UNIVERSITE DE POITIERS
–
U. F. R. STAPS

Centre de Recherches sur la Cognition et l'Apprentissage
CNRS – UMR 6234

THESE

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE POITIERS

SPECIALITE : SCIENCES ET TECHNIQUES DES ACTIVITES PHYSIQUES ET SPORTIVES

Présentée par

Arnaud BOUTIN

CONDITIONS D'APPRENTISSAGE MOTEUR ET REPRESENTATIONS SENSORI-MOTRICES

DES MOUVEMENTS DISCRETS AUX SEQUENCES MOTRICES

Sous la direction du professeur Yannick BLANDIN

Membres du jury :

Arnaud BADETS	*Chargé de Recherches CNRS*, Université de Poitiers	Examinateur
Yannick BLANDIN	*Professeur d'Université*, Université de Poitiers	Directeur
Yann COELLO	*Professeur d'Université*, Université de Lille III	Examinateur
Aymeric GUILLOT	*Maître de Conférences (HDR)*, Université de Lyon I	Rapporteur
Bernard THON	*Professeur d'Université*, Université de Toulouse III	Rapporteur

- Soutenue le 03 Décembre 2009 -

Remerciements

Au professeur Yannick Blandin,

Pour m'avoir dirigé tout au long de ce travail de recherche, et m'avoir permis de réaliser tant d'expériences scientifiques et personnelles. Tu m'as transmis une rigueur scientifique et méthodologique qui a rendu ces années de thèse très formatrices. Je tiens également à te remercier pour m'avoir laissé une part de liberté dans ce travail, tout en étant présent lorsque j'en avais besoin. Un grand merci pour tout ce que tu as fait pour moi !

Au professeur Bernard Thon et à Aymeric Guillot,

Pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en acceptant d'en être rapporteurs.

Au professeur Yann Coello ainsi qu'à Arnaud Badets,

Pour avoir accepté de faire parti de mon jury de thèse en tant qu'examinateurs.

Aux professeurs Charles H. Shea (Texas A&M University) et Stefan Panzer (University of Leipzig),

Pour leur collaboration dans la réalisation de l'une des expériences présentées dans ce travail de thèse. Un grand merci à Stefan, Martina, Udo, Nicole et Mélanie du département « Human Movement Science » de l'Université de Leipzig, pour leur accueil chaleureux et leur gentillesse durant mon séjour.

A mes parents,

Pour m'avoir soutenu, entouré et encouragé durant toutes ces années.

A Marine,

Pour ta compréhension, ta patience et le soutien que tu m'apportes chaque jour.

– TABLE DES MATIERES –

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS **4**

PREMIERE PARTIE : CADRE THEORIQUE **6**

CHAPITRE 1 6

I. Approche théorique de l'apprentissage moteur 6

II. Planification et contrôle moteur 9

CHAPITRE 2 15

I. Interférence contextuelle 15

1. Condition de pratique 15

2. Hypothèses explicatives de l'effet d'interférence contextuelle 20

a) Hypothèse d'élaboration 20

b) Hypothèse de reconstruction 21

3. Similarité des tâches 23

II. Complexité/difficulté de la tâche et niveau d'interférence contextuelle 27

1. Quantité de pratique 28

2. Niveau d'expertise 30

3. Hypothèse de « challenge point » (Guadagnoli & Lee, 2004) 31

CHAPITRE 3 36

I. Apprentissage de séquences motrices 36

II. Représentation des séquences motrices 39

CHAPITRE 4 46

Objectifs expérimentaux 46

DEUXIEME PARTIE : PARTIE EXPERIMENTALE 48

CHAPITRE 5 48

Effet d'interférence contextuelle et apprentissage moteur : contributions des facteurs Condition de pratique, Similarité des tâches et Quantité de pratique 48

EXPERIENCE 1 50

1. Méthode 50

a) Tâche et dispositif expérimental 50
b) Groupes expérimentaux et procédure 51
c) Analyse des données 53

2. Résultats 54

a) Phase d'acquisition 54
b) Phase de rétention 57
c) Phases de transferts 57
d) Temps relatif moyen 60

3. Discussion 63

EXPERIENCE 2 65

1. Méthode 66

a) Tâche et dispositif expérimental 66
b) Groupes expérimentaux et procédure 70
c) Analyse des données 71

2. Résultats 72

a) Phases d'acquisition 72
b) Phase de rétention 76
c) Phase de transfert 76

3. Discussion 80

4. Discussion générale 82

5. Perspectives 86

CHAPITRE 6 88

Apprentissage et nature de la représentation des séquences motrices. 88

EXPERIENCE 3 88

1. Méthode 91

a) Tâche et dispositif expérimental 91
b) Groupes expérimentaux et procédure 94
c) Questionnaire post-expérimental 96
d) Analyse des données cinématiques 96

2. Résultats 96

a) Phase d'acquisition (Jour 1) 98
b) Phase d'acquisition (Jour 2) 99
c) Phases de rétention/transferts 103
d) Questionnaire post-expérimental 105

3. Discussion 105

4. Perspectives 111

TROISIEME PARTIE : DISCUSSION GENERALE 112

CHAPITRE 7 112

1. Effet d'interférence contextuelle 112

2. Représentation et apprentissage de séquences motrices 117

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 122

INDEX DES FIGURES 138

INDEX DES TABLEAUX 143

ANNEXES 144

– AVANT-PROPOS –

AVANT-PROPOS

Si des actes aussi banals tels que saisir un objet ou bien lacer ses chaussures sont quotidiennement effectués avec précision et bien souvent sans y prêter attention, ces actes moteurs acquis tout au long de notre vie découlent de processus relevant d'une grande complexité. Toutefois, force est de constater que nous avons besoin de temps pour arriver à un tel niveau de maîtrise ; l'apprentissage requiert des modifications relativement durables du comportement, sous-tendues par des modifications dans la structure et/ou dans le fonctionnement du système nerveux. Nous aborderons donc cette thématique de l'apprentissage moteur selon des approches neuropsychologique et comportementale. L'un des enjeux majeurs de ce travail de thèse sera d'aborder les processus qui sous-tendent l'apprentissage de nouveaux comportements moteurs, ainsi que nos capacités à adapter notre comportement à une nouvelle situation.

D'un point de vue général, les recherches sur l'apprentissage reposent sur des protocoles expérimentaux particuliers, naturellement coûteux en temps (i. e., plusieurs jours), ce qui explique leur relative rareté dans la littérature scientifique. De fait, nous nous sommes intéressés aux questions fondamentales relatives à l'apprentissage moteur : quels sont les processus sous-jacents à l'apprentissage moteur ? Comment apprenons-nous à contrôler nos mouvements et à en acquérir de nouveaux ? Quels facteurs peuvent influencer l'apprentissage ?

De par la relative diversité de nos mouvements quotidiens, nous avons envisagé d'étudier l'apprentissage moteur sur la base du système de classification des habiletés proposé par Schmidt (1988). Cette classification repose sur des critères de continuité, opposant un comportement moteur au déroulement continu à une action brève. A une extrémité de ce continuum se trouvent les habiletés dites *discrètes*, définies comme « des mouvements de courte durée qui ont généralement un début et une fin bien identifiables » (e. g., lancer une fléchette) ; à l'autre extrémité de la dimension se trouvent les habiletés dites *continues*, pour lesquelles « on ne peut pas identifier de façon précise et objective le début et la fin du mouvement » (e. g., courir) ; les habiletés dites *sérielles* étant définies comme « un groupe d'habiletés discrètes enchaînées les unes après les autres, pour former une action nouvelle, plus compliquée » (e. g., jouer du piano). Au vu de ce système de classification, diverses tâches expérimentales peuvent être utilisées pour évaluer spécifiquement l'apprentissage de mouvements discrets, sériels et/ou continus.

Toutefois, la plupart de nos gestes supposent la mobilisation et la coordination de plusieurs membres ou plusieurs articulations. L'étude de la motricité dans sa globalité s'avère donc particulièrement compliquée car elle implique la prise en compte de multiples contraintes mécaniques (e. g., trajectoire du mouvement, contraintes biomécaniques, etc.) et physiologiques (e. g., contraintes musculaires, coordination des différents segments corporels, etc.) liées à la réalisation même du mouvement. Chaque individu étant par ailleurs unique, avec ses propres caractéristiques morphologiques, expériences et aptitudes à apprendre une nouvelle tâche motrice, nous devons nous résoudre à réduire le nombre de paramètres utiles à la description du mouvement et des variables caractérisant les individus. L'analyse de mouvements de bras, initialement utilisée par Woodworth (1899), apparaît pour cela moins complexe que l'analyse des mouvements de tous les segments corporels ; sachant par ailleurs qu'un mouvement de pointage vers une cible visuelle semble être sous-tendu par des processus de transformations sensori-motrices similaires à de nombreux mouvements spatialement orientés (Paillard, 1996).

L'objectif général qui a motivé ce travail de thèse est d'apporter des éléments nouveaux sur la compréhension des processus cognitifs impliqués dans l'apprentissage moteur, et sur la capacité des individus à s'adapter à un nouveau contexte ou à une nouvelle tâche. Ce manuscrit est articlé en trois grandes parties. Dans la première partie (Chapitres 1 à 4), il s'agira de passer en revue la littérature sur l'apprentissage moteur et sur la nature des représentations sensori-motrices, en s'intéressant plus particulièrement aux variables d'apprentissage susceptibles d'influencer l'acquisition d'un geste discret et/ou continu. La seconde partie (Chapitres 5 et 6) suivra naturellement par une série de trois expériences où nous avons utilisé des dispositifs expérimentaux particuliers, permettant une analyse de mouvements discrets et continus. Enfin, le chapitre final (Chapitre 7) de ce manuscrit fera la synthèse des résultats obtenus qui aboutiront sur des réflexions au regard des données et modèles théoriques préexistants, et envisageant des perspectives de recherches.

– PREMIERE PARTIE –

CADRE THEORIQUE

CHAPITRE 1

I. Approche théorique de l'apprentissage moteur :

Les premières définitions ont décrit l'*apprentissage moteur* comme « un processus interne qui se déroule dans le système nerveux de celui qui apprend et qui lui permet, de façon rapide et durable de changer de comportement dans une tâche vis-à-vis de laquelle il n'a pas de comportement adapté » (Guthrie, 1935). En d'autres termes, l'apprentissage n'est pas la modification comportementale elle-même, mais le processus interne qui l'a permise et dont elle constitue l'indice (Delignières, 1991) : « l'apprentissage est le processus neurologique interne supposé intervenir à chaque fois que se manifeste un changement qui n'est dû ni à la croissance, ni à la fatigue » (Fleischman, 1967). Nombreuses sont les définitions qui ont abondé dans ce sens. Néanmoins, ce courant de pensées considérant le processus d'apprentissage comme un processus unique a quelque peu évolué par la suite, et notamment depuis l'apparition de la psychologie cognitive. Les recherches dans ce domaine se sont davantage centrées sur les processus mentaux responsables de l'apprentissage ; loin d'être un simple processus unique, l'apprentissage résulterait d'un ensemble de processus différents conduisant à une transformation interne de l'individu. Les processus d'apprentissage ainsi considérés, l'apprentissage moteur pouvait alors être défini comme « un ensemble de processus associés à la pratique, qui aboutissent à des changements relativement permanents de la capacité à la performance » (Schmidt & Lee, 1999). Cette définition met l'accent sur les déterminants de cette capacité, qui supportent ou sous-tendent la performance, et sur le fait que l'apprentissage ne se réduit pas à l'amélioration de la performance. Par conséquent, les facteurs qui n'ont qu'un effet temporaire sur la performance (comme par exemple la fatigue ou la motivation) tendent à être confondus avec les facteurs qui affectent cette capacité sous-jacente (comme par exemple la quantité de pratique). L'étude de l'apprentissage requiert donc la création de dispositifs d'évaluations comportementales qui permettront d'objectiver les changements comportementaux temporaires et durables. Il va falloir pour cela inférer l'existence de ces processus d'apprentissage sur la base d'une mesure indirecte : la réponse motrice. C'est donc en contrôlant les conditions dans lesquelles se fait la pratique et en mesurant les changements de comportement que l'on va pouvoir inférer les processus responsables de ces changements. Néanmoins, pour dissocier les changements comportementaux temporaires et durables, l'évaluation de l'apprentissage ne se limite pas à la

simple observation des performances réalisées au cours de la phase de pratique (phase d'acquisition). En effet, l'observation de modifications relativement durables du comportement requiert l'utilisation de tests de rétention/transfert. Le test de rétention a pour principal objectif de dissocier les changements comportementaux temporaires et permanents présents lors des derniers essais de la phase de pratique. Ce test permet donc dans un premier temps d'évaluer la persistance de l'amélioration de la performance, et dans un second temps de discerner les facteurs qui influencent l'apprentissage de ceux qui n'ont une influence que lors de la phase d'acquisition tels que la fatigue ou la motivation. En ce qui concerne le test de transfert, il correspond à la pratique d'une nouvelle tâche, relativement différente de celle(s) pratiquée(s) lors de la phase d'acquisition. Ce test permet donc de mesurer l'adaptabilité, ou la généralisation, de l'apprentissage dans un autre contexte, ou pour une nouvelle tâche. Le transfert d'apprentissage peut être positif ou négatif, selon qu'il facilite ou détériore la performance sur une nouvelle tâche.

Outre l'étude comportementale, les neurosciences cognitives ont également un rôle grandissant et complémentaire à jouer dans l'étude des processus cognitifs liés à l'apprentissage moteur. En effet, ce changement relativement permanent du comportement doit, d'une manière ou d'une autre, être sous-tendu par une modification dans la structure ou dans le fonctionnement du système nerveux. Le développement de techniques d'imagerie élaborées (EEG, MEG, TEP, IRMf[1]) a permis d'étudier en temps réel l'activité cérébrale de sujets réalisant différents types de tâches à caractère cognitif. Les données issues de ces études d'imagerie cérébrale permettent une caractérisation neuroanatomique de ces processus d'apprentissage moteur (e. g., Doyon, Song, Karni, Lalonde, Adams & Ungerleider, 2002 ; Laforce & Doyon, 2002).

Dans la prochaine section de ce chapitre, nous allons donc considérer comment, d'un point de vue comportemental et neuropsychologique, peuvent être appréhendés les processus sous-tendant la réalisation et le contrôle du mouvement. L'un des principaux objectifs de ce de travail de thèse était d'identifier les diverses opérations mentales qui sont nécessaires à l'accomplissement de tâches motrices volontaires ; il convient pour cela de s'intéresser à la performance – le comportement observable – mais également d'identifier les processus qui

[1] EEG : Electro-encéphalographie.
MEG : Magnéto-encéphalographie.
TEP : Tomographie par émission de positons.
IRMf : Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle.

sous-tendent cette performance. L'identification et la compréhension des processus cognitifs impliqués dans l'apprentissage moteur requièrent l'étude des processus de planification et de contrôle du mouvement. Cependant, pour mieux définir le cadre de référence de ce travail de thèse, nous n'aborderons pas l'influence des mécanismes de traitement de l'information et d'intégration sensorielle (vision, proprioception, etc.) sur le contrôle moteur.

II. Planification et contrôle moteur :

Les théories de l'apprentissage reposent sur le concept de programmation motrice dans lequel le programme moteur est une notion clef. Le concept de « programme moteur », initialement introduit par Keele (1968) comme « un groupe de commandes musculaires qui sont structurées avant que le mouvement commence et qui autorise le déroulement du geste sans aucune influence des retours sensoriels », permet de fournir une explication à la capacité d'un individu à planifier des mouvements avant même leurs initiations. Autrement dit, le programme moteur permettrait à l'apprenant de planifier son mouvement à l'avance pour ensuite l'exécuter sans interruption, sans retour d'informations (feedback). Ce concept de programme moteur fournit une réponse à la possibilité de produire des mouvements de type « balistiques » ou « rapides », c'est-à-dire lorsque la durée du mouvement est trop courte pour que les retours d'informations sensorielles puissent influencer le mouvement en cours d'exécution. Le programme moteur est donc constitué avant l'initiation du geste et conduit à un mode de contrôle dit « en boucle ouverte » par opposition à un mode de contrôle dit « en boucle fermée» qui implique l'utilisation de retours d'informations sensorielles pendant l'exécution du mouvement ; nous allons détailler ces deux modes de contrôle du mouvement volontaire.

Théorie d'Adams (1971). La théorie d'Adams (1971) propose un fonctionnement du système nerveux en boucle fermée, où les retours d'informations jouent un rôle essentiel dans l'apprentissage de mouvements « lents » ; l'apprenant doit avoir accès à des retours d'informations sur l'action en cours pour progresser. Ces retours d'informations peuvent être d'origine sensorielle (vision, proprioception, etc.) ou non (connaissance du résultat, connaissance de la performance). Ces retours d'informations sont nécessaires car ils permettent à l'apprenant de constituer une image de référence, une « trace perceptive », qui lui permettrait d'évaluer alors l'exactitude du mouvement en cours pour pouvoir ensuite la comparer aux retours d'informations produits par la réponse. Cette notion de trace perceptive proposée par Adams renvoie au fait que chaque mouvement laisserait une trace en mémoire après son exécution, et qu'au cours de répétitions successives cette trace se renforcerait, s'affinerait et se stabiliserait sous l'action de la pratique. Néanmoins, la théorie d'Adams a soulevé un certain nombre de questions : qu'arrive t'il pour un mouvement réalisé pour la première fois ? Comment la trace perceptive fait-elle pour se stabiliser au cours des premiers essais ? Comment un individu peut-il apprendre simultanément plusieurs mouvements ?

Qu'en est-il pour les mouvements rapides ou balistiques ? Si la notion de « trace perceptive » renvoie directement à la notion d'apprentissage, elle n'apporte cependant aucune suggestion théorique concernant les capacités de transfert d'apprentissage, c'est-à-dire sur la capacité de l'apprenant à adapter la « trace perceptive » spécifique à la tâche apprise dans un autre contexte, ou pour réaliser une nouvelle tâche.

Théorie de Schmidt (1975). Les critiques formulées à l'encontre de la théorie d'Adams ont conduit Schmidt (1975) à proposer la « théorie des schémas[2] », faisant ainsi évoluer la notion de programme moteur déterminant tous les aspects d'une réponse spécifique vers celle de « programme moteur généralisé » (PMG), déterminant les aspects communs et invariants d'une classe d'actions. Une classe d'actions désigne un ensemble de mouvements qui partagent un patron commun de mouvement, c'est-à-dire des caractéristiques générales et abstraites qui ne changent pas lorsque le mouvement est répété à plusieurs reprises ou dans des contextes différents, et qui sont communes à tous les mouvements de la même catégorie. Le PMG étant considéré comme une structure comprenant des propriétés invariantes du geste (e. g., temps, vitesse, force relative) et un certain nombre de paramètres spécifiant la manière dont le programme doit être exécuté (e. g., temps, vitesse, force totale), la production d'un mouvement se produit alors en deux temps : sélection du PMG approprié au but, puis spécification des paramètres du mouvement.

Par ailleurs, comme le souligne Schmidt (1982), le modèle « mass-spring » (ou « point d'équilibre » ; Asatryan & Feldman, 1965 ; Feldman, 1966 ; 1986) constitue une alternative intéressante au modèle de contrôle en boucle fermée (Adams, 1971) en ce sens qu'une position finale du mouvement peut ainsi être atteinte indépendamment de toute régulation, par simple spécification d'un point d'équilibre. Ce modèle suggère que le paramètre critique à définir dans le programme moteur est constitué par l'état final du mouvement considéré

[2] La théorie des schémas fait appel à deux types de mémoires : le *schéma de rappel* et le *schéma de reconnaissance*. En proposant le schéma de rappel, Schmidt suggère qu'en gardant en mémoire les caractéristiques paramétriques des réponses passées, l'apprenant pourrait utiliser ce type de représentations pour en extraire une règle qui unit les paramètres du mouvement à la performance motrice. Le schéma de rappel permettrait donc l'élaboration du geste dans son ensemble si ce dernier est balistique. Par contre, si le mouvement à réaliser est lent, et permet l'utilisation des retours d'informations en cours d'exécution, le schéma de rappel ne permettra que l'initiation du geste et l'atteinte du but de la tâche se fera alors par l'intervention du schéma de reconnaissance. En présence de retours sensoriels, ce schéma serait utile pour comparer les retours sensoriels du mouvement attendu avec ceux issus du mouvement effectué. Cette comparaison produit un signal d'erreur qui permettrait la mise à jour des schémas. Alors que les mouvements balistiques n'utiliseraient que le schéma de rappel, les mouvements lents nécessiteraient la présence des deux schémas.

comme point d'équilibre entre les muscles agonistes et les antagonistes ; ce point d'équilibre terminal du mouvement est déterminé par les niveaux d'activation respectifs des muscles agonistes et antagonistes, indépendamment de la position initiale du membre au départ du mouvement. Ce modèle permet en autres d'expliquer la possibilité de parvenir à une position terminale correcte malgré une perturbation transitoire du mouvement (Bizzi, Polit & Morasso, 1976 ; Kelso, 1977) : il suffirait simplement de connaître et de spécifier la position finale de l'effecteur.

