12), e0166376. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166376>
- Kouakou N'goran, Y. N., Traore, F., Tano, M., Kramoh, K. E., Kakou, J.-B. A., Konin, C., & Kakou, M. G. (2015). Aspects épidémiologiques des accidents vasculaires cérébraux (AVC) aux urgences de l'institut de cardiologie d'Abidjan (ICA). *Pan African Medical Journal*, 21. <https://doi.org/10.11604/pamj.2015.21.160.6852>
- Krakauer, J. W. (2006). Motor learning : Its relevance to stroke recovery and neurorehabilitation: *Current Opinion in Neurology*, 19(1), 84-90. <https://doi.org/10.1097/01.wco.0000200544.29915.cc>
- Langhorne, P., Coupar, F., & Pollock, A. (2009). Motor recovery after stroke : A systematic review. *The Lancet Neurology*, 8(8), 741-754. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(09\)70150-4](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(09)70150-4)
- Leech, K. A., Roemmich, R. T., Gordon, J., Reisman, D. S., & Cherry-Allen, K. M. (2022). Updates in Motor Learning : Implications for Physical Therapist Practice and Education. *Physical Therapy*, 102(1), pzab250. <https://doi.org/10.1093/ptj/pzab250>
- Marinelli, L., Quartarone, A., Hallett, M., Frazzitta, G., & Ghilardi, M. F. (2017). The many facets of motor learning and their relevance for Parkinson's disease. *Clinical Neurophysiology*, 128(7), 1127-1141. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2017.03.042>
- Meehan, S. K., Randhawa, B., Wessel, B., & Boyd, L. A. (2011). Implicit sequence-specific motor learning after subcortical stroke is associated with increased prefrontal brain activations : An fMRI Study. *Human Brain Mapping*, 32(2), 290-303. <https://doi.org/10.1002/hbm.21019>
- Monsour, M., & Borlongan, C. V. (2023). The central role of peripheral inflammation in ischemic stroke. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 43(5), 622-641. <https://doi.org/10.1177/0271678X221149509>
- Moore, R. T., Piitz, M. A., Singh, N., Dukelow, S. P., & Cluff, T. (2022). Assessing Impairments in Visuomotor Adaptation After Stroke. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 36(7), 415-425. <https://doi.org/10.1177/15459683221095166>
- Napon, C., Tougma, L., Kaboré, R., & Kaboré, J. (2013). Prognosis for motor deficits after strokes in Burkina Faso. *Médecine et Santé Tropicales*, 23(3), 320-323. <https://doi.org/10.1684/mst.2013.0232>

- Nardi, F., Faisal, A. A., & Haar, S. (2024). *Motor Learning Mechanisms are not modified by Feedback Manipulations in a Real-World Task*. <https://doi.org/10.1101/2024.04.10.588812>
- Orrell, A. J., Eves, F. F., & Masters, R. S. (2006). Motor Learning of a Dynamic Balancing Task After Stroke : Implicit Implications for Stroke Rehabilitation. *Physical Therapy*, 86(3), 369-380. <https://doi.org/10.1093/ptj/86.3.369>
- Recondo, J. de. (2004). *Sémiologie du système nerveux : Du symptôme au diagnostic* (2e éd). Flammarion médecine-sciences.
- Seidler, R. D., Kwak, Y., Fling, B. W., & Bernard, J. A. (2013). Neurocognitive Mechanisms of Error-Based Motor Learning. In M. J. Richardson, M. A. Riley, & K. Shockley (Éds.), *Progress in Motor Control* (Vol. 782, p. 39-60). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5465-6_3
- Spampinato, D., & Celnik, P. (2021). Multiple Motor Learning Processes in Humans : Defining Their Neurophysiological Bases. *The Neuroscientist*, 27(3), 246-267. <https://doi.org/10.1177/1073858420939552>
- Tatemichi, T. K., Desmond, D. W., Stern, Y., Paik, M., Sano, M., & Bagiella, E. (1994). Cognitive impairment after stroke : Frequency, patterns, and relationship to functional abilities. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 57(2), 202-207. <https://doi.org/10.1136/jnnp.57.2.202>
- Taylor, J. A., & Ivry, R. B. (2012). The role of strategies in motor learning. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1251(1), 1-12. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2011.06430.x>
- Truong, C., Ruffino, C., Crognier, A., Paizis, C., Crognier, L., & Papaxanthis, C. (2023). Error-based and reinforcement learning in basketball free throw shooting. *Scientific Reports*, 13(1), 499. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26568-2>
- Winstein, C., Lewthwaite, R., Blanton, S. R., Wolf, L. B., & Wishart, L. (2014). Infusing Motor Learning Research Into Neurorehabilitation Practice : A Historical Perspective With Case Exemplar From the Accelerated Skill Acquisition Program. *Journal of Neurologic Physical Therapy*, 38(3), 190-200. <https://doi.org/10.1097/NPT.0000000000000046>
- Wolfe, C. D. (2000). The impact of stroke. *British Medical Bulletin*, 56(2), 275-286. <https://doi.org/10.1258/0007142001903120>
- Wood, J. M., Kim, H. E., & Morton, S. M. (2023). *Reinforcement learning during locomotion*. <https://doi.org/10.1101/2023.09.13.557581>
- Yelnik, A. (2022). Récupération de la motricité après accident vasculaire cérébral. Facteurs pronostiques et rééducation. *Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine*, 206(5), 594-603. <https://doi.org/10.1016/j.banm.2022.02.016>

Résumé du mémoire

L'apprentissage moteur est un mécanisme cognitivo-moteur qui englobe l'adaptation, l'acquisition de compétences et la prise de décision basée sur l'expérience.

La plupart des activités quotidiennes étant basées sur l'apprentissage moteur, l'étude de ses mécanismes et composantes trouve son intérêt tout d'abord chez le sujet sain afin de mieux comprendre comment une nouvelle compétence motrice est apprise et encodée dans le cerveau mais également chez le patient AVC, puisqu'axer la rééducation sur l'apprentissage moteur permettrait au patient de récupérer davantage sa capacité à réaliser des activités de la vie journalière (AVJ) et d'ainsi améliorer la qualité de vie du patient.

Mon travail de revue narrative a pour but de comprendre davantage l'apprentissage moteur et de comparer les différentes capacités d'apprentissage moteur entre les sujets sains et les patients ayant subi un AVC et de relier les différences observées à des territoires cérébraux activés différemment en cas de lésion cérébrale induite par l'AVC.