Modèle « mass-spring » ou « point d'équilibre » (1965 ; 1966). Dans ce modèle, le fonctionnement musculaire est représenté de manière analogue au fonctionnement du système mécanique dans un rapport tension/longueur d'un ensemble de ressort, où l'on peut concevoir l'avant-bras comme un levier articulé, le coude comme un pivot, et les deux ressorts comme les groupes musculaires (i. e., fléchisseurs et extenseurs) qui agissent sur le pivot pour assurer les mouvements de flexion-extension du bras ; dans un tel système mécanique, le levier atteindrait une position finale telle que la tension soit égale pour les deux ressorts : point d'équilibre (voir Figure 1).

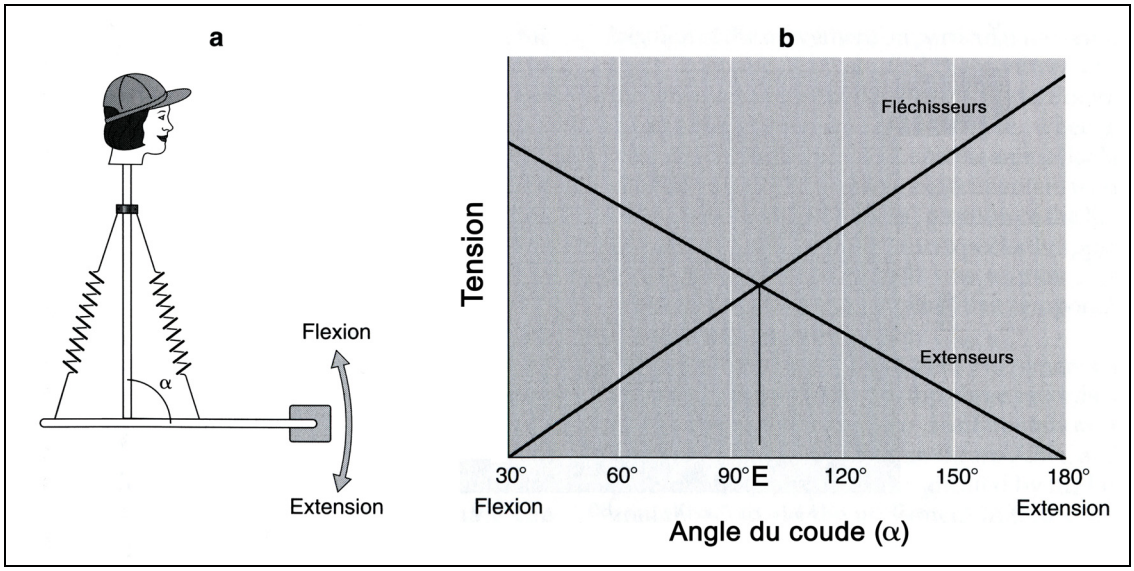


Figure 1. Modèle « mass-spring » ou « point d'équilibre » – Extrait et traduit de Schmidt et Lee (2005). Représentation schématique (a) des muscles agonistes et antagonistes dans la flexion et l'extension de l'avant-bras, et (b) des courbes tension/longueur des extenseurs et des fléchisseurs pour différentes positions angulaires du coude ; l'intersection des courbes longueur/tension des deux groupes musculaires situe le point d'équilibre E pour un angle α d'environ 90°.

Les expériences sur singes déafférentés faisant des mouvements de la tête (Bizzi, Polit & Morasso, 1976) ou des tâches de pointage (Polit & Bizzi 1979) montrent que cette hypothèse dite du « point d'équilibre » est plausible. Dans leur étude, Polit et Bizzi (1979) ont entraîné des singes désafférentés ou non, à pointer des cibles visuelles présentées aléatoirement dans l'obscurité (i. e., sans vision de leur bras). Le schéma du dispositif est illustré sur la Figure 2.

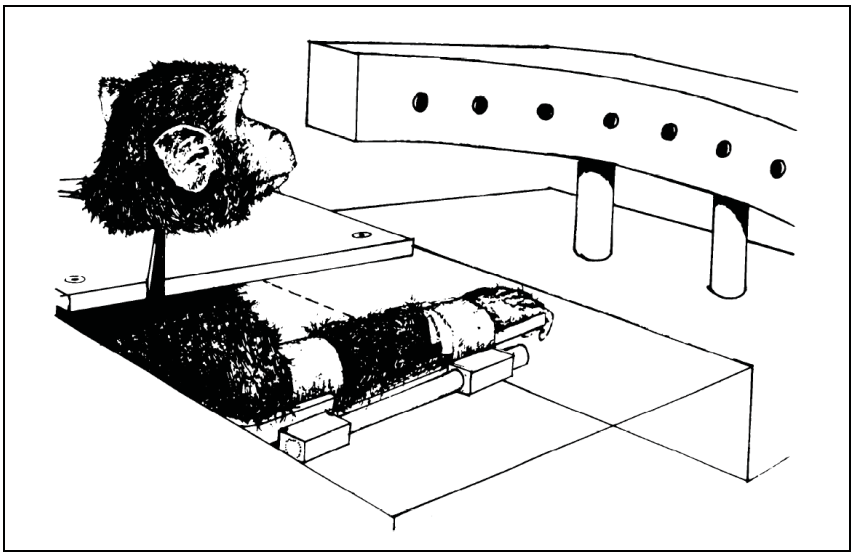


Figure 2. Dispositif expérimental utilisé dans l'étude de Polit et Bizzi (1979). Les singes devaient pointer des cibles illuminées de manière aléatoire à l'aide d'un levier attaché à leur bras (non vision du bras). Les singes étaient évalués avant et après section de la moelle épinière.

Pour certains essais, la position initiale de la main était passivement modifiée juste avant le début du mouvement. Dans d'autres cas, des charges ont été appliquées avant ou pendant la réalisation du mouvement. Les résultats n'ont révélé aucune diminution de la précision quelle que soit la perturbation appliquée et ce, même chez les singes désafférentés qui pourtant n'avaient plus de réafférences sensorielles pour détecter la perturbation : les primates pointaient au même endroit. Polit et Bizzi (1979) ont alors suggéré que les mouvements étaient définis à partir de la sélection d'un point d'équilibre au niveau des contractions musculaires. L'hypothèse avancée est que le choix du programme moteur se fait à l'avance et par la sélection d'un point d'équilibre musculaire ; ce programme serait donc indépendant de la configuration initiale du bras. La détermination ainsi réalisée de la position finale de l'effecteur ne nécessiterait donc pas de connaître la configuration initiale du système moteur.

Néanmoins, ce modèle a par la suite été quelque peu modifié en raison des nombreux travaux ayant montré que des erreurs de pointage apparaissaient en conséquence à une perturbation transitoire pendant le mouvement (e. g., Coello, Orliaguet & Prablanc, 1996 ; Lackner & DiZio, 1994 ; DiZio & Lackner, 1995) et en fonction de la position initiale de la main (e. g., Bock & Eckmiller, 1986 ; Ghilardi, Gordon & Ghez, 1995). De plus, la validité de ce modèle est limitée à l'explication du contrôle des mouvements unidirectionnels. Lorsque plusieurs degrés de liberté sont impliqués, il semblerait nécessaire de prendre en compte une série de points d'équilibre successifs correspondant à la trajectoire du mouvement ; cette modification a conduit à l'hypothèse qu'il n'y a pas spécification d'un seul point d'équilibre final mais plutôt d'une succession de points d'équilibre le long d'une trajectoire (e. g., Bizzi, Accornero, Chapple & Hogan, 1982 ; 1984 ; Flash, 1987).

Toutefois, même si ce concept de « point d'équilibre » apparaît séduisant pour l'interprétation de nombreux résultats expérimentaux, il n'en reste pas moins que notre expérience quotidienne nous suggère fortement que nous sommes plus précis lorsque nous réalisons nos mouvements en condition de vision (par rapport à l'obscurité) et donc, il peut sembler probable que des afférences visuelles par exemple, puissent contribuer au contrôle du mouvement. De même, lorsqu'un mouvement est reproduit de manière répétée, il n'est jamais produit exactement de la même manière, mais il n'est jamais totalement différent non plus. Dans une telle perspective, la « théorie des schémas » proposée par Schmidt (1975) semble pouvoir fournir quelques apports théoriques intéressants : la probabilité de réaliser de manière efficiente une nouvelle variation de tâche dépendrait de la « solidité » du schéma moteur ; cette « solidité » du schéma moteur serait fonction à la fois de la quantité et de la variabilité de la pratique (i. e., requiert la pratique de différents paramètres pour une classe d'actions gouvernées par un même PMG). Une pratique variable favoriserait l'extraction de la règle abstraite (i. e., schéma moteur) permettant une paramétrisation du geste au moment du rappel (Lee, Magill & Weeks, 1985). Le transfert d'apprentissage d'un programme moteur à un autre programme moteur semble alors possible au sein d'une classe de mouvements gouvernés par un même PMG.

Shea et collaborateurs (Shea & Morgan, 1979 ; Shea & Zimny, 1983) ont établi un lien théorique entre la variabilité de la pratique proposée par Schmidt dans sa « théorie des schémas » et l'effet d'interférence contextuelle (Battig, 1966 ; 1972 ; 1979). Cependant, pour Shea et Zimny (1983), la « théorie des schémas » ne fait aucune prédiction au sujet des différentes conditions de pratique qui peuvent être développées au sein d'une pratique

variable. En effet, dans l'approche traditionnelle de la « théorie des schémas », seule la quantité de pratique variable est manipulée pour améliorer la représentation du « schéma moteur ». Prenons l'exemple d'un « putting » au golf, il est recommandé à l'apprenant de diversifier les situations d'apprentissage (i. e., différentes distances de « putt ») afin d'affiner le « schéma moteur » : Schmidt propose que l'apprenant pourrait extraire une règle abstraite (schéma) qui unirait les paramètres du mouvement (e. g., distances) à la performance motrice.

Dans le cas de l'interférence contextuelle au contraire, et à partir de l'hypothèse de variabilité de pratique esquissée dans la « théorie des schémas », les travaux se sont majoritairement centrés sur les différentes conditions d'organisation de la pratique variable : pour une même quantité de pratique, comment organiser la pratique afin d'acquérir un geste de manière optimale ? Nombreuses ont été les recherches ces trente dernières années sur l'effet des conditions de pratique dans le domaine de l'apprentissage moteur, et en particulier sur les processus sous-jacents aux différentes conditions de pratique variable.

CHAPITRE 2

I. Interférence contextuelle :

Le terme d'interférence contextuelle (IC) proposé par Battig (1966 ; 1972 ; 1979) tient son origine dans le domaine de l'apprentissage verbal. Battig (1979) a préféré le terme d'interférence contextuelle à celui d'interférence intra-tâche initialement proposé ; le terme IC ayant plus attrait au rôle des facteurs contextuels dans l'acquisition de la tâche plutôt qu'à une interférence limitée à la tâche elle-même. Des travaux de Battig (1996 ; 1972 ; 1979) ressort l'idée principale que tout contexte d'apprentissage qui augmente l'interférence entre les tâches à apprendre au cours de la phase de pratique faciliterait l'apprentissage de la tâche : les processus mis en jeu par l'apprenant (i. e., processus intra- et inter-tâches) seraient responsables de ces bénéfices. Deux principaux facteurs ont été proposés par Battig pour moduler le niveau d'interférence au cours de la phase de pratique : la condition de pratique et la similarité entre les tâches à apprendre. En effet, la condition de pratique et/ou le niveau de similarité entre les tâches à apprendre seraient susceptibles de moduler les processus intra- et/ou inter-tâches mis en jeu par l'apprenant au cours de la phase de pratique, et donc d'influencer l'apprentissage.

Depuis les travaux princeps de Shea et Morgan (1979) dans le domaine moteur, de nombreux travaux se sont intéressés au facteur condition de pratique. Force est de constater qu'à ce jour, le facteur similarité des tâches proposé par Battig (1972 ; 1979) n'a pour sa part pas connu le même intérêt ; l'effet IC étant de ce fait couramment associé dans la littérature à la manipulation du facteur condition de pratique. L'un des objectifs de ce travail de thèse a donc naturellement été porté sur l'étude des facteurs condition de pratique et similarité des tâches comme sources potentielles d'interférence dans le domaine moteur.

1. Condition de pratique :

Les travaux de Battig ont montré qu'une pratique à niveau IC élevé produit de faibles performances durant la phase d'acquisition comparée à une pratique à faible niveau IC. Paradoxalement, une pratique à niveau IC élevé engendre de meilleures performances lors de tests de rétention/transfert comparée à une pratique à faible niveau IC. Pour créer différents niveaux IC au cours de la phase de pratique, un facteur est traditionnellement utilisé : la

condition de pratique. Une distinction est alors faite entre pratique *bloquée* et pratique *aléatoire*. Prenons l'exemple d'un participant ayant trois tâches (A, B et C) à apprendre au cours d'une seule séance de pratique. Un faible niveau d'interférence entre les tâches consiste à faire pratiquer tous les essais d'une même tâche avant de passer à la seconde puis à la dernière tâche (e. g., AAA, BBB, CCC). Ce type de pratique se définit sous le terme de pratique bloquée. La pratique aléatoire correspond à la pratique des essais des différentes tâches de manière non systématique (e. g., A, C, B, A, B, C, B, A, C). La pratique aléatoire induit une interférence élevée.

Shea et Morgan (1979). Longuement étudié dans le domaine langagier, ce n'est qu'à partir des travaux de Shea et Morgan (1979) que l'on verra apparaître des études sur l'effet IC dans le domaine de l'apprentissage moteur (voir Magill & Hall, 1990, pour une revue). Dans l'étude de Shea et Morgan, les participants avaient pour consigne de produire différents patterns de mouvement de bras grâce à un dispositif expérimental imposant des contraintes spatiales et temporelles. Le dispositif expérimental était composé d'une base de départ et d'arrivée, et d'une plaque en bois supportant six plaquettes renversables (Figure 3). La tâche consistait pour les participants à se saisir d'une balle de tennis présente sur la base de départ située devant eux, puis de renverser le plus rapidement possible trois des six plaquettes dans un ordre préalablement défini par l'expérimentateur pour enfin terminer leur geste en déposant la balle de tennis sur la base d'arrivée. Trois configurations différentes d'abattement des plaquettes étaient proposées. Chaque participant a pratiqué 18 essais sur chacune des trois tâches au cours de la phase d'acquisition selon l'une des deux modalités de pratique (bloquée *vs.* aléatoire). Des tests de rétention ont été administrés dix minutes et dix jours après la phase de pratique (un total de 18 essais ; 6 essais pour chacune des trois tâches). Pour tester l'effet spécifique de la condition de pratique administrée en acquisition et en rétention, deux tests de rétention ont été administrés pour chaque groupe : les trois tâches ont été pratiquées dans chacun des deux tests de rétention selon un ordre bloqué pour l'un, et selon un ordre aléatoire pour l'autre. La moitié des participants assignés aux groupes de pratique bloquée et aléatoire a pratiqué les deux tests de rétention après une courte pause de 10 minutes, alors que l'autre moitié des participants a pratiqué ces deux mêmes tests de rétention 10 jours après la fin de la phase d'acquisition. La variable dépendante de cette étude portait sur le temps total de la réponse : la somme du temps de réaction et du temps de mouvement.

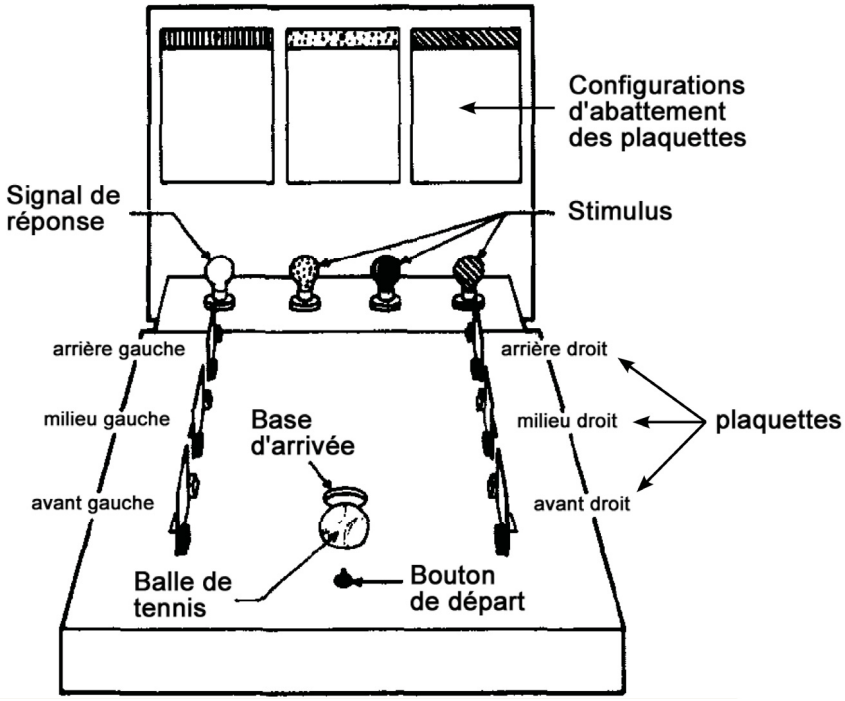


Figure 3. Illustration du dispositif expérimental – Extrait et traduit de l'étude de Shea et Morgan (1979). Chaque participant a pratiqué trois tâches au cours de la phase de pratique selon un ordre bloquée ou aléatoire. Pour chaque essai, un signal de réponse (lumière jaune) indiquait au participant de répondre le plus rapidement possible à la tâche imposée. Avec leur main droite, les participants devaient relâcher le bouton de départ et attraper la balle de tennis supportée par le premier des deux trous. Après avoir pris la balle de tennis, le participant devait ensuite renverser le plus rapidement possible et dans un ordre déterminé trois plaquettes. L'ordre des plaquettes à abattre était différent pour chaque tâche, et était présenté sous forme de diagrammes juste derrière le stimulus lumineux associé à la tâche. La partie haute de chaque diagramme était marquée d'une couleur similaire à celle du stimulus lumineux présenté. Enfin, après avoir abattu les trois plaquettes, le participant devait reposer la balle de tennis dans le trou correspondant à la base d'arrivée. Les trois tâches pratiquées en acquisition consistaient à abattre trois plaquettes dans l'ordre suivant : (a) arrière droit, milieu gauche et avant droit ; (b) avant droit, milieu gauche et arrière droit ; (c) avant gauche, milieu droit et arrière gauche. Chacune des trois tâches était associée à un stimulus de couleur : respectivement bleu, rouge et blanc pour les tâches a, b et c. Les trois tâches (a, b et c) pratiquées en acquisition ont également été pratiquées en rétention selon un ordre bloquée ou aléatoire.

Les résultats obtenus ont confirmé les prédictions de Battig (1966 ; 1972 ; 1979). En effet, les performances des participants ayant pratiqué sous condition bloquée (i. e, faible interférence) se révèlent supérieures à celles des participants sous condition aléatoire (i. e., interférence élevée) lors de la phase d'acquisition. Néanmoins, lors des tests de rétention, les performances des participants ayant pratiqué sous condition aléatoire se révèlent cette fois-ci supérieures à celles des participants du groupe de pratique bloquée et ce, indépendamment de la modalité de présentation des tâches (bloquée *vs.* aléatoire) lors du test de rétention. Ainsi, l'avantage lié à la pratique aléatoire sur les performances observées lors de tests de rétention ne serait pas spécifique à la modalité d'administration du test de rétention mais bien à la

modalité de pratique en acquisition. D'autres études ont par la suite obtenu l'effet IC lors de tests de rétention sous condition bloquée (e. g., Gabriele, Hall & Buckolz, 1987 ; Immink & Wright, 1998 ; 2001 – Exp.1 ; Wright, Lee & Whitacre, 1992) ou sous condition aléatoire (e. g., Lee & Magill, 1983 ; Young, Cohen et Husak, 1993 ; Blandin, Proteau & Alain, 1994 ; Immink & Wright, 2001 – Exp.2).

Dans des revues de littératures sur l'effet IC, Magill et Hall (1990) et Brady (1998) ont répertorié différentes études ayant manipulé le facteur condition de pratique dans des conditions expérimentales variées (e. g., tâches de laboratoire ou hors laboratoire, variations des tâches au niveau des caractéristiques invariantes ou paramétriques du geste, etc.). Lors de tâches de laboratoire, de nombreuses études ayant utilisé des tâches multi-segmentaires (e. g., Shea et Morgan, 1979), ont révélé un effet bénéfique de la pratique aléatoire comparée à la pratique bloquée et ce, indépendamment du fait qu'il soit demandé au participant de répondre le plus rapidement possible (e. g., Shea et Morgan, 1979 ; Gabriele, Hall & Buckolz, 1987 ; Lee & Magill, 1983, Expériences 1 et 2 ; Limons & Shea, 1988 ; Shea & Zimny, 1983), de respecter un temps de mouvement total (e. g., Carnahan, Van Eerd & Allard, 1990 ; Gabriele, Hall & Lee, 1989 ; Gabriele, Lee, & Hall, 1991) ou de respecter des temps de mouvements relatifs (e. g., Lee & Magill, 1983, Expérience 3 ; Lee, Wulf & Schmidt, 1992 ; Sekiya, Magill, Sidaway & Anderson, 1994; Wulf & Lee, 1993). Si dans un premier temps l'effet IC dû à la condition de pratique apparaît relativement robuste, notons toutefois que ce constat est valable dans le cas d'une pratique de tâches de laboratoire considérées « simples » (e. g., voir également Wulf & Shea, 2002, pour une revue).

En effet, les résultats issus d'études hors laboratoire (e. g., Bortoli, Robazza, Durigon & Carra, 1992; Brady, 1997 ; Tsutsui, Lee & Hodges, 1998) ou de laboratoire utilisant des tâches complexes (e. g., Albaret & Thon, 1998 ; Jarus & Gutman, 2001) sont souvent mitigés et révèlent le plus souvent une absence de différence bloquée-aléatoire lors de tests de rétention/transfert. Par exemple, dans une étude portant sur la réalisation de figures constituées de 2, 3 ou 4 segments, Albaret et Thon (1998) ont testé l'effet de la condition de pratique (bloquée *vs.* aléatoire) en fonction du niveau de complexité de la tâche définie par le nombre de segments sur chaque pattern. Les résultats obtenus ont montré un effet bénéfique de la pratique aléatoire comparée à la pratique bloquée sur les tests de rétention et de transfert. Néanmoins, l'effet IC n'a été observé que pour les niveaux de complexité les plus faibles (2 et 3 segments). Aucun effet IC n'a été obtenu dans la condition la plus complexe (4 segments). De même, dans une tâche de lancer de sacs vers une cible, Jarus et Gutman (2001) ont

combiné différents niveaux de complexité de la tâche (simple *vs.* complexe) avec différentes conditions de pratique (bloquée *vs.* aléatoire). Dans la condition simple, 1 seul paramètre était contrôlé (i. e., le poids des sacs) alors que dans la condition complexe, 3 paramètres étaient contrôlés (i. e., le poids et la taille des sacs, ainsi que les cibles à atteindre). Leurs résultats révèlent une interaction entre le niveau d'interférence contextuelle et la complexité de la tâche. En effet, dans la condition tâche simple (i. e., variation d'un seul paramètre), le groupe de pratique aléatoire (i. e., haut niveau IC) obtient des performances supérieures à celles du groupe de pratique bloquée (i. e., faible niveau IC) sur les tests de rétention/transfert. Cependant, dans la condition tâche complexe (i. e., variation de trois paramètres), le groupe de pratique bloquée obtient cette fois-ci des performances supérieures à celles du groupe de pratique aléatoire ; notons que les performances du groupe de pratique bloquée sont identiques quel que soit le niveau de complexité de la tâche. Ces résultats suggèrent que le niveau d'interférence créé sous condition aléatoire lors d'une pratique de tâches complexes pourrait se révéler trop élevé et ainsi faire obstacle aux processus cognitifs impliqués dans l'acquisition de la tâche, et de fait engendrer des effets délétères sur l'apprentissage.

L'ensemble des études précédemment présentées nous amène à nous interroger sur les conditions d'apparition de l'effet IC, et plus spécifiquement sur les processus cognitifs impliqués : pourquoi l'ordre de la pratique serait-il bénéfique pour la performance et au contraire néfaste pour l'apprentissage ? A l'inverse, pourquoi l'ordre de la pratique retarderait-il l'amélioration de la performance, mais serait bénéfique pour l'apprentissage ? Enfin, quels processus sous-jacents à la performance et à l'apprentissage sont affectés par l'ordre de la pratique ? Des points de vue théoriques divergents ont été proposés pour expliquer un tel phénomène. En effet, s'il est relativement simple d'expliquer l'effet de la condition de pratique sur les performances observées lors de la phase d'acquisition, il est cependant beaucoup plus difficile d'expliquer la différence des performances observées sur les tests de rétention/transfert : interaction entre le facteur *condition de pratique* (bloquée *vs.* aléatoire) et *phase expérimentale* (acquisition *vs.* rétention/transfert). Dans la suite de ce chapitre relatif à l'effet IC, nous allons dans un premier temps détailler les deux hypothèses explicatives les plus couramment avancées (i. e., hypothèses d'*élaboration* et de *reconstruction*) ; dans un second temps, nous aborderons ces mêmes hypothèses en lien avec le facteur similarité des tâches ; enfin, nous nous intéresserons aux variables susceptibles de moduler l'effet IC (e. g., complexité de la tâche, quantité de pratique, etc.).

2. Hypothèses explicatives de l'effet d'interférence contextuelle :

a) Hypothèse d'élaboration :

Cette hypothèse, esquissée par Battig (1966 ; 1972 ; 1979) et plus spécifiquement développée pour l'apprentissage moteur par Shea et Morgan (1979 ; Shea & Zimny, 1983 ; 1988), suggère que la condition de pratique aléatoire (i. e., niveau IC élevé) conduit à des représentations de plans d'actions plus élaborés et plus précis que sous une condition de pratique bloquée (i. e., niveau IC faible). En effet, en lien avec l'hypothèse des « niveaux de traitement » proposée par Craik et Lockhart (1972) et la notion de profondeur du traitement en mémoire qui en découle, la pratique aléatoire induirait un niveau de traitement plus profond que la condition bloquée (e. g., traitement de surface) : la profondeur de l'encodage déterminant la vitesse du déclin de la trace en mémoire et donc la qualité du rappel avec le temps. Ainsi, sous condition aléatoire, la présence des différents plans d'actions en mémoire de travail[3] permettrait à l'apprenant de procéder à des stratégies d'encodage multiples et variables au cours de la phase de pratique, censées renforcer l'élaboration de la trace comparée à la pratique bloquée ; les plans d'actions relatifs aux différentes tâches à apprendre résident ensemble en mémoire de travail où ils peuvent être comparés durant la pratique (processus inter-tâches). Ces processus inter-tâches, propices à la réalisation de telles comparaisons, permettraient des représentations en mémoire de plans d'actions plus distincts et élaborés que sous condition bloquée, où aucune comparaison n'est possible car les différents plans d'actions ne sont jamais présents ensemble en mémoire de travail ; alors que la pratique aléatoire permet à l'apprenant d'avoir recours à des processus intra- et inter-tâches, la pratique bloquée est quant à elle limité aux processus intra-tâche. L'hypothèse d'*élaboration* (Shea et Zimny, 1983 ; 1988) attribue l'amélioration des performances en rétention après une acquisition sous condition aléatoire (i. e., niveau IC élevé) à l'utilisation de stratégies d'encodage multiples et variables rendues possibles aux moyens de processus intra- et inter-tâches (voir également Wright, 1991 ; Wright, Li et Whitacre, 1992).

[3] La mémoire de travail est un « système servant à maintenir temporairement les informations et à les manipuler pour une gamme importante de tâches cognitives telles que l'apprentissage, le raisonnement et la compréhension » (Baddeley, 1993, p. 79).

b) Hypothèse de reconstruction :

Basée sur les travaux de Jacoby (1978 ; Jacoby & Craik, 1979 ; Cuddy & Jacoby, 1982), une approche différente a été proposée par Lee et Magill (1983 ; 1985 ; Cross, Schmitt & Grafton, 2007) : l'hypothèse de *reconstruction*. Elle postule que la présence de tâches concurrentes entre deux répétitions d'une même tâche lors d'une pratique aléatoire provoquerait l'oubli partiel ou complet des caractéristiques du plan d'action requis pour réaliser cette tâche. Cet oubli engagerait alors l'apprenant dans un processus actif de reconstruction du plan d'action lorsque celui-ci est à nouveau demandé. A l'inverse, lors d'une pratique bloquée, le plan d'action précédemment construit pour répondre à la tâche étant déjà présent en mémoire de travail, il pourra être utilisé à nouveau pour répondre à l'essai suivant. Ainsi, les processus engagés dans la reconstruction active des plans d'actions, induite par la pratique aléatoire (i. e., processus intra- et inter-tâches) et non par la pratique bloquée (i. e., processus intra-tâche) au cours de la phase d'acquisition, amènent l'apprenant à une meilleure représentation des différents plans d'actions et donc à de meilleures performances lors des tests de rétention. En ce qui concerne les capacités de transfert d'apprentissage sur une nouvelle tâche, l'amélioration des performances observées sur les tests de transfert après une phase de pratique sous condition aléatoire serait due à une similarité des processus engagés (e. g., reconstruction de plans d'actions) au cours des phases d'acquisition et de transfert (voir Bransford, Franks, Morris et Stein, 1979 ; Lee, 1988).

De récents travaux issus des neurosciences ont cherché à évaluer les processus cognitifs sous-jacents aux hypothèses d'élaboration et de reconstruction. Par exemple, l'étude de Cross et al. (2007) révèle que les participants sous condition aléatoire ont un temps d'étude supérieur (i. e., temps nécessaire à la reconstruction des différents plans d'actions ; voir également Immink et Wright, 1998 ; 2001) et sollicitent différentes régions cérébrales (régions sensori- et pré-motrice) comparés aux participants sous condition bloquée lors des phases de planification et d'exécution du mouvement. De plus, l'augmentation progressive avec la pratique de l'activité cérébrale dans le cortex pré-moteur et moteur lors de la préparation de la réponse suggère que les participants sous condition aléatoire préparent leur mouvement en avance par rapport aux participants sous condition bloquée ; ces résultats sont en accord avec ceux issus de la littérature (e. g., Klapp, 1996), à savoir que les participants sous condition bloquée attendent le signal de réponse pour réaliser les premiers éléments de la séquence à produire (Wright, Black, Immink, Brueckner & Magnuson, 2004). Ces données

suggèrent donc que l'activation des aires pré-motrice et motrice, en tant que supports neuroanatomiques aux processus intra- et inter-tâches pourrait jouer un rôle central dans l'amélioration des performances lors de tests de rétention/transfert. Cross et al. suggèrent que l'augmentation de l'activité cérébrale au niveau du cortex sensori-moteur, observée pour le groupe sous condition aléatoire lors de la phase de préparation motrice, se traduit par un engagement supérieur de l'apprenant dans des processus de planification et de reconstruction de plans d'actions comparé au groupe sous condition bloquée : données en faveur de l'hypothèse de reconstruction. Notons également que des études chez des singes (e. g., Lu & Ashe, 2005 ; Georgopoulos, Taira & Lukashin, 1993 ; Kurata, 1993 ; Mushiake, Inase & Tanji, 1991 ; Alexander & Crutcher, 1990) et chez des sujets humains lors d'études en IRMf et TMS[4] (e. g., Kansaku, Muraki, Umeyama, Nishimori, Kochiyama, Yamane & Kitazawa, 2005 ; Zang, Jia, Weng, Li, Cui, Wang, Hazeltine & Ivry, 2003 ; Grafton, Hazeltine & Ivry, 1998 ; 2002 ; Richter, Andersen, Georgopoulos & Kim, 1997) indiquent que le cortex sensori-moteur est impliqué dans la préparation de mouvements discrets et séquentiels. Les données obtenues par Cross et al. (2007) lors d'une pratique de tâches séquentielles peuvent donc être étendues à une pratique de tâches discrètes.

Toutefois, une étude de Lin et al. (2008 ; voir également Lin, Fisher, Wu, Ko, Lee & Winstein, 2009) nuance quelque peu le rôle des processus de reconstruction dans l'amélioration de l'apprentissage moteur. En effet, Lin et al. (2008) ont montré que des impulsions TMS[5] (i. e., appliquées au niveau du cortex moteur controlatéral du bras réalisant la tâche), synchronisées avec le début de chaque intervalle de temps inter-essais lors de la phase de pratique, n'améliore pas l'apprentissage des participants sous condition bloquée et au contraire détériore celui des participants sous condition aléatoire. Leurs résultats supportent donc dans un premier temps l'hypothèse d'élaboration en montrant que la perturbation des processus intra- et inter-tâches au cours de la phase d'acquisition pour le groupe sous condition aléatoire détériore l'apprentissage : les performances en rétention du groupe « Aléatoire-TMS » se révèlent inférieures à celle du groupe contrôle « Aléatoire-Sans TMS » n'ayant subi aucune impulsion TMS au cours de la phase d'acquisition. Dans un second temps, les résultats ne supportent que partiellement l'hypothèse de reconstruction car la perturbation des processus intra-tâche lors d'une pratique sous condition bloquée n'a pas

[4] IRMf : Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle.
TMS : Stimulation magnétique transcranienne.
[5] La TMS est une technique permettant une perturbation transitoire de l'activité motrice corticale par le biais de stimulations non invasives du cortex humain (Hallett, 2000).

amélioré l'apprentissage : les performances en rétention du groupe « Bloquée-TMS » et du groupe contrôle « Bloquée-Sans TMS » ne diffèrent pas significativement.

En ce qui concerne les groupes contrôles (i. e., condition de pratique bloquée *vs.* aléatoire), les résultats obtenus révèlent l'obtention du traditionnel effet IC. Dans la condition où aucune impulsion TMS n'a été appliquée au cours de la phase d'acquisition, le groupe de pratique aléatoire démontre des performances supérieures à celles du groupe de pratique bloquée sur le test de rétention. Lin et al. suggèrent donc que l'absence d'amélioration des performances observées sur le test de rétention après une pratique bloquée suppose que la reconstruction des plans d'actions peut être bénéfique, mais pas suffisante pour expliquer les bénéfices liés à la pratique aléatoire sur l'apprentissage moteur.

En résumé, ayant fait l'objet de nombreuses recherches dans le domaine de l'apprentissage moteur, les hypothèses d'élaboration et de reconstruction apportent des explications théoriques intéressantes sur la compréhension des processus sous-jacents à l'obtention d'un effet IC induit par le facteur condition de pratique ; il reste toutefois quelques points théoriques à éclaircir, notamment sur le rôle respectif des processus intra- et inter-tâches dans l'amélioration de l'apprentissage moteur. L'un des objectifs de ce travail de thèse était donc d'évaluer, au regard des hypothèses d'élaboration et de reconstruction, le rôle de ces processus intra- et inter-tâches, en manipulant un autre facteur également susceptible de créer un effet IC : le facteur similarité des tâches (Battig, 1972 ; 1979).

3. Similarité des tâches :

Une autre source d'interférence a été proposée par Battig (1972 ; 1979) : la similarité entre les variations de tâches à apprendre. En effet, Battig (1972 ; 1979) a montré dans le domaine verbal que l'apprentissage de listes de mots sémantiquement similaires créent au cours de la pratique une interférence supérieure à celle créée par l'apprentissage de listes de mots non sémantiquement similaires. Battig (1979) suggère que « le degré d'interférence contextuelle est fonction de la difficulté de la tâche », où plus une tâche est difficile et plus le niveau IC augmente. Autrement dit, en augmentant le niveau de similarité entre les tâches à pratiquer on augmente le niveau de difficulté de la tâche, créant ainsi un haut niveau IC favorable à l'apprentissage de la tâche. Toutefois, la notion de « similarité » utilisée dans les travaux de Battig fait essentiellement référence aux caractéristiques sémantiques des mots à

apprendre. Cette définition ne s'applique donc pas directement au domaine de l'apprentissage moteur, et reste de ce fait un point majeur à établir.

Toutefois, les rares études ayant à ce jour investigué le facteur « similarité » dans le domaine moteur se sont principalement inspirées de la proposition de Magill et Hall (1990), à savoir l'obtention de l'effet IC à la seule condition que les variations de tâches portent sur les caractéristiques invariantes du geste. Par exemple, sur la base des travaux de Shea et Zimny (1988), Wood et Ging (1991) ont manipulé la similarité des tâches en faisant varier les caractéristiques spatiales de trois patterns de mouvements à reproduire : différentes tailles de la lettre « N » constituaient la condition *similaire* (i. e., haut niveau de similarité) ; différentes configurations spatiales de tailles équivalentes constituaient la condition *non-similaire* (i. e., faible niveau de similarité). La tâche consistait à presser quatre boutons pour reproduire le plus rapidement et précisément possible les différents patterns de mouvements imposés. Dans cette étude, les participants étaient assignés à une condition de pratique bloquée ou aléatoire au cours de la phase de pratique. Les résultats observés ont révélé que la condition *similaire* était favorable à l'amélioration des performances en acquisition et en rétention comparée à la condition *non-similaire*. Notons également que la pratique aléatoire dans la condition *similaire* a permis d'améliorer l'apprentissage de la tâche sans toutefois détériorer les performances au cours de la phase d'acquisition. En d'autres termes, l'augmentation des processus inter-tâches (i. e., élaboration et reconstruction de plans d'actions) mis en jeu par l'apprenant dans le cas d'une pratique aléatoire de tâches à haut niveau de similarité n'augmente pas le niveau d'interférence au cours de la phase de pratique comme le suggère Battig (1972 ; 1979) : résultats contraires aux hypothèses d'élaboration et de reconstruction ; ces résultats ne permettent donc pas d'étendre les prédictions de Battig au domaine moteur.

Cette apparente divergence dans les résultats peut néanmoins être discutée en termes d'interprétation de la notion de « similarité » dans le domaine moteur. En effet, les rares études ayant manipulé le facteur « similarité » ont essentiellement considéré le niveau de similarité entre les tâches motrices en fonction du degré de variation des caractéristiques invariantes du geste (e. g., configurations spatiales, temporelles) : un haut niveau de similarité lorsque les tâches partagent les mêmes caractéristiques invariantes et un faible niveau de similarité lorsque les variations portent sur les caractéristiques invariantes du geste (e. g., Shea & Zimny, 1988 ; Wood & Ging, 1991 ; Lee, Wulf, & Schmidt, 1992). Toutefois, bien que la proposition de Magill et Hall (1990) sur les conditions requises à l'obtention de l'effet IC ait reçu quelques supports expérimentaux (e. g., Wood et Ging, 1991 ; Lee, Wulf, &

Schmidt, 1992), d'autres études ont néanmoins observé un effet IC dans des conditions où les variations de tâches ne portaient pas sur les caractéristiques invariantes du geste (e. g., Sekiya, Magill, Sidaway, & Anderson, 1994 ; Sekiya, Magill, & Anderson, 1996 ; Shea, Kohl, & Indermill, 1990 ; Young, Cohen, & Husak, 1993). Ces résultats permettent donc d'envisager différemment la notion de « similarité » entre les tâches motrices, qui pourrait dans ce cas être appréhendée à partir des caractéristiques paramétriques du geste.

Partant des résultats précédemment cités, l'une des originalités de ce travail de thèse a été de considérer différemment la notion de « similarité » dans le domaine moteur : différents niveaux de similarité entre les tâches motrices en fonction du degré de variation des caractéristiques paramétriques du geste. Pour cela, nous avons contrasté différentes conditions expérimentales où la similarité entre les tâches portait sur des caractéristiques temporelles dans l'Expérience 1 (i. e., temps de mouvement total), et sur des caractéristiques spatiales dans l'Expérience 2 (i. e., direction du mouvement – selon la conception paramétrique de Rosenbaum, 1980 ; 1983)[6]. Dans l'Expérience 1, seul le paramètre *temps de mouvement total* (TMT) a été manipulé : un haut niveau de similarité entre les tâches était caractérisé par une faible variation entre les TMT (i. e., variation de 100 ms entre chaque TMT), alors qu'un faible niveau de similarité était caractérisé par une variation plus importante entre les TMT (i. e., variation de 300 ms entre chaque TMT). Dans l'Expérience 2, nous avons choisi de manipuler le paramètre *direction* du mouvement : un niveau de similarité élevé devrait être créé dans la condition où trois tâches motrices sont pratiquées dans une seule et même direction (e. g., devant), et un faible niveau de similarité lorsqu'elles sont pratiquées dans trois directions possibles (e. g., gauche, devant ou droite).

La notion de « similarité des tâches » étant intimement liée à celle de « difficulté de la tâche » (Battig, 1979), il apparaît naturel d'aborder le degré de similarité entre les tâches dans les Expériences 1 et 2 en relation avec le degré de difficulté de la tâche pour chacune d'entre elles. Dans l'Expérience 1, seul le paramètre *temps de mouvement total* a été manipulé pour créer différents niveaux de similarité entre les tâches. La tâche consistait à presser quatre

[6] Selon Rosenbaum (1980 ; 1983), la programmation motrice peut être abordée comme un processus « paramétrique » où chaque dimension du mouvement à réaliser est programmée indépendamment : par exemple le bras (e. g., gauche ou droit), la direction (e. g., vers ou éloigné du sujet – dans le plan frontal), et l'extension (e. g., court ou long) (voir également Lépine, Glencross, & Requin, 1989 ; Anson, Hyland, Kötter, & Wickens, 2000) ; le temps requis pour spécifier un paramètre est fonction de la dimension considérée, et les opérations de spécification de chacun des différents paramètres se déroulent de manière sérielle mais sans ordre strict.

boutons dans un ordre préétabli tout en respectant le plus précisément possible trois TMT dans chaque condition expérimentale : 900-1000-1100 ms dans la condition *similaire* et 700-1000-1300 ms dans la condition *non-similaire*. La condition *similaire*, au sens de Battig, semble alors être la condition d'apprentissage où le niveau de difficulté de la tâche est le plus élevé : augmentation des processus d'élaboration et de reconstruction pour le groupe de pratique aléatoire dans la condition *similaire* comparé au groupe de pratique aléatoire dans la condition *non-similaire*. L'Expérience 2 repose quant à elle sur un concept différent de celui de l'Expérience 1. Dans cette seconde expérience, la condition *non-similaire* requiert la planification de différents paramètres pour réaliser la tâche (e. g., paramètres Temps de mouvement et Direction) alors que la condition *similaire* requiert uniquement la planification d'un paramètre (e. g., paramètre Temps de mouvement). Il n'est donc pas concevable de considérer la notion de difficulté de la tâche de la même manière. Sur la base des prédictions de Wulf et Shea (2002), une tâche peut être définie comme plus ou moins complexe dans la mesure où elle requiert le contrôle d'un nombre plus ou moins important de degrés de libertés : la condition *non-similaire* (i. e., requiert la paramétrisation du geste selon 3 directions possibles) dans l'Expérience 2 s'apparente donc à la condition où le niveau de complexité/difficulté de la tâche est le plus élevé, comparé à la condition *similaire* (i. e., requiert la paramétrisation du geste selon 1 seule direction) ; voir Tableau 1.

Tableau 1. Récapitulatif des différents niveaux de difficulté de la tâche créés en fonction du niveau de similarité entre les tâches pour chacune des conditions expérimentales de cette étude.

Similarité des tâches	Caractéristiques invariantes *vs.* paramétriques du geste (Magill & Hall, 1990 ; Battig, 1979)	Condition *similaire*	Niveau de difficulté élevé
		Condition *non-similaire*	Niveau de difficulté faible
	Conception paramétrique de la programmation motrice (Rosenbaum, 1980 ; 1983)	Condition *similaire*	Niveau de difficulté faible
		Condition *non-similaire*	Niveau de difficulté élevé

Wulf et Shea (2002) ont ajouté que la pratique de tâches complexes pouvait se révéler sensible à certaines variables d'apprentissage qui ne seraient pas particulièrement pertinentes lors d'une pratique de tâches simples (e. g., condition de pratique, connaissance du résultat, etc.). Une attention particulière sur la notion de complexité/difficulté de la tâche et son éventuelle influence sur l'effet IC est donc à prendre en considération dans cette étude.

II. Complexité/difficulté de la tâche et niveau d'interférence contextuelle :

L'influence de la complexité/difficulté de la tâche sur l'effet IC peut être considérée en lien avec les hypothèses d'élaboration et de reconstruction. En effet, la pratique de tâches complexes pourrait « surcharger » la mémoire de travail car l'apprenant aurait à recourir à des processus additionnels d'élaboration et de reconstruction lors d'un apprentissage sous condition aléatoire et/ou avec un niveau de similarité élevé entre les tâches : les processus inter-tâches additionnels induiraient une charge cognitive importante en mémoire de travail supposée perturber le développement et la représentation des différents plans d'actions en mémoire. Dans ce cas, l'interférence intra-tâche inhérente à la pratique de tâches complexes pourrait être suffisante pour un apprentissage efficace sous condition bloquée aux premiers stades de la pratique. Au début de la pratique, il est très difficile pour l'apprenant de déterminer la stratégie appropriée pour réaliser la tâche de la manière la plus efficace possible. Fitts (1964) et Fitts et Posner (1967) ont proposé le terme de « phase cognitive de l'apprentissage » où ils suggèrent que l'apprenant est dans un premier temps focalisé sur la compréhension de la tâche et sur sa réalisation, plutôt que de déterminer la stratégie d'encodage la plus efficace pour réaliser la tâche. A ce niveau de pratique, l'augmentation de l'interférence induite par la condition de pratique aléatoire est supposée augmenter le niveau de complexité de la tâche (voir Shea, Kohl & Indermill, 1990) et retarder les processus d'élaboration et de reconstruction ; les bénéfices liés à la condition de pratique aléatoire sur l'apprentissage apparaissent donc progressivement avec la mise en place de stratégies d'encodage multiples et variées (i. e., processus inter-tâches) au cours de la pratique. Dans le cas d'une pratique de tâches simples, ces stratégies d'encodage sous condition aléatoire se mettent rapidement en place et pourraient se révéler une stimulation nécessaire pour forcer l'apprenant à rester actif dans la tâche, et ainsi prolonger l'apprentissage de la tâche (Albaret & Thon, 1998 ; voir également Wulf & Shea, 2002, pour une revue).

Compte tenu des différents niveaux de difficulté de la tâche considérés dans notre étude (Expériences 1 et 2), nous allons détailler dans la section suivante la relation entre le niveau IC et le niveau de difficulté de la tâche. Sur la base de l'hypothèse de « challenge point » proposée par Guadagnoli et Lee (2004), nous aborderons également les facteurs quantité de pratique et niveau d'expertise du sujet, tous deux intimement liés au niveau de difficulté de la tâche.

1. Quantité de pratique :

Une première étude, réalisée par Shea et al. (1990), a été élaborée pour tester le niveau IC en fonction du facteur quantité de pratique. Ils ont pour cela fait pratiquer des groupes de participants sous différentes conditions de pratique (bloquée *vs.* aléatoire) et selon différentes quantités de pratique : 50, 200 ou 400 essais sur une tâche de production de forces. Deux tests de rétention ont été administrés : l'un sous condition bloquée et l'autre sous condition aléatoire. Nous nommerons Bloquée-Bloquée et Aléatoire-Bloquée les groupes ayant respectivement pratiqué sous condition bloquée et aléatoire en acquisition puis ayant réalisé le test de rétention sous condition bloquée ; nous nommerons enfin Bloquée-Aléatoire et Aléatoire-Aléatoire les groupes ayant respectivement pratiqué sous condition bloquée et aléatoire en acquisition puis ayant réalisé le test de rétention sous condition aléatoire.

Rétention sous condition aléatoire. Les résultats révèlent que pour une faible quantité de pratique (e. g., 50 essais), le groupe Bloquée-Aléatoire a obtenu des performances légèrement supérieures à celles du groupe Aléatoire-Aléatoire ; à l'inverse, avec davantage de pratique (e. g., 200 et 400 essais), le groupe Aléatoire-Aléatoire a produit des performances largement supérieures à celles du groupe Bloquée-Aléatoire (voir Figure 4).

Rétention sous condition bloquée. Les données observées après 50 et 200 essais de pratique n'ont révélé aucune différence significative entre les groupes Bloquée-Bloquée et Aléatoire-Bloquée ; avec davantage de pratique (e. g., 400 essais), le groupe de pratique Aléatoire-Bloquée a obtenu des performances supérieures à celle du groupe Bloquée-Bloquée (voir Figure 4).

Shea et al. (1990) suggèrent que les performances attendues en rétention dépendent à la fois de la quantité de pratique administrée en acquisition, mais également du contexte de pratique (bloquée *vs.* aléatoire) en acquisition et en rétention. En effet, la quantité de pratique n'a aucun effet sur la performance des participants entraînés sous condition bloquée lorsque le test de rétention est réalisé sous condition bloquée, et à l'inverse a des effets négatifs lorsque le test de rétention est pratiqué sous condition aléatoire. En ce qui concerne les bénéfices liés à la condition de pratique aléatoire sur les performances en rétention, les données observées dans cette étude supposent que les processus inter-tâches ne faciliteraient l'apprentissage de la tâche qu'après une quantité de pratique suffisante (e. g., 400 essais de pratique) ; l'apprenant aurait des difficultés pour recourir à des processus inter-tâches très tôt dans la pratique lorsque la session d'apprentissage est organisée de façon aléatoire : données en accord avec la notion de « phase cognitive d'apprentissage » proposée par Fitts (1964 ; Fitts et Posner, 1967).

L'interférence créée par la condition aléatoire au début de la pratique pourrait augmenter la complexité de la tâche et retarder la mise en place des processus inter-tâches supposés bénéfiques pour l'apprentissage de la tâche. Enfin, Shea et al. suggèrent que la condition de pratique aléatoire, comparée à la pratique bloquée, produit des effets bénéfiques sur l'apprentissage de la tâche après une quantité de pratique suffisante et ce, quelle que soit la condition d'administration du test de rétention (e. g., condition bloquée ou aléatoire).

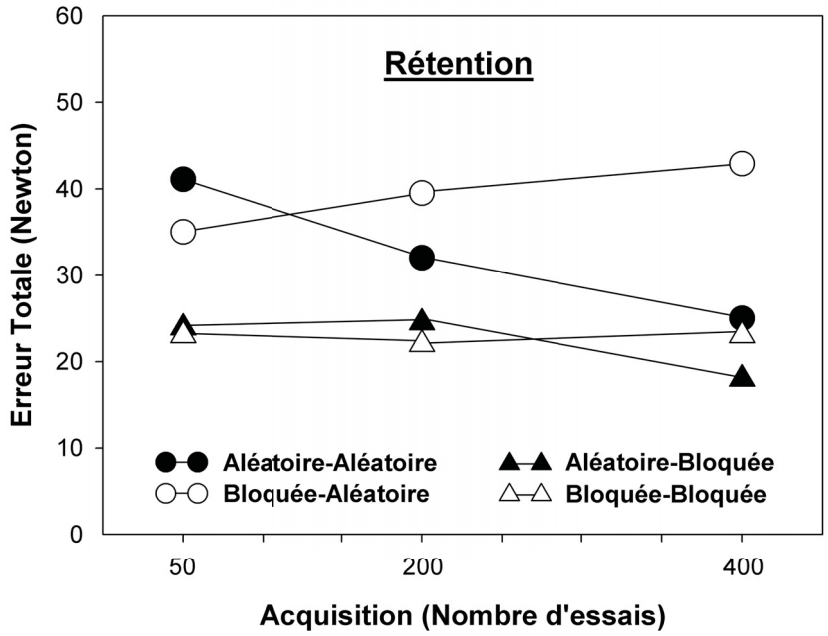


Figure 4. Performances obtenues lors des tests de rétention sous condition bloquée et aléatoire après une phase d'acquisition de 50, 200 ou 400 essais de pratique sous condition bloquée et aléatoire – Extrait et traduit de l'étude de Shea et al. (1990).

Une autre étude, menée par Proteau et al. (1994), n'a toutefois pas confirmé les résultats de Shea et al. (1990). Utilisant le même dispositif expérimental que Shea et Morgan (1979), Proteau et al. (1994) n'ont pas révélé d'influence de la quantité de pratique sur l'effet IC. En effet, après une phase de pratique constituée de 54, 108 ou 216 essais, les participants assignés à la condition de pratique aléatoire ont réalisé des performances supérieures à celles des participants sous condition bloquée lors du test de rétention. Une explication possible à cette apparente divergence entre les résultats peut résider dans les caractéristiques des tâches utilisées dans ces deux études. Dans l'étude de Shea et al. (1990), la tâche requiert un temps de mouvement très court (i. e., mouvement de type balistique), où la performance réalisée est la conséquence directe du programme moteur généré avant l'exécution du geste ; l'apprenant ne peut pas corriger son geste en cours de mouvement. A l'inverse, dans l'étude de Proteau et

al. (1994), les participants devaient réaliser des mouvements d'une durée allant de 900 ms à 1200 ms, laissant ainsi la possibilité à l'apprenant de contrôler son geste en cours de mouvement. De par la nature de la tâche utilisée dans l'étude de Shea et al. (1990), l'apprenant ne peut recourir qu'a des corrections mineures de son geste, ce qui pourrait expliquer l'apparition des bénéfices liés à la condition de pratique aléatoire après une quantité de pratique suffisante : l'élaboration et la reconstruction des plans d'actions induits sous condition aléatoire (i. e., processus inter-tâches) se traduisent par une représentation des plans d'actions plus distincts et élaborés au fur et à mesure que la pratique augmente, d'où une programmation motrice plus efficace chez les participants entraînés sous condition aléatoire après 200 et 400 essais de pratique.

2. Niveau d'expertise :

Dans un contexte théorique proche, relatif à la mise en place des stratégies d'encodage avec la pratique, Guadagnoli et al. (1999) ont préféré quant à eux contraster deux niveaux d'expertises (novice *vs.* expert) ; dans l'étude de Shea et al. (1990), le niveau d'expertise des participants augmentait progressivement avec la pratique. Guadagnoli et al. (1999) ont donc testé l'effet IC en fonction du niveau d'expertise des participants sur une tâche de « putting » au golf, jugée « complexe » par les auteurs. Après une période d'acquisition de 4 jours de pratique sous condition bloquée ou aléatoire (i. e., chaque participant a pratiqué 12 essais sur chacune des trois distances de « putt »), les résultats obtenus indiquent que les performances observées sur le test de rétention dépendent à la fois de la condition de pratique, mais également du niveau d'expertise du participant. En effet, les golfeurs novices ayant pratiqué sous condition bloquée au cours de la phase d'acquisition obtiennent des performances supérieures à celles de leurs homologues novices sous condition aléatoire. A l'inverse, les golfeurs experts assignés à la condition de pratique aléatoire obtiennent des performances supérieures à celles des golfeurs experts sous condition bloquée. En lien avec les études précédemment citées, ces résultats suggèrent que des sujets experts puissent recourir à des stratégies d'encodage multiples et variées lors d'intervalles inter-essais même dans le cas d'une pratique de tâches complexes, ce qui n'est pas le cas pour des sujets novices où la mise en place de ces processus (i. e., processus inter-tâches) nécessite davantage de pratique. L'hypothèse de « challenge point » proposée par la suite par Guadagnoli et Lee (2004) a été élaborée en référence aux facteurs précédemment évoqués tels que la difficulté de la tâche, la quantité de pratique et/ou le niveau d'expertise.

3. Hypothèse de « challenge point » (Guadagnoli & Lee, 2004) :

Cette hypothèse suggère qu'une augmentation du niveau d'interférence créé au cours de la phase de pratique peut produire des effets bénéfiques sur l'apprentissage mais uniquement si ce niveau d'interférence n'est pas trop élevé. En effet, si le niveau d'interférence créé au cours de la phase d'acquisition s'avère trop important pour que l'apprenant puisse recourir à des stratégies d'encodage suffisamment efficaces pour un apprentissage optimal de la tâche, alors cela se traduit sur un plan comportemental par une dégradation des performances en acquisition et en rétention (Figure 5). En d'autres termes, augmenter le niveau d'interférence créé au cours de la phase de pratique produit des effets bénéfiques sur l'apprentissage de la tâche à la condition que le niveau d'interférence ne dépasse pas un seuil critique nommé « challenge point », à partir duquel l'apprenant ne parvient plus à traiter les informations (i. e., plans d'actions et feedbacks) de manière efficace. Selon cette hypothèse, 1) aucun apprentissage ne peut apparaître sans information (i. e., les plans d'actions et le feedback représentent les moyens de transmission de l'information), 2) l'apprentissage peut être retardé en présence d'une information trop importante ou trop faible, et 3) pour qu'il y ait apprentissage, il existe une quantité optimale d'informations qui est fonction du niveau d'expertise du participant et du niveau de difficulté de la tâche. Sur la base de ce modèle, le niveau d'interférence créé au cours de la phase d'acquisition est donc dépendant du niveau de difficulté de la tâche et du niveau d'expertise du sujet.

Pour Guadagnoli et Lee (2004), le concept de « difficulté de la tâche » peut être séparé en deux catégories : une difficulté *nominale* de la tâche et une difficulté *fonctionnelle* de la tâche. La difficulté *nominale* d'une tâche est supposée refléter une quantité « constante » du niveau de difficulté de la tâche, sans tenir compte du niveau d'expertise du participant et des conditions expérimentales. Prenons l'exemple d'un « putting » au golf : le « putting » possède une difficulté *nominale* indépendante du niveau d'expertise du sujet, prenant en compte les contraintes mécaniques du geste, la distance à parcourir, le dénivelé du terrain, etc. D'un autre côté, la difficulté *fonctionelle* d'une tâche est quant à elle relative 1) au niveau d'expertise du sujet et 2) à la condition expérimentale : théoriquement plus élevée pour le sujet novice que pour le sujet expert. Reprenons l'exemple d'un « putting » au golf : 1) le sujet expert aura moins de difficulté à réaliser un même « putting » qu'un sujet novice ; 2) la difficulté *fonctionnelle* d'un même « putting » pourra également évoluer en fonction des conditions météorologiques (pluie, vent, etc.) : les performances des golfeurs experts devraient être moins dégradées que celles des golfeurs novices. Rappelons toutefois que la

difficulté *nominale* de la tâche reste inchangée quel que soit le niveau de difficulté *fonctionnelle* de la tâche.

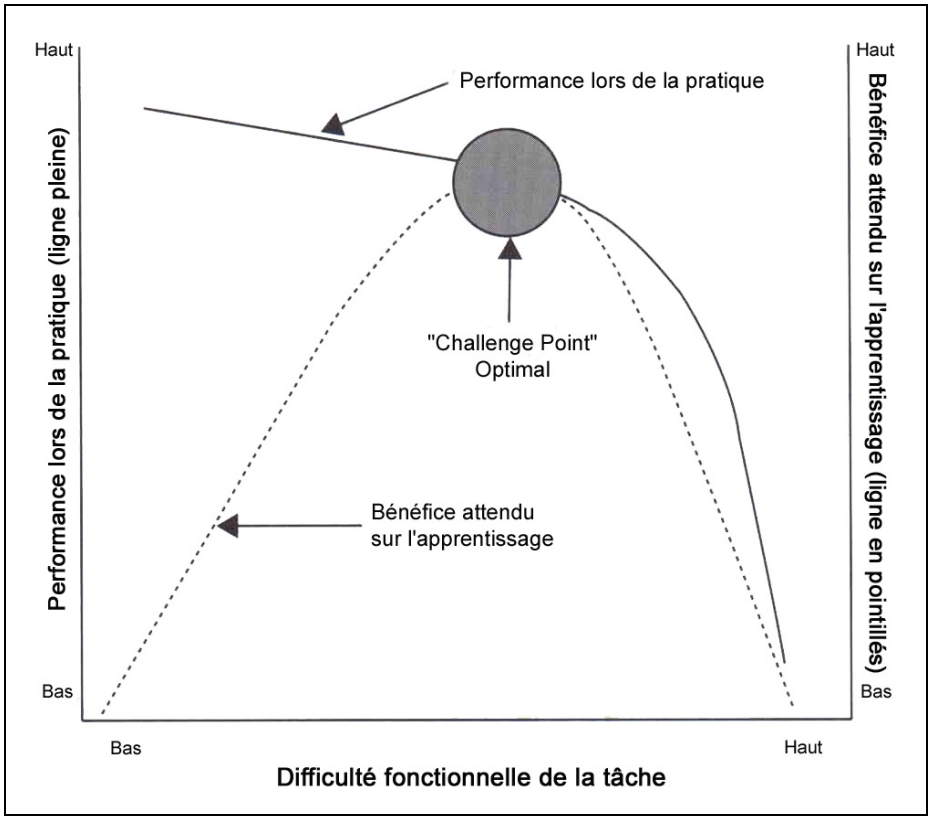


Figure 5. Relation entre les courbes d'apprentissage et de performance en fonction du niveau de difficulté *fonctionnelle* de la tâche – Extrait et traduit de l'étude de Guadagnoli et Lee (2004).

En manipulant de manière concomitante les facteurs condition de pratique, similarité des tâches et quantité de pratique dans notre étude, nous devrions donc moduler à la fois le niveau de difficulté *fonctionnelle* de la tâche (e. g., aléatoire *vs.* bloquée ; acquisition courte *vs.* acquisition longue) et le niveau de difficulté *nominale* de la tâche (e. g., similaire *vs.* non-similaire). Sachant que la difficulté *nominale* de la tâche reste inchangée, le niveau de difficulté *nominale* induit par la condition *non-similaire* (i. e., mouvement dans 3 directions) sera supérieur à celui de la condition *similaire* (i. e., mouvement dans 1 seule direction) tout au long de l'expérience. N'ayant recruté que des participants novices dans cette étude (i. e., la difficulté *fonctionnelle* de la tâche atteint son maximum dans chaque condition expérimentale au début de la pratique), nous nous attendons à observer une baisse progressive du niveau de difficulté *fonctionnelle* de la tâche avec la pratique (i. e., passage de 99 à 297 essais de pratique ; voir Figure 6).

Sur la base de ce modèle, nous nous attendons à observer une dégradation des performances sur les tests de rétention/transfert avec l'augmentation de la pratique pour le groupe expérimental ayant la difficulté *fonctionnelle* de la tâche la plus faible (i. e., groupe de pratique bloquée dans la condition *similaire*) : détérioration importante des performances observées sur les tests de rétention/transfert liée au passage d'une acquisition courte à une acquisition longue. A l'inverse, une amélioration des performances sur les tests de rétention/transfert devrait apparaître avec la pratique pour le groupe expérimental ayant la difficulté *fonctionnelle* de la tâche la plus élevée (i. e., groupe de pratique aléatoire dans la condition *non-similaire*) : amélioration importante des performances observées sur les tests de rétention/transfert liée au passage d'une acquisition courte à une acquisition longue. Les prédictions sur l'évolution simultanée des performances en acquisition et sur l'apprentissage de la tâche pour chaque condition expérimentale sont illustrées sur la Figure 6.

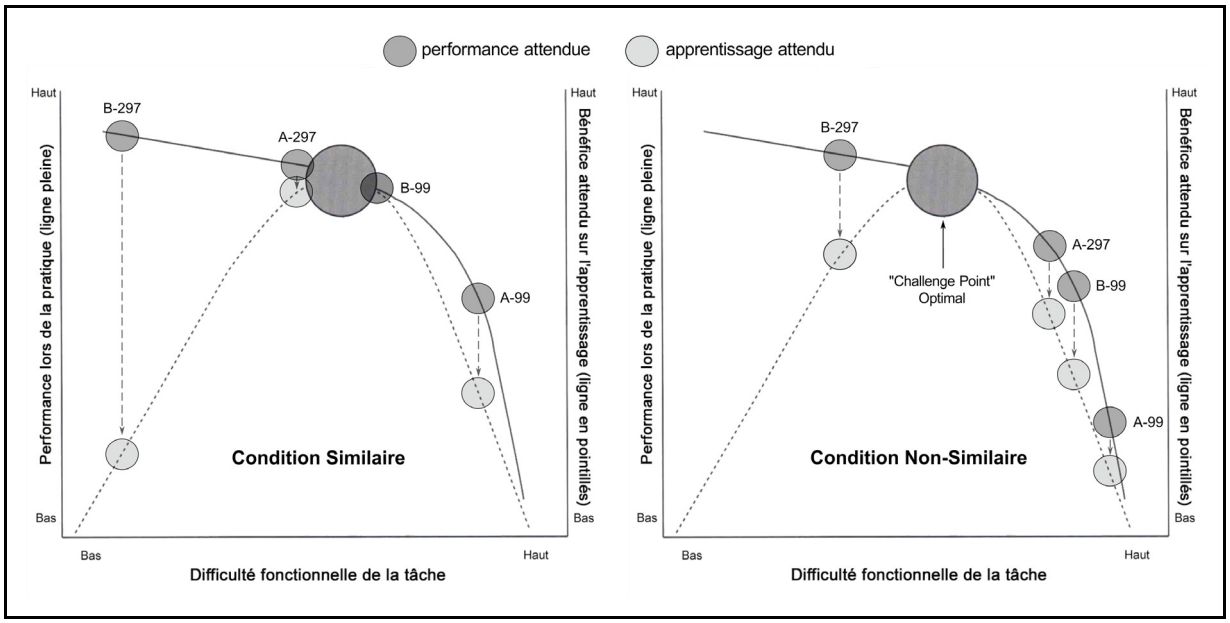


Figure 6. Illustration des prédictions sur l'évolution simultanée des performances en acquisition et sur l'apprentissage de la tâche en fonction de la condition de pratique (bloquée *vs.* aléatoire), de la quantité de pratique (99 *vs.* 297 essais), et du niveau de similarité entre les tâches (similaire *vs.* non-similaire). A = pratique aléatoire ; B = pratique bloquée ; 99 = acquisition courte de 99 essais ; 297 = acquisition longue de 297 essais.

Les données issues de cette étude devraient donc refléter, d'un point de vue comportemental, les prédictions théoriques relatives à l'hypothèse de « challenge point » : évolution de la performance avec le niveau de difficulté de la tâche qui est fonction des facteurs condition de pratique, similarité des tâches et quantité de pratique (voir Figure 7).

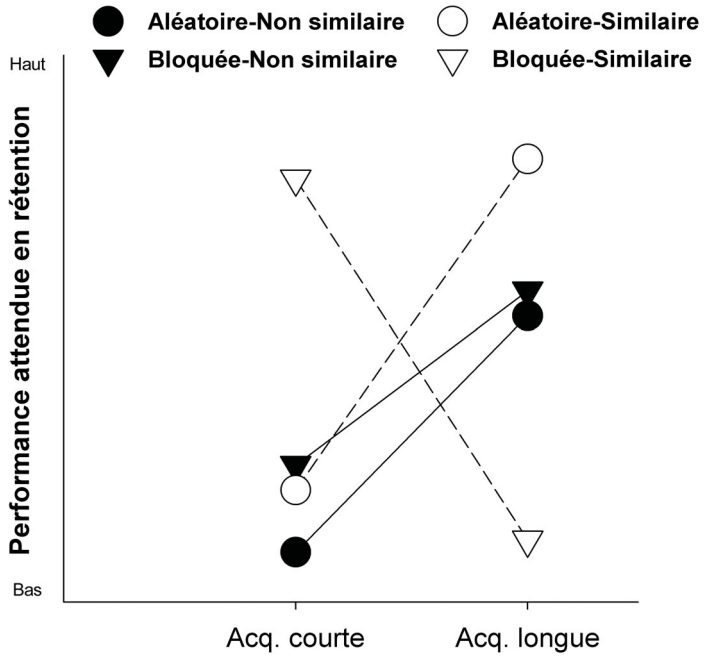


Figure 7. Illustration des performances attendues en rétention en fonction de la quantité de pratique (acquisition courte *vs.* acquisition longue), de la condition de pratique (bloquée *vs.* aléatoire), et du niveau de similarité entre les tâches (similaire *vs.* non-similaire). Acq. courte = Acquisition courte de 99 essais ; Acq. longue = Acquisition longue de 297 essais.

Sur la base des travaux précédemment présentés sur l'apprentissage et le transfert de tâches motrices, on observe depuis quelques années une évolution progressive dans la recherche sur le comportement humain, notamment en neurosciences cognitives, avec un intérêt particulier pour l'étude des mouvements complexes et non seulement des mouvements simples. En effet, la plupart de nos mouvements quotidiens sont relativement complexes, et composés principalement de séquences de mouvements continues : écrire, conduire, lacer ses chaussures, etc. La fluidité avec laquelle nous parvenons à produire des mouvements complexes de ce type rend incontestablement notre vie beaucoup plus agréable. Lorsque nous apprenons une nouvelle action, un nouveau geste, nous portons toute notre attention afin de réaliser cette action/geste ; mais après une certaine quantité de pratique, de répétitions, cette même action/geste devient presque automatique (Anderson, 1982). Nous pouvons dans ce cas nous concentrer sur la réalisation d'une nouvelle action/geste alors même que nous réalisons l'action ou le geste précédemment appris et automatisé. Ces actions ou gestes appris peuvent ainsi être réalisés de manière coordonnée, sous forme de séquences de mouvements, afin d'accomplir un nouveau but.

Néanmoins, d'un point de vue expérimental, rares sont les études qui se sont intéressées à l'apprentissage de séquences motrices de type « continues ». En effet, les principaux modèles théoriques sur le codage, la représentation, le stockage et le transfert des séquences motrices ont essentiellement utilisé des tâches de Temps de Réaction Sérielles (TRS). Ce type de tâches dites « sérielles » ne reflète que sommairement les gestes du quotidien, où une certaine continuité dans la production du mouvement est bien souvent nécessaire. Ainsi, dans la seconde partie de ce travail de thèse nous avons voulu tester les modèles théoriques basés sur des résultats issus de tâches de TRS afin de vérifier leurs prédictions sur la nature des représentations et sur les capacités d'apprentissage/transfert de séquences motrices lors d'une tâche sollicitant des mouvements continus. Sur une logique identique aux expériences précédentes, des tests de rétention/transferts ont été administrés afin d'évaluer les processus sensori-moteurs impliqués dans l'apprentissage et le transfert de séquences motrices à différents stades de pratique.

CHAPITRE 3

I. Apprentissage de séquences motrices :

Une technique répandue ces 20 dernières années pour étudier l'apprentissage de séquences motrices était de demander aux participants de répondre le plus rapidement possible à un stimulus, présenté visuellement sur un écran d'ordinateur, en appuyant sur des boutons de réponse correspondant au stimulus visuel (e. g., Nissen & Bullemer, 1987 ; Povel & Collard, 1982). Ce type de tâches a été nommé Temps de Réaction Sériel (TRS) car les participants devaient réagir non pas à un seul stimulus, comme dans le cas de tâches de Temps de Réaction de Choix (TRC), mais à une série de stimuli. Dans l'expérience de Nissen et Bullemer (1987), les sujets devaient réagir à l'apparition d'un stimulus visuel (un astérisque) dans l'une des quatre positions possibles, présentées horizontalement sur un écran d'ordinateur. A chaque essai, le stimulus apparaissait dans l'une des quatre positions possibles et la tâche du sujet consistait à appuyer le plus rapidement et précisément possible sur un bouton de réponse correspondant spatialement au stimulus visuel. Sans en avoir été préalablement informés, une partie des participants répondait à une séquence de stimuli respectant une certaine régularité nommée « séquence répétée », alors qu'une autre partie des participants répondait à une séquence irrégulière nommée « séquence aléatoire ». Les résultats indiquent que les participants assignés à la condition « séquence répétée » ont des temps de réaction plus courts et produisent moins d'erreurs que les participants assignés à la condition « séquence aléatoire ». En effet, au fur et à mesure que la séquence répétée est apprise par le participant, le temps nécessaire pour produire la séquence est réduit. Avec la pratique, l'apprenant anticipe le stimulus suivant et devient de ce fait moins dépendant des stimuli visuels. La réponse produite par l'apprenant est alors plus rapide et plus fluide.

Généralement, ce type d'expérience inclus un groupe contrôle (e. g., Nissen & Bullemer, 1987) ou un bloc contrôle (e. g., Keele, Cohen & Ivry, 1990 ; Berner & Hoffmann, 2009). Dans le cas du bloc contrôle, il est demandé aux participants de répondre à une séquence aléatoire (i. e., les éléments de la séquence sont présentés aléatoirement – différent de la séquence répétée). Après une phase de pratique sur une séquence répétée, la réduction du temps de réponse sur une séquence aléatoire permet de rendre compte d'une amélioration

générale de la performance, indépendamment des bénéfices liés à l'apprentissage de la séquence répétée

De nombreuses revues issues de la littérature sur l'apprentissage de séquences motrices indiquent qu'au cours de la pratique, les participants regroupent ou « chunk » (voir Koch & Hoffmann, 2002 ; Jiménez, 2008) certains éléments de la séquence ensemble. Cela se traduit sur un plan comportemental par une exécution plus rapide et plus fluide de la réponse comparée au début de la pratique (Verwey, 1994 ; 2001). La mesure du temps inter-éléments (i. e., intervalle de temps entre chaque élément) indique clairement que deux ou plusieurs éléments de la séquence sont groupés ensemble de manière à pouvoir être produits sous forme de sous-séquences relativement indépendantes (voir Figure 8).

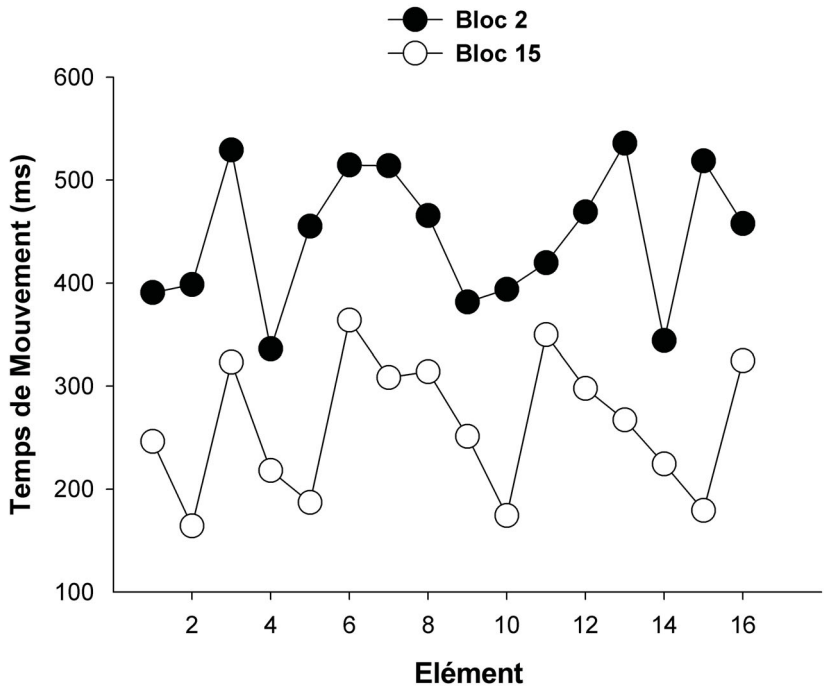


Figure 8. Temps de Mouvement moyens par élément produits sur une séquence répétée (SR) à 16 éléments au cours de la phase d'acquisition (Bloc 2 : premier bloc d'essais comportant la SR ; Bloc 15 : dernier bloc d'essais comportant la SR) – Extrait et traduit de l'étude de Boutin et al. (soumis) ; Evolution de la structure de la séquence avec la pratique due à la mise en place progressive des processus de « chunking ».

La façon dont une séquence de mouvements est organisée en sous-séquences fournit une information cruciale sur les processus cognitifs impliqués au cours des étapes de récupération, de programmation et d'exécution de la séquence motrice. Généralement, ces sous-séquences peuvent être définies par une réponse relativement lente sur les premiers

éléments de la séquence (i. e., début de la sous-séquence), puis par une réponse plus rapide sur l'élément ou les éléments suivants (e. g., Povel & Collard, 1982 ; Kovacs, Müehlbauer & Shea, 2009 ; Park & Shea, 2005 ; Wilde & Shea, 2006). Le temps de réponse sur le premier élément de la sous-séquence est supposé plus important parce que la sous-séquence doit être récupérée, programmée, et préparée pour l'exécution de la réponse. D'un autre côté, les éléments suivants de la sous-séquence sont produits plus rapidement et de manière plus fluide parce que les processus associés à leur production ont déjà été effectués. Après une quantité de pratique suffisante, les participants sont capables d'initier les processus relatifs à la sous-séquence suivante durant l'exécution de la sous-séquence en cours. Il en résulte une augmentation de la rapidité et de la fluidité de la production de la séquence. Ces processus parallèles, nommés processus de « concaténation » (voir Verwey, 2001 ; Wright, Black, Immink, Brueckner & Magnuson, 2004), permettent de réduire le délai entre les sous-séquences (e. g., Verwey, 1994 ; 2001 ; Wilde & Shea, 2006). La manière dont ces sous-séquences sont « chunkées » et « concaténées » renvoie à la structure de la séquence (e. g., Park & Shea, 2005 ; Wilde & Shea, 2006).

II. Représentation des séquences motrices :

D'une manière générale, la façon dont les séquences motrices sont apprises, stockées et représentées en mémoire représente ces dernières années une question d'intérêt général (Keele, Ivry, Mayr, Hazeltine & Heuer, 2003). Par exemple, Keele et al. (1995) ont proposé une théorie modulaire (i. e., 2 modules indépendants) où le « module cognitif » est responsable du traitement de la localisation spatiale des cibles successives et de l'organisation hiérarchique en sous-éléments de la séquence, et où le « module moteur » est responsable de la sélection des effecteurs et du pattern d'activation de ces effecteurs (voir également Verwey, 2003, pour une proposition similaire). A cet égard, Hikosaka et al. (1999 ; 2002 ; Bapi, Doya & Harner, 2000) ont montré en s'appuyant sur des données comportementales et neurophysiologiques que l'apprentissage de séquences motrices apparaissait simultanément et indépendamment à deux niveaux : une représentation visuo-spatiale (e. g., position spatiale de la partie distale du membre et/ou position séquentielle des cibles) et une représentation motrice (e. g., activation du pattern de muscles agoniste/antagoniste – angles articulaires). La représentation du code visuo-spatial est supposée se développer sous une forme relativement abstraite (effecteur indépendant), de manière consciente (i. e., explicite), et être la représentation dominante au début de la pratique. La représentation du code moteur est quant à elle supposée se développer avec la pratique (i. e., représentation dominante tard dans la pratique), de manière inconsciente (i. e., implicite), intégrant et représentant plus efficacement les aspects dynamiques du mouvement ; optimisation de la spécificité des effecteurs (effecteur dépendant) utilisés pour produire la séquence. Sur la base des modèles d'Hikosaka et al. (1999 ; 2002), nous allons détailler dans la section suivante les prédictions théoriques relatives à la nature des représentations et aux capacités d'apprentissage/transfert des séquences motrices.

Le modèle d'Hikosaka et al. (1999), illustré sur la Figure 9, trace les grandes lignes des processus impliqués dans l'apprentissage de séquences motrices. Au début de l'apprentissage, les processus sensori-moteurs sont réalisés de manière discrète et sérielle pour chaque action (connections verticales de la Figure 9A). Au fur et à mesure que le participant répète ces actions dans le même ordre, de nouvelles connections se forment entre les différentes actions (connections horizontales de la Figure 9B et 9C) : ces nouvelles connections permettent au participant de réaliser les actions de manière séquentielle, sans

avoir uniquement recours aux processus sensori-moteurs de chaque action. L'une des principales caractéristiques de ce modèle repose sur l'existence de deux voies parallèles pour supporter l'acquisition de la séquence (connections horizontales de la Figure 9B et 9C). Chacune de ces connections opère selon un système de coordonnées unique (coordonnées spatiales ou motrices). Le développement de la séquence (dominance du code spatial) au début de la pratique requiert de l'attention et un recours à la mémoire de travail. L'acquisition de la séquence (dominance du code moteur) est plus lente et de manière relativement stable avec la pratique ; le mouvement peut être effectué de manière quasi automatique, sans attention ni recours à la mémoire de travail. Les auteurs suggèrent que l'apprentissage de la séquence motrice se produit en observant une transition progressive d'une dominance du code spatial à une dominance du code moteur avec la pratique : les processus sensori-moteurs sériels pour chaque action individuelle (connections verticales) sont progressivement remplacés par des processus séquentiels qui opèrent en parallèle (connections horizontales). En accord avec Schneider et al. (1984), ces processus séquentiels engagés à travers la pratique seraient à l'origine de l'émergence des comportements complexes : chacune des séquences motrices apprises pouvant être utilisée comme élément dans la réalisation d'une séquence motrice plus complexe.

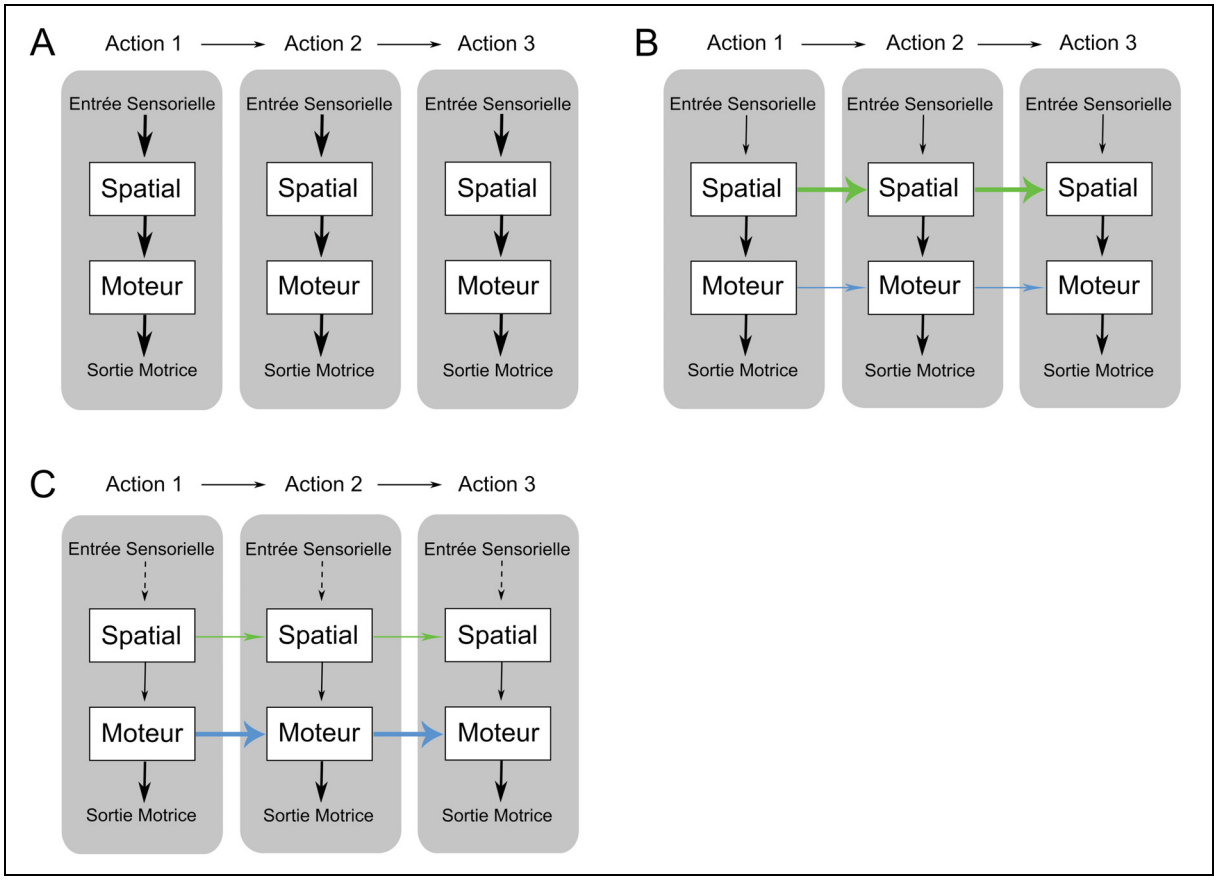


Figure 9. Changements hypothétiques des processus de codage de l'information au cours de l'apprentissage de séquences motrices – Extrait et traduit de Hikosaka et al. (1999). (A) représente le premier stade de pratique : les participants réalisent trois actions (Actions 1 – 3), l'une après l'autre, en procédant à des transformations d'informations sensori-motrices pour chaque action (connections verticales). En réalisant ces actions dans le même ordre, (B) et (C), les processus séquentiels se forment avec la pratique des actions (connections horizontales). La séquence est alors apprise selon différentes perspectives : codage des coordonnées visuo-spatiales (séquence spatiale – en vert) et des coordonnées motrices (séquence motrice – en bleu). L'acquisition des coordonnées spatiales de la séquence est rapide, apparaît tôt dans la pratique (B), alors que l'acquisition des coordonnées motrices de la séquence est plus lente, apparaît plus tard dans la pratique (C). Les flèches les plus épaisses indiquent les processus dominants dans chacun des deux niveaux de pratique (B et C).

En lien avec le modèle de Hikosaka et al. (1999), les auteurs esquissent dans ce modèle (2002), illustré sur la Figure 10, une représentation schématique détaillée de l'apprentissage de séquences motrices sur un plan à la fois comportemental et neurophysiologique. En accord avec les données issues de la littérature, ce modèle suggère que l'apprentissage de séquences motrices apparaît simultanément et indépendamment à deux niveaux : un premier niveau code les coordonnées visuo-spatiales de la séquence de mouvements (e. g., position spatiale de la partie distale du membre et/ou position séquentielle des cibles), alors qu'un second niveau code les cordonnées motrices (e. g., activation du pattern de muscles agoniste/antagoniste – angles articulaires).

Le code visuo-spatial est supposé se développer rapidement, sous une forme relativement abstraite (effecteur indépendant), consciemment (i. e., explicite), et être la représentation dominante tôt dans la pratique. Le code moteur est quant à lui supposé se développer plus lentement et de façon implicite, intégrant et représentant de manière plus efficace les aspects dynamiques du mouvement afin d'optimiser les capacités des effecteurs spécifiques (effecteur dépendant) utilisés pour produire la séquence ; il est également la représentation dominante tard dans la pratique.

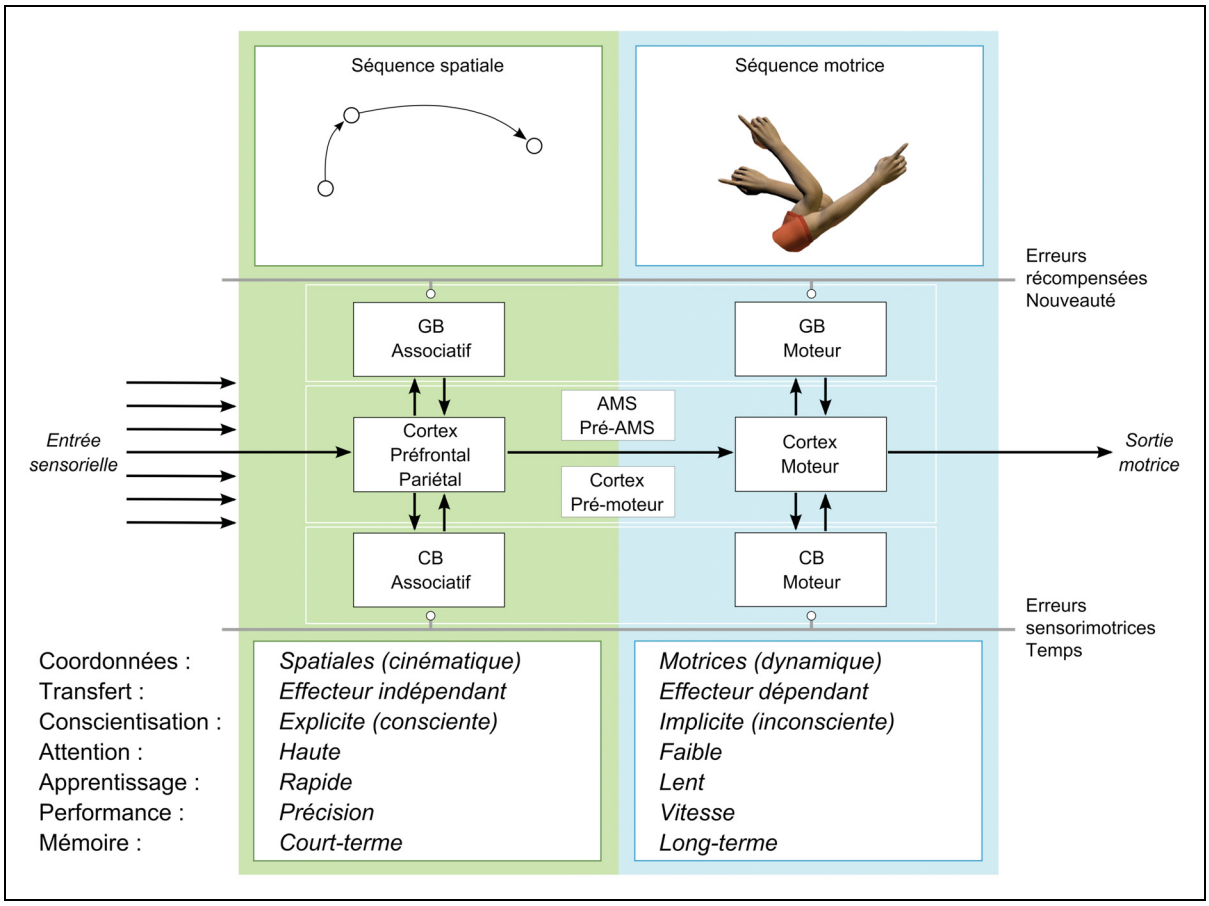


Figure 10. Représentation schématique de l'apprentissage de séquences motrices – Extrait et traduit de Hikosaka et al. (2002). L'apprentissage de séquences motrices est supposé fonctionner sur l'interaction des connections horizontales et verticales : connections sérielles intra-corticales (flèches horizontales) et circuits des boucles cortico-GB/cortico-CB (flèches verticlaes) ; GB = Ganglions de la Base, et CB = système Cérébelleux. Une séquence de mouvements est représentée sous deux formes : séquence spatiale et séquence motrice. La séquence spatiale est représentée sur le côté gauche de la figure (partie en vert), et la séquence motrice sur le côté droit de la figure (partie en bleu). Le cortex préfrontal-pariétal forme un circuit en boucle avec les régions associatives des ganglions de la base et du système cérébelleux, alors que le cortex moteur forme un circuit en boucle avec les régions motrices des ganglions de la base et du système cérébelleux. Au début de l'apprentissage, les mouvements sont exécutés individuellement grâce à des processus de conversion spatio-motrices (connections horizontales). A la fin de l'apprentissage, la séquence de mouvements est représentée selon au moins deux réseaux de coordonnées différents : une séquence spatiale supportée par la boucle du cortex préfrontal-pariétal et une séquence motrice supportée par la boucle du cortex moteur (connections verticales). Des signaux provenant des cortex préfrontal-pariétal et moteur sont envoyés aux différentes parties fonctionnelles des ganglions de la base et du système cérébelleux (flèches verticales). Dans les ganglions de la base, ils sont évalués sur leurs erreurs récompensées ou nouvelles ; dans le système cérébelleux, ils sont évalués sur leurs erreurs sensori-motrices ou temporelles (lignes grises). Ainsi, les mécanismes responsables de l'acquisition de la séquence spatiale et de la séquence motrice peuvent être améliorés de manière indépendante.

D'après ce modèle, le passage progressif avec la pratique d'une indépendance (e. g., Park & Shea, 2002 ; 2005 ; Kovacs, Müehlbauer & Shea, 2009) à une dépendance du système effecteur utilisé pour produire la séquence motrice (e. g., Bapi, Doya & Harner, 2000 ; Verwey & Wright, 2004 ; Verwey & Clegg, 2005) renseigne sur les capacités de transfert d'apprentissage. En effet, la représentation de la séquence acquise par l'apprenant au cours de la phase initiale d'apprentissage ne dépend pas du membre utilisé pour produire la séquence lors de la phase de pratique : la séquence peut ainsi être produite par le membre opposé lors d'un test de transfert sans provoquer une baisse de la performance. Au contraire, la dominance du code moteur dans la représentation de la séquence avec davantage de pratique induit une dépendance du système effecteur utilisé pour produire la séquence : la même séquence produite par le membre opposé lors d'un test de transfert entraînera une baisse des performances.

Ainsi, pour poursuivre les recherches dans un contexte théorique similaire d'apprentissage/transfert de séquences motrices, il nous apparaît légitime d'évaluer (Expérience 3) la cinématique du geste à partir de tâches « continues » et non plus de simples tâches de TRS comme dans la majorité des précédentes études. En effet, alors que les tâches de TRS fournissent des données sur l'apprentissage et la représentation des séquences motrices, les tâches de mouvements continus permettent une analyse du pattern de mouvement produit, incluant les transitions entre les éléments, ce qui n'est pas possible avec des tâches motrices de type « presse-boutons ». Pour cela, nous avons utilisé dans cette troisième expérience un paradigme expérimental particulier : une tâche de mouvement de bras où les participants devaient produire des mouvements de flexion-extension du bras en manipulant un levier. Cette tâche devrait fournir des données complémentaires sur l'apprentissage et la représentation des séquences motrices, et plus particulièrement sur l'évolution du pattern de mouvement produit avec la pratique (i. e., mise en place des « chunks ») et sur les capacités de transfert du pattern de mouvement.

Pour évaluer l'apprentissage et la représentation des séquences motrices, nous avons utilisé dans notre étude des tests de rétention et transferts inter-manuels (visuo-spatial et moteur) après 1 et 2 jours de pratique sur une séquence répétée à 16 éléments. Lors du test de rétention, les conditions de pratique étaient identiques à celles de la phase d'acquisition (e. g., localisation spatiale des cibles et activation du pattern de flexion-extension identiques à ceux requis en phase d'acquisition). Basés sur les modèles d'Hikosaka et al. (1999 ; 2002), les tests de transfert visuo-spatial et moteur sont supposés évaluer la nature des représentations de la

séquence motrice à différents stades de pratique (i. e., après 1 et 2 jours de pratique). Le test de transfert visuo-spatial repose sur l'activation d'un pattern de flexion-extension opposé à celui requis lors de la phase d'acquisition ; l'organisation spatiale des cibles était similaire à celle présentée lors de la phase de pratique, mais les participants devaient réaliser la tâche avec le bras non-dominant (i. e., bras gauche). Le test de transfert moteur repose quant à lui sur l'activation d'un pattern de flexion-extension identique à celui requis lors des phases d'acquisition et de rétention ; l'organisation spatiale des cibles était inversée par rapport à la séquence présentée au cours de la phase de pratique (séquence « miroir »), et les participants devaient également réaliser la tâche avec le bras non-dominant.

En accord avec les prédictions des modèles d'Hikosaka et al. (1999 ; 2002), nous faisons l'hypothèse d'un passage progressif d'un codage de type visuo-spatial et effecteur indépendant tôt dans la pratique (après 1 jour), à un codage de type moteur et effecteur dépendant avec plus de pratique (après 2 jours). En résumé, après 1 jour de pratique, des performances supérieures devraient être observées sur les tests de rétention et transfert visuo-spatial par rapport au transfert moteur ; après 2 jours de pratique, une dégradation des performances sur le test visuo-spatial, et à l'inverse une amélioration des performances sur les tests de rétention et transfert moteur devraient induire de meilleures performances sur les tests de rétention et transfert moteur par rapport au transfert visuo-spatial.

CHAPITRE 4

Objectifs expérimentaux :

Les travaux présentés dans la partie théorique reposent sur deux axes principaux : l'effet d'interférence contextuelle et la nature des représentations sensori-motrices dans l'acquisition d'une tâche motrice. Sur la base du système de classification des habiletés proposé par Schmidt (1988), nous nous sommes intéressé dans ce travail de thèse à l'apprentissage et au transfert de tâches motrices discrètes à continues (Expériences 1 à 3).

Expériences 1 et 2 :

L'objectif de ces deux études portait sur l'effet IC. Basés sur les travaux de Battig (1972 ; 1979) issus du domaine verbal, nous avons manipulé les facteurs conditions de pratique et similarité des tâches comme sources potentielles d'interférence. Dans un premier temps, l'objectif était de répliquer et d'étendre les résultats de Battig au domaine moteur : amélioration de l'apprentissage moteur après une pratique sous condition aléatoire et/ou une pratique de tâches ayant un haut niveau de similarité. Dans un second temps, nous avons testé différentes conditions expérimentales pour manipuler le facteur similarité : les variations de tâches portaient sur des caractéristiques temporelles dans l'Expérience 1, et sur des caractéristiques spatiales dans l'Expérience 2. Enfin, sur la base des travaux de Shea et al. (1990), nous avons également souhaité dans l'Expérience 2 contrôler le niveau IC en fonction de la quantité de pratique. Les résultats des Expériences 1 et 2 sont discutés en lien avec les hypothèses d'élaboration (Shea & Morgan, 1979 ; Shea & Zimny, 1983), de reconstruction (Lee & Magill, 1983), et de « challenge point » (Guadagnoli & Lee, 2004).

Expérience 3 :

Les objectifs de cette expérience étaient de contribuer à la compréhension des processus de codage et de stockage des séquences motrices, et d'évaluer la nature des représentations sensori-motrices dans l'apprentissage des séquences. Nous avons utilisé un dispositif particulier, permettant à la fois des mesures discrètes et continues de la performance : tâche continue de flexion-extension du bras. L'utilisation de cette tâche devait

permettre dans un premier temps de répliquer les résultats issus de la littérature sur des tâches de TRS en ce qui concerne l'apprentissage et la représentation des séquences motrices ; dans un second temps d'apporter des données complémentaires sur l'évolution du pattern de mouvement produit avec la pratique, et également sur les capacités de transfert de séquences motrices continues. L'apprentissage et la nature des représentations sensori-motrices des séquences sont discutés en lien avec les modèles d'Hikosaka et al. (1999 ; 2002).

– DEUXIEME PARTIE –

PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE 5

Effet d'interférence contextuelle et apprentissage moteur : contributions des facteurs Condition de pratique, Similarité des tâches et Quantité de pratique.

Dans un contexte d'apprentissage moteur, augmenter le niveau d'interférence créé au cours de la phase de pratique produit dans un premier temps des effets délétères sur la performance immédiate de l'apprenant puis, dans un second temps, améliore les performances lors des tests de rétention/transfert (Shea & Morgan, 1979 ; voir Magill et Hall, 1990, pour une revue). En contrastant la pratique de différentes tâches motrices dans une situation à faible niveau d'interférence (i. e., pratique bloquée) et à niveau d'interférence élevé (i. e., pratique aléatoire), Shea et Morgan (1979) ont révélé l'existence de cet effet paradoxal nommé « effet d'interférence contextuelle » dans le domaine moteur.

L'effet IC, généralement induit par la manipulation du facteur condition de pratique (e. g., Shea & Morgan, 1979 ; Shea & Zimny, 1983 ; 1988 ; Magill & Hall, pour une revue), n'est cependant pas le seul facteur susceptible de moduler le niveau d'interférence créé lors de la phase de pratique. En effet, selon Battig (1972 ; 1979), le niveau de similarité entre les variations de tâches à apprendre influence également le niveau IC. Battig (1979) suggère que « le degré d'interférence contextuelle est fonction de la difficulté de la tâche », où plus une tâche est difficile et plus le niveau IC augmente. Autrement dit, en augmentant le niveau de similarité entre les tâches à pratiquer on augmente le niveau de difficulté de la tâche, créant ainsi un haut niveau IC favorable à l'apprentissage de la tâche. Toutefois, la notion de « similarité » utilisée dans les travaux de Battig fait essentiellement référence aux caractéristiques sémantiques des mots à apprendre. Cette définition ne s'applique donc pas directement au domaine de l'apprentissage moteur ; définir le terme « similarité des tâches » dans le domaine moteur reste donc un point majeur à prendre en considération.

Les rares études ayant à ce jour investigué le facteur « similarité des tâches » dans le domaine moteur ont essentiellement manipulé les caractéristiques invariantes du geste, considérant qu'un haut niveau de similarité (i. e., condition similaire) entre les tâches à apprendre est obtenu lorsque les variations conservent les mêmes caractéristiques invariantes du geste (e. g., Lee, Wulf, & Schmidt, 1992 ; Wood & Ging, 1991). Une telle conception de la similarité des tâches fait directement référence à la proposition de Magill et Hall (1990)

concernant l'obtention d'un effet IC. En effet, si pour Magill et Hall (1990) l'effet IC dû à la manipulation du facteur condition de pratique est obtenu lorsque les variations de tâches portent sur les caractéristiques invariantes du geste, alors l'effet IC dû à la manipulation du facteur similarité des tâches devrait également être obtenu lorsque les variations de tâches portent sur les caractéristiques invariantes du geste. Néanmoins, bien que cette proposition ait reçu quelques supports expérimentaux (e. g., Wood et Ging, 1991 ; Lee, Wulf & Schmidt, 1992), d'autres études ont toutefois observé un effet IC dû à la condition de pratique lorsque les variations de tâches ne portaient pas sur les caractéristiques invariantes du geste (e. g., Shea, Kohl & Indermill 1990 ; Sekiya, Magill, Sidaway & Anderson, 1994 ; Sekiya, Magill & Anderson, 1996 ; Young, Cohen & Husak, 1993). Notons toutefois que Shea et al. (1990) ont obtenu l'effet IC après une quantité de pratique suffisante : mise en évidence d'une évolution progressive des stratégies d'encodage au cours de la pratique sous condition aléatoire (i. e., processus inter-tâches).

Ainsi, sur la base des résultats précédemment cités, nous avons souhaité apporter des données expérimentales nouvelles et complémentaires sur la notion de « similarité » dans le domaine moteur en manipulant les facteurs condition de pratique, similarité des tâches et quantité de pratique, lorsque les variations de tâches portent sur les caractéristiques paramétriques du geste : temporelles (Expérience 1) et spatiales (Expérience 2).

L'objectif principal de cette étude (Expériences 1 et 2) était de combiner les facteurs condition de pratique et similarité des tâches, considérés comme sources potentielles d'interférence, afin de répliquer et d'étendre les résultats de Battig (1972 ; 1979) au domaine moteur. Une augmentation de l'interférence devrait être observée lors de la pratique de tâches à haut niveau de similarité (i. e., condition *similaire*) et/ou lors d'une pratique sous condition aléatoire, et se traduire par une amélioration de l'apprentissage. Une interaction entre les trois facteurs condition de pratique, similarité des tâches et quantité de pratique est également attendue : une faible différence bloquée-aléatoire devrait être observée en rétention/transfert après une phase d'acquisition courte dans les conditions *non-similaire* et *similaire*, voire inexistante dans la condition *similaire* ; à l'inverse, après une phase d'acquisition longue, une différence bloquée-aléatoire importante devrait être observée dans la condition *similaire* comparée à la condition *non-similaire* en rétention/transfert.

EXPERIENCE 1 :

Dans cette première expérience, les variations de tâches portaient sur les caractéristiques temporelles du geste, et plus particulièrement sur le temps de mouvement total (TMT). Un haut niveau de similarité entre les tâches était caractérisé par une faible variation entre les TMT (i. e., variation de 100 ms entre chaque TMT), alors qu'un faible niveau de similarité était caractérisé par une variation plus importante entre les TMT (i. e., variation de 300 ms entre chaque TMT). Le timing relatif (nommé « timing naturel ») étant supposé se manifester naturellement dès les premiers essais de pratique pour ce type de tâches (Blandin, Lhuisset & Proteau, 1999), nous avons choisi de ne pas imposer de contraintes temporelles aux participants. Pour s'assurer qu'un seul et même pattern de mouvement ait été adopté par l'ensemble des participants (i. e., un seul PMG) au cours de la phase d'acquisition, le temps de mouvement requis pour parcourir chaque segment de la tâche a été mesuré pour analyser a posteriori le timing relatif des participants.

1. Méthode :

Soixante participants déclarés droitiers (âge moyen = 22.2 ans ± 2.6) ont volontairement participé à cette expérience. Aucun d'entre eux n'était familier avec la tâche et n'avait été informé sur le but de cette étude. Au préalable, chaque participant a dû remplir et signer une fiche d'information individuelle témoignant de son consentement à participer à cette expérience.

a) Tâche et dispositif expérimental :

Le dispositif expérimental, illustré sur la Figure 1, était similaire à celui proposé dans l'expérience de Badets et Blandin (2005). Il était composé d'une base en bois (50 x 50 cm) et de neuf boutons poussoirs (2.5 cm de diamètre) disposés en trois rangées de trois boutons chacune (20 cm entre chaque bouton). Tous les boutons étaient connectés à un ordinateur pour la mesure et le stockage des temps de mouvement. Le bouton central situé sur la première rangée (proximale au participant – bouton « A » sur la Figure 1) constituait la base de départ. Le bouton de fin de mouvement était quant à lui situé à l'extrémité droite sur la dernière rangée (la plus éloignée du participant – bouton « D » sur la Figure 1). Les participants étaient assis sur une chaise face à une table supportant le dispositif expérimental et l'écran

d'ordinateur. La position de la chaise devait être ajustée par le participant afin qu'il soit confortablement installé pour réaliser la tâche avec sa main droite.

La tâche consistait à presser quatre boutons dans un ordre préétabli (voir Figure 1) tout en respectant le plus précisément possible des temps de mouvement (TM) imposés par l'expérimentateur. Le TM était mesuré par un chronomètre informatique à partir du lâcher de la base de départ jusqu'au contact de la base d'arrivée. Trois temps de mouvements étaient pratiqués dans chaque condition expérimentale : 900-1000-1100 ms dans la condition *similaire* et 700-1000-1300 ms dans la condition *non-similaire*.

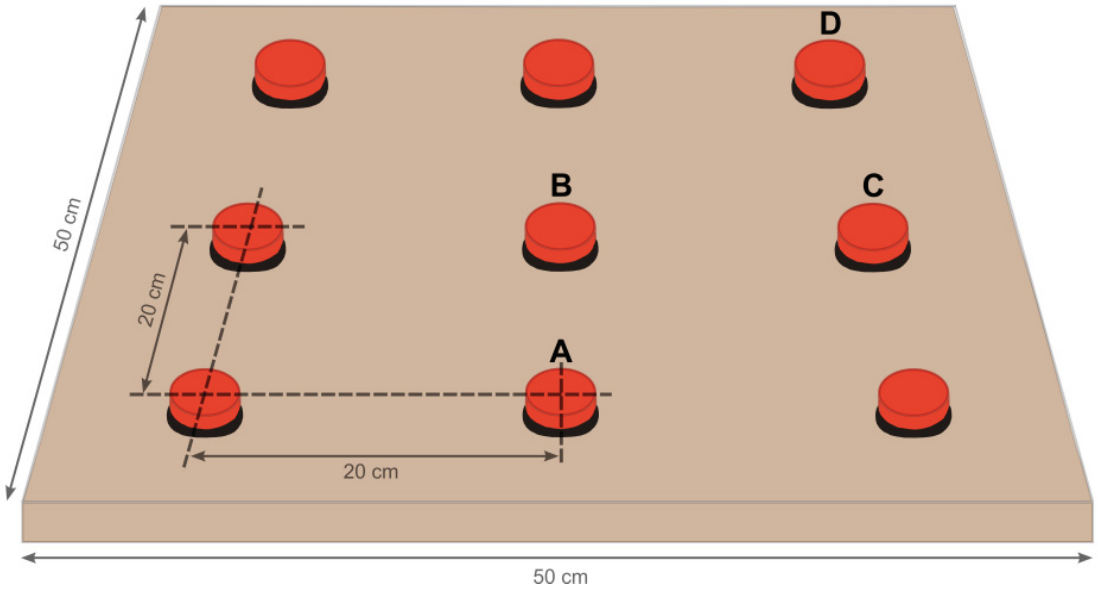


Figure 1. Illustration du dispositif expérimental. La tâche consistait à presser successivement quatre boutons selon un ordre préétabli : « A », « B », « C » et « D » ; « A et D » désignant respectivement les bases de départ et d'arrivée.

b) Groupes expérimentaux et procédure :

Dès leur arrivée, les participants ont été assignés de manière aléatoire dans une des quatre conditions expérimentales ($N = 15$). Les quatre groupes indépendants constitués étaient différenciés par leur condition de pratique (bloquée *vs.* aléatoire) et par le niveau de similarité entre les TM à pratiquer (similaire *vs.* non-similaire) : Aléatoire-Similaire, Aléatoire-Non similaire, Bloquée-Similaire et Bloquée-Non similaire. Pour tous les participants l'expérience s'est déroulée sur deux jours consécutifs et était composée de quatre phases expérimentales (Tableau 1) : (a) une phase d'acquisition le Jour 1, (b) un test de rétention et (c, d) deux tests de transfert le Jour 2.

Tableau 1. Récapitulatif des phases et groupes expérimentaux.

			Transferts	
Groupes	**Acquisition**	**Rétention**	**Inférieur** **(600 ms)**	**Supérieur** **(1400 ms)**
Aléatoire Non-similaire	99 essais	12 essais	6 essais	6 essais
Aléatoire Similaire	99 essais	12 essais	6 essais	6 essais
Bloquée Non-similaire	99 essais	12 essais	6 essais	6 essais
Bloquée Similaire	99 essais	12 essais	6 essais	6 essais
	Jour 1	*Jour 2*		

Les participants ont été testés individuellement dans une pièce obscure et silencieuse. A leur arrivée dans la salle expérimentale, chaque participant recevait des instructions écrites et verbales sur le déroulement de la tâche.

L'ensemble des participants a réalisé une phase d'acquisition de 99 essais (33 essais pour chacun des trois TM). Dans le cas de la pratique bloquée, le premier TM était répété successivement trente-trois fois avant de passer au TM suivant (l'ordre de présentation des différents TM dans la condition bloquée a été contrebalancé entre les participants). En revanche, dans le cas de la pratique aléatoire, 33 essais de chacun des trois TM ont été pratiqués alternativement et de manière non systématique tout au long de la phase d'acquisition, avec la contrainte de ne jamais avoir plus de deux essais consécutifs avec un même TM. L'expérimentateur informait verbalement le participant sur le TM à réaliser au début de chaque essai. Une connaissance du résultat (CR) sur le TM réalisé par le participant lui était également fournie verbalement par l'expérimentateur à la fin de chaque essai.

Approximativement 24 heures après la fin de la phase d'acquisition ont été administrées des phases de rétention et de transferts. Les participants ont réalisé dans un premier temps la phase de rétention puis les deux tests de transfert après un délai de 5 minutes. Le test de rétention était composé d'un bloc de 12 essais sur le TM commun à l'ensemble des participants lors de la phase d'acquisition : 12 essais avec un TM de 1000 ms. Chacun des deux tests de transfert comportait 6 essais de pratique sur un nouveau TM : un TM de 600 ms pour le transfert inférieur (T1) et un TM de 1400 ms pour le transfert supérieur

(T2). L'ordre d'administration des deux tests de transfert a été contrebalancé entre les participants de chaque groupe expérimental. Aucune CR n'a été fournie aux participants durant les tests de rétention/transferts. A nouveau, l'expérimentateur informait verbalement le participant sur le TM à réaliser au début de chaque essai.

Si malencontreusement un essai était erroné, par une erreur de pression sur un bouton ou par une hésitation démesurée de la part du participant, l'essai en question était renouvelé aussitôt.

c) Analyse des données :

Pour évaluer la précision et la variabilité des réponses, les variables dépendantes utilisées dans cette expérience étaient l'Erreur Constante Absolue (|CE|) et l'Erreur Variable (EV). L'erreur constante absolue, exprimée en millisecondes (ms), fournit un indice général de la précision des participants par rapport au but demandé. Elle mesure la valeur absolue de l'erreur moyenne des réponses du participant. L'erreur variable renseigne quant à elle sur la variabilité des performances des participants. Elle est égale à l'écart-type de la distribution des scores par rapport à la moyenne de la distribution des scores.

Les analyses de variances (ANOVA) ont été réalisées sur 11 blocs de 9 essais en phase d'acquisition, sur 1 bloc de 12 essais pour la phase de rétention et sur 1 bloc de 6 essais pour chacune des deux phases de transfert.

Une première analyse portait sur la phase d'acquisition. Pour chacune des variables dépendantes (|EC| et EV), l'ANOVA a été réalisée selon le plan 2 × 2 × 3 × 11 (Condition de pratique × Similarité × TM × Bloc) avec mesures répétées sur les deux derniers facteurs. Une seconde analyse portait sur les phases de rétention et de transferts. Les variables dépendantes ont été analysées selon le plan 2 × 2 (Condition de pratique × Similarité) pour le test de rétention, et le plan 2 × 2 × 2 (Condition de pratique × Similarité × Test) pour les tests de transfert. Tous les résultats significatifs à $p < .05$ ont été rapportés. Les comparaisons post-hoc des moyennes ont été réalisées par un test de Newman-Keuls. Aucune analyse n'a été réalisée sur les erreurs produites (un maximum de 2-3% d'erreurs au total).

2. Résultats :

a) Phase d'acquisition :

Pour la variable |CE|, l'analyse révèle un effet principal du facteur Condition de pratique, $F(1,56) = 12.02$, TM, $F(2,112) = 16.02$, Bloc, $F(10,560) = 20.33$, ainsi qu'une interaction Condition de pratique × Similarité, $F(1,56) = 11.36$, $ps < .05$[7]. La Figure 2A illustre la variable |CE|. Pour le facteur Condition de pratique, l'analyse indique que les performances des groupes sous condition bloquée (|CE| moyen = 50.86 ms) sont supérieures à celles obtenues par les groupes sous condition aléatoire (65.57 ms). Pour le facteur TM, l'analyse révèle que l'erreur temporelle augmente avec la durée du mouvement à réaliser. Les participants sont significativement plus précis sur les TM courts de 700-900 ms (48.42 ms) que sur les TM longs de 1100-1300 ms (67.77 ms). Le TM de 1000 ms (58.45 ms) diffère lui aussi significativement avec les TM courts et longs. L'effet principal du facteur Bloc indique une diminution de |CE| du Bloc 1 (88.38 ms) au Bloc 4 (54.40 ms) lors de la phase de pratique. L'interaction Condition de pratique × Similarité révèle une différence bloquée-aléatoire uniquement dans la condition *non-similaire* : les performances du groupe de pratique bloquée sont significativement supérieures (48.38 ms) à celles du groupe de pratique aléatoire (77.39 ms). Aucune différence bloquée-aléatoire n'apparaît dans la condition *similaire* (respectivement 53.34 et 53.75 ms). Notons que les performances du groupe de pratique aléatoire dans la condition *non-similaire* (77.39 ms) sont également significativement inférieures à celles des groupes de pratique bloquée et aléatoire dans la condition *similaire* (respectivement 53.34 et 53.75 ms).

Pour la variable EV, l'analyse révèle un effet principal du facteur Condition de pratique, $F(1,56) = 39.75$, Similarité, $F(1,56) = 12.81$, TM, $F(2,112) = 69.94$, Bloc, $F(10,560) = 6.71$, ainsi qu'une interaction Condition de pratique × Similarité, $F(1,56) = 7.48$, $ps < .05$[8]. La Figure 2B illustre la variable EV. Pour le facteur Condition de pratique, l'analyse indique que les performances réalisées par les participants assignés à la condition de pratique aléatoire sont plus variables que celles des participants ayant pratiqué sous condition bloquée (respectivement 51.24 et 37.46 ms). Parallèlement, l'effet principal du facteur Similarité est le

[7] Pour la variable |CE|, une analyse spécifique sur le paramètre commun de 1000 ms lors de la phase d'acquisition indique des résultats identiques : mêmes effets principaux et interaction.

[8] Pour la variable VE, une analyse spécifique sur le paramètre commun de 1000 ms lors de la phase d'acquisition indique des résultats identiques : mêmes effets principaux et interaction.

résultat de performances moins variables pour les participants sous condition *similaire* (40.44 ms vs. 48.26 ms pour les participants sous condition *non-similaire*). Pour le facteur TM, l'analyse indique que la variabilité des performances augmente avec la durée du mouvement à réaliser. Les performances sont plus stables sur les TM courts de 700-900 ms (33.22 ms) que sur les TM longs de 1100-1300 ms (54.14 ms). Une différence significative est également observée entre le TM moyen de 1000 ms (45.70 ms) et les TM courts et longs. L'effet principal du facteur Bloc indique que les participants sont plus variables sur le premier bloc d'essais (59.59 ms) que sur le second (45.88 ms). L'analyse post-hoc de l'interaction Condition de pratique × Similarité révèle une différence bloquée-aléatoire dans les conditions *similaire* et *non-similaire*, avec une stabilité des performances supérieure pour les groupes sous pratique bloquée. Les résultats indiquent également une différence significative entre les deux groupes de pratique aléatoire : performances plus stables pour le groupe *aléatoire-similaire* (44.34 ms) comparé au groupe *aléatoire-non similaire* (58.14 ms). Aucune différence n'apparaît entre les groupes *bloquée-similaire* et *bloquée-non similaire*.

En résumé, un niveau IC élevé est observé pour le groupe *aléatoire-non similaire*. Contrairement à nos prédictions, la pratique de tâches à haut niveau de similarité n'induit pas une augmentation du niveau IC lors de la phase d'acquisition. De plus, de manière assez surprenante, aucune variation du niveau IC n'apparaît dans la condition *similaire* entre les groupes de participants sous condition bloquée et aléatoire : leurs niveaux IC respectifs étant par ailleurs semblables au niveau IC créé par le groupe de pratique bloquée dans la condition *non-similaire*.

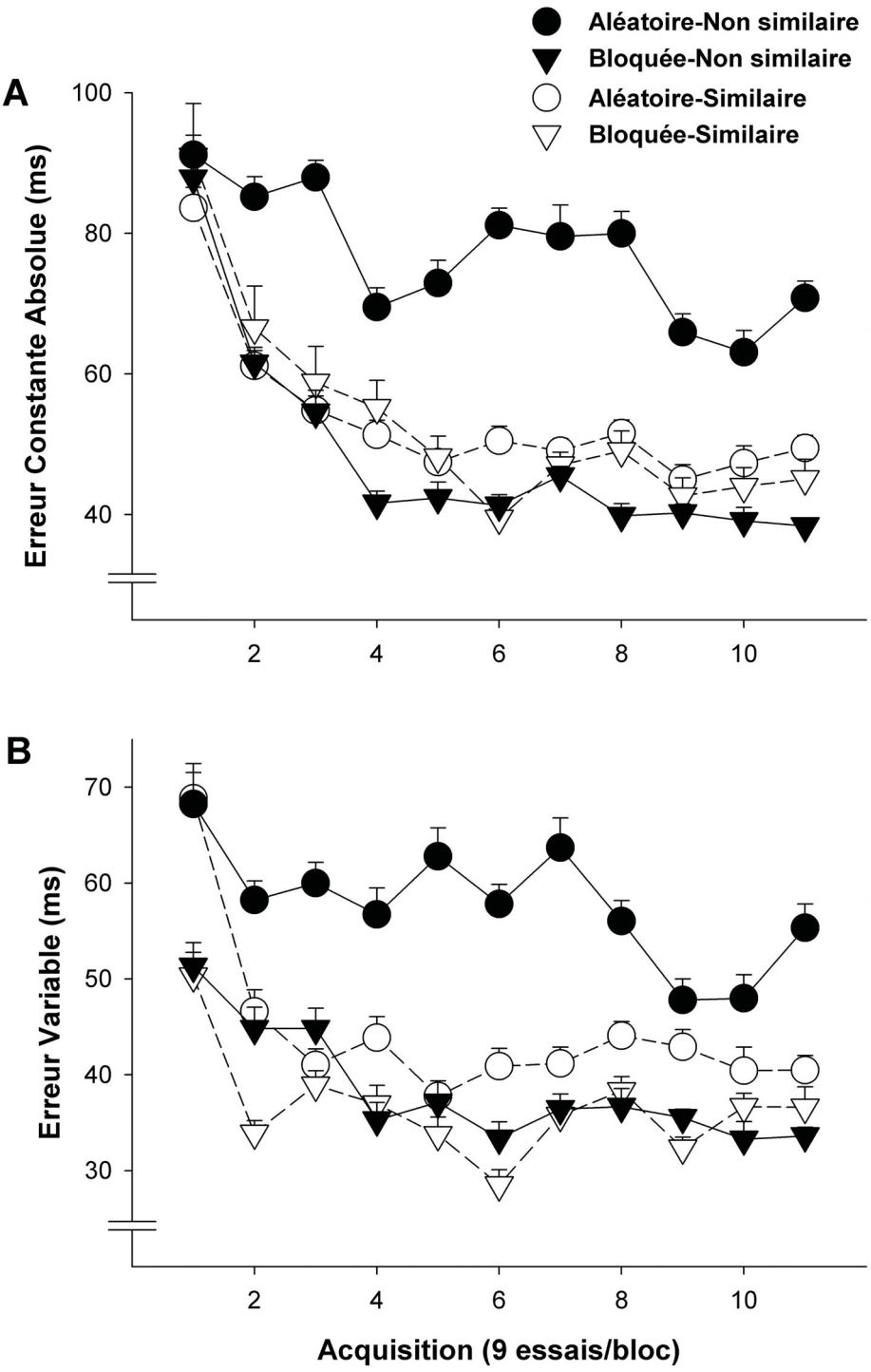


Figure 2. Erreur Constante Absolue (A) et Erreur Variable (B) pour les quatre conditions expérimentales au cours de la phase d'acquisition (Blocs 1 à 11).

b) Phase de rétention :

L'analyse de la variable |CE| révèle un effet principal du facteur Condition de pratique, $F(1,56) = 4.06$, et une interaction Condition de pratique × Similarité, $F(1,56) = 4.95$, $ps < .05$. La Figure 3A illustre la variable |CE|. L'analyse du facteur Condition de pratique indique que les performances obtenues par les participants ayant pratiqué sous condition aléatoire sont supérieures (|CE| moyen = 87.69 ms) à celles obtenues par leurs homologues sous condition bloquée (118.58 ms). Toutefois, l'interaction ne révèle une différence bloquée-aléatoire que dans la condition *non-similaire* : les performances du groupe de pratique aléatoire sont significativement supérieures (83.41 ms) à celles du groupe de pratique bloquée (148.38 ms). Aucune différence bloquée-aléatoire n'apparaît dans la condition *similaire* (respectivement 88.77 et 91.97 ms). Autrement dit, l'effet IC obtenu dans cette étude n'apparaît que dans le cas d'une pratique de tâches ayant un faible niveau de similarité.

L'analyse de la variable EV ne révèle aucun effet principal ni interaction. La Figure 3B illustre la variable EV.

c) Phases de transferts :

L'analyse de la variable |CE| indique un effet principal du facteur Condition de pratique, $F(1,56) = 30.11$, Similarité, $F(1,56) = 10.03$, Test, $F(1,56) = 10.40$, et une interaction Condition de pratique × Similarité, $F(1,56) = 4.18$, $ps < .05$. La Figure 3A illustre la variable |CE|. L'analyse du facteur Condition de pratique révèle que les performances des groupes sous condition aléatoire sont supérieures à celles des groupes sous condition bloquée (respectivement 112.61 et 185.99 ms). Pour le facteur Similarité, l'analyse indique que les performances des participants ayant pratiqué sous condition *non-similaire* (128.12 ms) sont supérieures à celles de leurs homologues ayant pratiqué sous condition *similaire* (170.48 ms). L'analyse du facteur Test révèle que les performances réalisées sur le transfert inférieur (T1) sont supérieures à celles réalisées sur le transfert supérieur (T2) (respectivement 121.96 et 176.65 ms). Enfin, les comparaisons post-hoc pour l'interaction Condition de pratique × Similarité révèlent que les performances des participants sous condition aléatoire sont significativement supérieures à celles des participants sous condition bloquée et ce, indépendamment du niveau de similarité entre les tâches : différences bloquée-aléatoire dans les conditions *similaire* (respectivement 220.84 et 120.12 ms) et *non-similaire*

(respectivement 151.13 et 105.11 ms). Notons toutefois que l'interaction se traduit par des performances significativement supérieures pour le groupe *bloquée-non similaire* (151.13 ms) comparé au groupe *bloquée-similaire* (220.84 ms).

L'analyse de la variable EV révèle un effet principal du facteur Test, $F(1,56) = 84.66$, $p < .05$, indiquant une plus grande stabilité des performances sur le test de transfert inférieur (T1) comparé au transfert supérieur (T2) (respectivement 22.46 et 52.45 ms). La Figure 3B illustre la variable EV.

En résumé, les résultats observés sur le test de rétention révèlent l'obtention d'un effet IC dû à la condition de pratique lorsque les variations de tâches partagent un faible niveau de similarité. A l'inverse, aucune différence bloquée-aléatoire n'apparaît dans la condition *similaire* au cours des phases d'acquisition et de rétention. Un autre résultat important concerne les capacités de transfert d'apprentissage. En effet, les résultats indiquent que les participants ayant pratiqué sous condition aléatoire et/ou dans la condition *non-similaire* obtiennent des performances supérieures lors des tests de transferts ; la pratique de tâches « similaires » se révèle donc être une condition favorable à l'apprentissage, mais au contraire néfaste au transfert d'apprentissage.

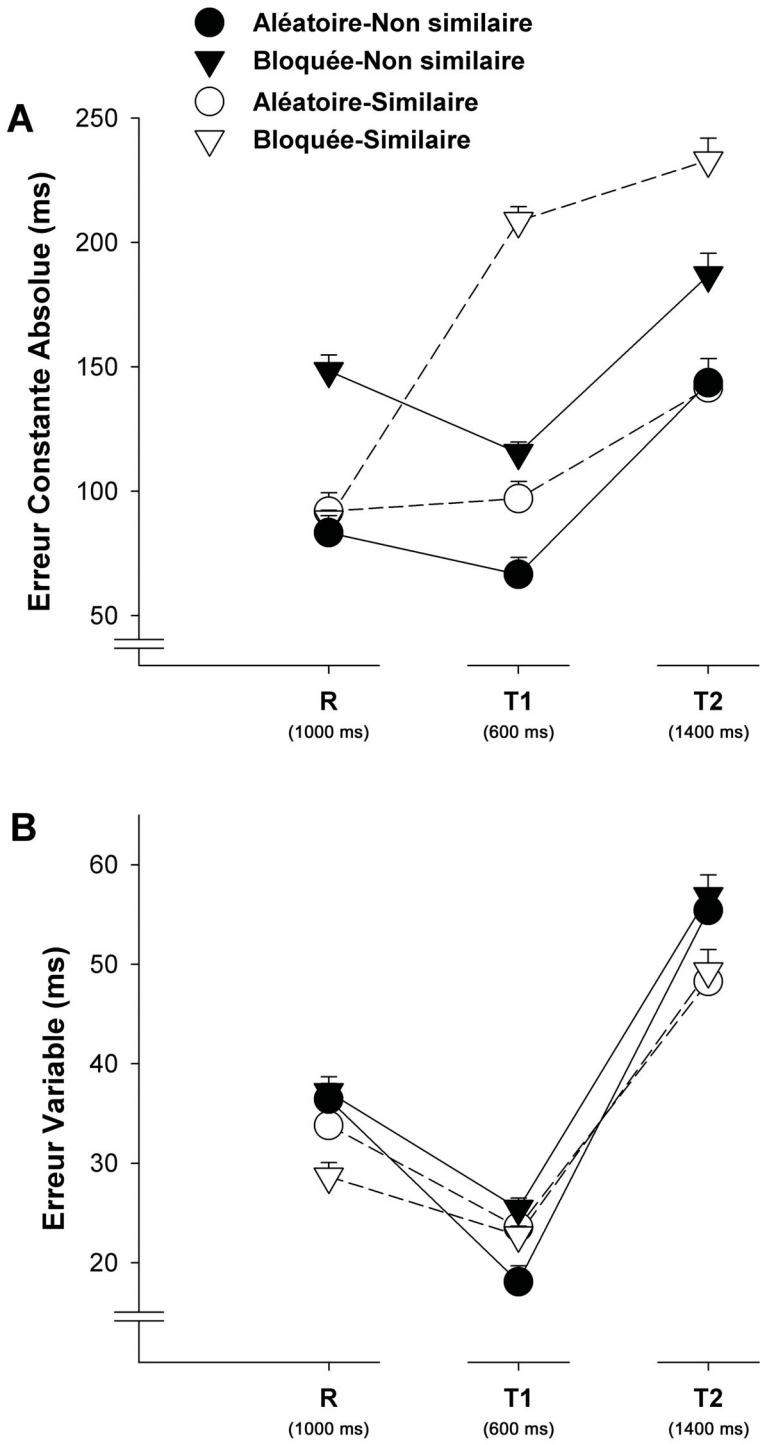


Figure 3. Erreur Constante Absolue (A) et Erreur Variable (B) pour les tests de rétention (R), transfert inférieur (T1), et transfert supérieur (T2).

d) Temps relatif moyen :

Pour vérifier si un même timing relatif (i. e., « timing naturel ») a été adopté pour chaque groupe expérimental dans cette étude, nous avons procédé au calcul du temps relatif moyen (exprimé en pourcentage du temps de mouvement total) sur chaque segment, ainsi qu'au calcul de la variabilité intra- et inter-participants. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2 : (A) acquisition (Bloc 1), (B) acquisition (Bloc 11), (C) rétention, (D) transfert inférieur et (E) transfert supérieur. Les analyses statistiques ne révèlent aucune différence de timing relatif entre les groupes au cours des différentes phases expérimentales. Les résultats indiquent que les participants adoptent un « timing naturel » commun pour réaliser la tâche et ce, tout au long de la phase de pratique (i. e., du Bloc 1 au Bloc 11). En d'autres termes, les variations de tâches ne portent donc que sur les caractéristiques paramétriques du geste dans cette expérience.

Tableau 2. Temps relatif moyen (TRM) sur chaque segment pour les phases d'acquisition (A et B, respectivement Bloc 1 et Bloc 11), (C) rétention, (D) transfert inférieur, et (E) transfert supérieur. EV intra = Erreur Variable intra-participants ; EV inter = Erreur Variable inter-participants.

A Acquisition (Bloc 1)

		Segments		
Groupes	Variables	1	2	3
Aléatoire	TRM (%)	**24.06**	**36.02**	**39.92**
Non-Similaire	EV intra	1.54	1.61	2.32
	EV inter	2.15	2.00	1.53
Aléatoire	TRM (%)	**24.88**	**35.57**	**39.55**
Similaire	EV intra	1.58	2.03	2.59
	EV inter	2.30	2.10	2.71
Bloquée	TRM (%)	**25.60**	**35.05**	**39.35**
Non-Similaire	EV intra	1.28	1.40	1.68
	EV inter	1.54	1.55	1.76
Bloquée	TRM (%)	**25.71**	**35.22**	**39.07**
Similaire	EV intra	1.29	1.38	1.59
	EV inter	2.73	1.69	1.33

B Acquisition (Bloc 11)

		Segments		
Groupes	Variables	1	2	3
Aléatoire	TRM (%)	**25.20**	**36.01**	**39.00**
Non-Similaire	EV intra	1.56	1.82	2.23
	EV inter	3.36	2.59	1.82
Aléatoire	TRM (%)	**25.84**	**34.37**	**39.60**
Similaire	EV intra	1.33	1.41	1.97
	EV inter	2.98	1.62	3.58
Bloquée	TRM (%)	**27.18**	**34.35**	**38.45**
Non-Similaire	EV intra	1.18	1.24	1.39
	EV inter	1.81	1.49	1.71
Bloquée	TRM (%)	**26.87**	**34.49**	**38.62**
Similaire	EV intra	1.18	1.23	1.41
	EV inter	2.39	1.67	1.36

C Rétention (1000 ms)

		Segments		
Groupes	Variables	1	2	3
Aléatoire	TRM (%)	**24.58**	**36.37**	**39.04**
Non-Similaire	EV intra	1.14	1.24	1.53
	EV inter	2.86	2.29	1.97
Aléatoire	TRM (%)	**24.78**	**35.89**	**39.32**
Similaire	EV intra	1.09	1.50	1.68
	EV inter	3.29	2.07	2.66
Bloquée	TRM (%)	**26.53**	**35.10**	**38.35**
Non-Similaire	EV intra	1.21	1.22	1.54
	EV inter	2.56	1.42	1.80
Bloquée	TRM (%)	**25.91**	**35.45**	**38.63**
Similaire	EV intra	0.98	0.94	1.22
	EV inter	1.92	1.77	1.12

D Transfert inférieur (600 ms)

		Segments		
Groupes	Variables	1	2	3
Aléatoire	TRM (%)	**26.39**	**35,00**	**38.6**
Non-Similaire	EV intra	1.38	1.20	1.19
	EV inter	2.10	2.43	1.22
Aléatoire	TRM (%)	**25.87**	**35.05**	**39.07**
Similaire	EV intra	0.97	1.06	1.26
	EV inter	2.24	1.63	2.08
Bloquée	TRM (%)	**27.37**	**34.57**	**38.04**
Non-Similaire	EV intra	1.24	1.15	1.37
	EV inter	1.63	1.59	1.12
Bloquée	TRM (%)	**26.15**	**35.1**	**38.74**
Similaire	EV intra	1.10	1.05	1.19
	EV inter	2.14	1.81	1.18

E Transfert supérieur (1400 ms)

		Segments		
Groupes	Variables	1	2	3
Aléatoire	TRM (%)	**22.28**	**37.06**	**40.65**
Non-Similaire	EV intra	1.55	1.68	1.89
	EV inter	2.41	2.77	2.39
Aléatoire	TRM (%)	**24.05**	**35.79**	**40.14**
Similaire	EV intra	1.16	1.44	1.77
	EV inter	2.38	2.60	2.75
Bloquée	TRM (%)	**25.25**	**35.14**	**39.6**
Non-Similaire	EV intra	1.59	1.33	1.76
	EV inter	2.19	2.87	2.41
Bloquée	TRM (%)	**25.23**	**35.56**	**39.19**
Similaire	EV intra	1.45	1.46	1.75
	EV inter	2.59	1.54	1.90

3. Discussion :

L'objectif principal de cette première expérience était de créer différents niveaux d'IC en manipulant dans une même expérience les facteurs condition de pratique et similarité des tâches ; ces deux facteurs étant initialement proposés par Battig (1972 ; 1979) comme sources potentielles d'interférence dans le domaine verbal. Nos résultats révèlent que le niveau IC généralement créé par la condition de pratique interagit avec le niveau de similarité entre les tâches. En accord avec les résultats de Wood et Ging (1991), aucune différence bloquée-aléatoire n'a été obtenue dans la condition *similaire* lors des phases d'acquisition et de rétention. Ainsi, contrairement aux prédictions de Battig (1972 ; 1979), dans le domaine de l'apprentissage moteur la pratique de tâches « similaires » n'augmente pas le niveau IC, comparée à la pratique de tâches « non-similaires ». Néanmoins, et en accord avec les résultats des précédentes études où seul le facteur condition de pratique était utilisé comme source principale d'interférence (e. g., Lee & Magill, 1983 ; 1985 ; Shea & Morgan, 1979 ; Shea & Zimny, 1983), un effet IC dû au facteur condition de pratique a été obtenu dans la condition *non-similaire* : le groupe de pratique aléatoire obtient des performances inférieures au cours de la phase d'acquisition mais des performances supérieures à celle du groupe de pratique bloquée en phases de rétention/transferts. De façon surprenante, les effets délétères de la pratique bloquée sur les performances des participants en rétention ne s'observent que dans la condition *non-similaire* : performances identiques en rétention pour les participants ayant pratiqué sous condition bloquée et aléatoire lorsque les variations de tâches partagent un niveau de similarité élevé.

D'un point de vue théorique, ces résultats suggèrent que pour une même condition de pratique, l'absence/obtention d'un effet IC lors du test de rétention suppose l'utilisation de différentes stratégies d'encodage en fonction du degré de similarité entre les tâches ; dans le domaine moteur, le facteur similarité des tâches peut donc être considéré comme une variable d'apprentissage susceptible de moduler l'effet IC.

En ce qui concerne l'influence des facteurs condition de pratique et similarité des tâches sur les capacités de transfert d'apprentissage, les résultats indiquent que les participants ayant pratiqué sous condition aléatoire et/ou dans la condition *non-similaire* obtiennent des performances supérieures lors des tests de transfert. Au regard des hypothèses d'élaboration et de reconstruction, ces résultats suggèrent que les processus inter-tâches requis lors d'une pratique sous condition aléatoire sont bénéfiques à l'apprentissage et au transfert

d'apprentissage. Cependant, de manière plus spécifique, les résultats indiquent que les processus additionnels d'élaboration requis dans la condition *similaire* ne semblent pas améliorer l'apprentissage de la tâche comparée à la condition *non-similaire*. En d'autres termes, bien que les processus inter-tâches d'élaboration et de reconstruction requis sous condition aléatoire apparaissent bénéfiques à l'apprentissage de la tâche et au transfert d'apprentissage, nos résultats supposent néanmoins l'hypothèse d'un effet « plafond » des processus d'élaboration sur l'amélioration des performances en rétention/transfert : données en faveur de l'hypothèse de reconstruction.

Une seconde expérience a naturellement été conduite afin de tester plus spécifiquement l'hypothèse de reconstruction. En effet, nous avons manipulé le facteur similarité des tâches sur la base de la conception paramétrique de Rosenbaum (1980 ; 1983) dans le but d'induire cette fois-ci des processus additionnels de reconstruction. L'objectif de l'Expérience 2 était donc d'investiguer davantage le facteur similarité des tâches pour fournir des données comportementales et théoriques complémentaires à l'effet IC et aux hypothèses d'élaboration et de reconstruction.

Enfin, un autre résultat important en lien avec l'hypothèse de reconstruction concerne les caractéristiques invariantes et paramétriques de la tâche. Selon Magill et Hall (1990), l'élément déterminant dans l'utilisation d'un effet IC concerne la nature des variations de la tâche : la reconstruction du plan d'action doit porter sur les caractéristiques invariantes du geste. Malgré tout, aucune contrainte sur les caractéristiques invariantes de la séquence motrice utilisée dans cette étude n'a été imposée ; notons que l'analyse a posteriori des données a révélé l'existence d'un « timing naturel » (Blandin, Lhuisset & Proteau, 1999) commun pour tous les groupes. Ainsi, contrairement aux prédictions de Magill et Hall (1990), la modification des caractéristiques invariantes de la tâche ne semble pas être un pré-requis à l'obtention d'un effet IC (voir également Sekiya, Magill, Sidaway & Anderson, 1994 ; Sekiya, Magill & Anderson, 1996). De ce fait, le facteur similarité des tâches dans la seconde expérience a une nouvelle fois été manipulé sur la base d'une modification des caractéristiques paramétriques de la tâche.

EXPERIENCE 2 :

Une approche différente a été utilisée pour définir la similarité dans cette seconde expérience. En accord avec la conception paramétrique de Rosenbaum (1980 ; 1983), la programmation motrice requiert la mise en place de processus de programmation des différents paramètres du mouvement, où chaque dimension du mouvement à réaliser est programmée indépendamment : par exemple le bras (e. g., gauche ou droit), la direction (e. g., vers ou éloigné du sujet – dans le plan frontal), et l'extension (e. g., court ou long) (voir également Bonnet, Requin & Stelmach, 1982 ; Lépine, Glencross, & Requin, 1989 ; Anson, Hyland, Kötter, & Wickens, 2000).

Nous avons choisi de faire varier dans cette expérience le niveau de similarité entre les tâches à apprendre au niveau des caractéristiques spatiales et non plus uniquement au niveau des caractéristiques temporelles comme dans la majorité des études sur l'effet IC et dans l'Expérience 1. Basés sur la conception paramétrique de Rosenbaum, nous avons manipulé le paramètre *direction* du mouvement pour créer différents niveaux de similarité lors d'une tâche de pointage où trois TM étaient imposés. Les participants assignés à la condition caractérisée à haut niveau de similarité (i. e., condition *similaire*) ont pratiqué les trois TM dans une seule direction (e. g., devant) alors que leurs homologues assignés à la condition caractérisée à faible niveau de similarité (i. e., condition *non-similaire*) ont pratiqué les trois TM dans trois directions différentes (e. g., gauche, devant ou droite). Dans cette expérience, la condition *non-similaire* requiert des processus additionnels de reconstruction (i. e., reconstruction du paramètre Direction) comparée à la condition *similaire* (i. e., reconstruction du seul paramètre Temps de mouvement). En résumé, si les processus de reconstruction requis sous condition aléatoire sont majoritairement impliqués dans l'apprentissage et/ou le transfert d'apprentissage moteur, alors nous devrions observer une amélioration des performances pour le groupe de pratique aléatoire dans la condition *non-similaire* sur les tests de rétention/transferts. A l'inverse, si les processus d'élaboration requis lors d'une pratique de tâches « similaires » sont plus favorables à l'élaboration et à la représentation des plans d'actions, alors nous devrions observer une amélioration des performances en rétention/transfert pour le groupe de pratique aléatoire dans la condition *similaire*.

Enfin, en lien avec l'étude de Shea et al. (1990), nous avons également souhaité contrôler le niveau IC créé au cours de la phase d'acquisition en fonction de la quantité de pratique administrée. En effet, Shea et al. (1990) ont suggéré qu'un apprenant assigné à la

condition de pratique aléatoire ne parvient à élaborer des stratégies d'encodage efficaces facilitant l'apprentissage de la tâche qu'après une quantité de pratique suffisante ; l'interférence créée par la condition aléatoire au début de la pratique pourrait augmenter la complexité de la tâche et retarder la mise en place des processus inter-tâches supposés bénéfiques pour l'apprentissage de la tâche. Ces propos sont en accord avec l'hypothèse de « challenge point » (Guadagnoli & Lee, 2004) qui suggère qu'une augmentation du niveau d'interférence créé au cours de la phase de pratique peut produire des effets bénéfiques sur l'apprentissage mais uniquement si ce niveau d'interférence n'est pas trop élevé. En effet, si le niveau d'interférence créé au cours de la phase d'acquisition s'avère trop important pour que l'apprenant puisse recourir à des stratégies d'encodage suffisamment efficaces pour un apprentissage optimal de la tâche, alors cela se traduit sur un plan comportemental par une dégradation des performances en acquisition et en rétention. En d'autres termes, augmenter le niveau d'interférence créé au cours de la phase de pratique produit des effets bénéfiques sur l'apprentissage de la tâche à la condition que le niveau d'interférence ne dépasse pas un seuil critique nommé « challenge point », à partir duquel l'apprenant ne parvient plus à traiter les informations (i. e., plans d'actions et feedbacks) de manière efficace. Ainsi, sur la base de ce modèle, le niveau d'interférence créé au cours de la phase d'acquisition devrait diminuer avec la pratique, ce qui laisse supposer que le niveau IC créé en acquisition devrait être également fonction de la quantité de pratique.

1. Méthode :

Cent huit participants déclarés droitiers (âge moyen = 22.5 ans ± 3.8) ont volontairement participé à cette expérience. Aucun d'entre eux n'était familier avec la tâche et n'avait été informé sur le but de cette étude. Au préalable, chaque participant a dû remplir et signer une fiche d'information individuelle témoignant de son consentement à participer à cette expérience.

a) Tâche et dispositif expérimental :

Le dispositif expérimental, illustré sur la Figure 4, était constitué d'une base en bois (50 x 50 cm) sur laquelle étaient disposés quatre boutons poussoirs (2.5 cm de diamètre) connectés à un ordinateur pour la mesure et le stockage des données. Les participants étaient assis sur une chaise face à une table supportant le dispositif expérimental et l'écran

d'ordinateur. La position de la chaise devait être ajustée par le participant afin qu'il soit confortablement installé pour réaliser la tâche avec sa main droite.

La tâche consistait à réaliser dans un TM et une direction préalablement établis un mouvement allant de la base de départ (i. e., bouton « A » sur la Figure 4) vers la base d'arrivée. Dès la présentation de la cible à atteindre (i. e., base d'arrivée) et du TM imposé sur l'écran, les participants devaient initier leur mouvement le plus rapidement possible puis exécuter le mouvement tout en respectant le plus précisément possible le TM imposé. Le TM réalisé était mesuré par un chronomètre informatique à partir du lâcher de la base de départ jusqu'au contact de la base d'arrivée. La cible à atteindre et le TM imposé étaient affichés sur l'écran d'ordinateur avant chaque essai. Les trois TM pratiqués par l'ensemble des participants dans cette expérience étaient de 200, 350 et 500 ms. Cette étude a été développée à partir du logiciel de programmation E-Prime® version 1.1 de Psychology Software Tools (© 2002 Psychology Software Tools, Inc., Pittsburgh, PA).

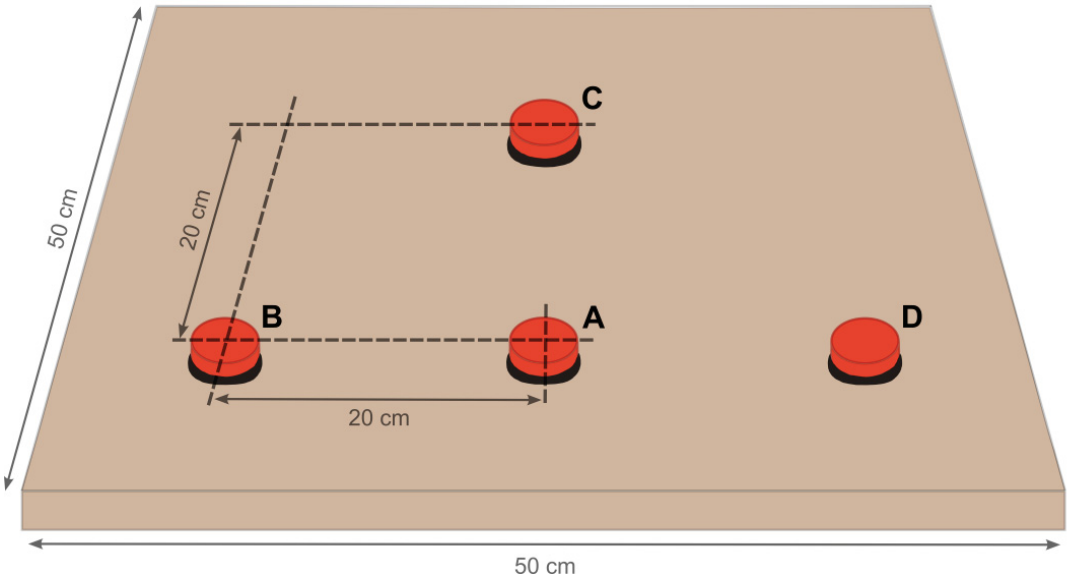


Figure 4. Illustration du dispositif expérimental. Le bouton « A » désigne la base de départ ; « B, C et D » représentent les trois boutons de réponse possibles dans la condition *non-similaire*, et « C » le seul bouton de réponse requis dans la condition *similaire*.

Au début de chaque essai apparaissait au centre de l'écran d'ordinateur le message "PRESSER LA BASE DE DEPART". Le participant avait alors pour consigne de presser la base de départ avec la main droite. Immédiatement après apparaissait un symbole composé de trois flèches au centre de l'écran sur une période variable de 1, 2 ou 3 secondes (Figure 5). Suite à cette période préparatoire apparaissait le signal de réponse constitué d'une des trois flèches et d'un TM associé, informant ainsi les participants sur la direction de la cible à atteindre et sur le TM imposé. Les participants devaient initier leur réponse dans un intervalle de temps inférieur à 4 secondes. Si toutefois le temps séparant le signal de réponse et l'exécution du mouvement excédait 4 secondes, ou si le participant commettait une erreur en pressant un mauvais bouton, un message d'erreur apparaissait alors à l'écran. Les essais erronés étaient réinsérés à la fin de chaque bloc d'essais.

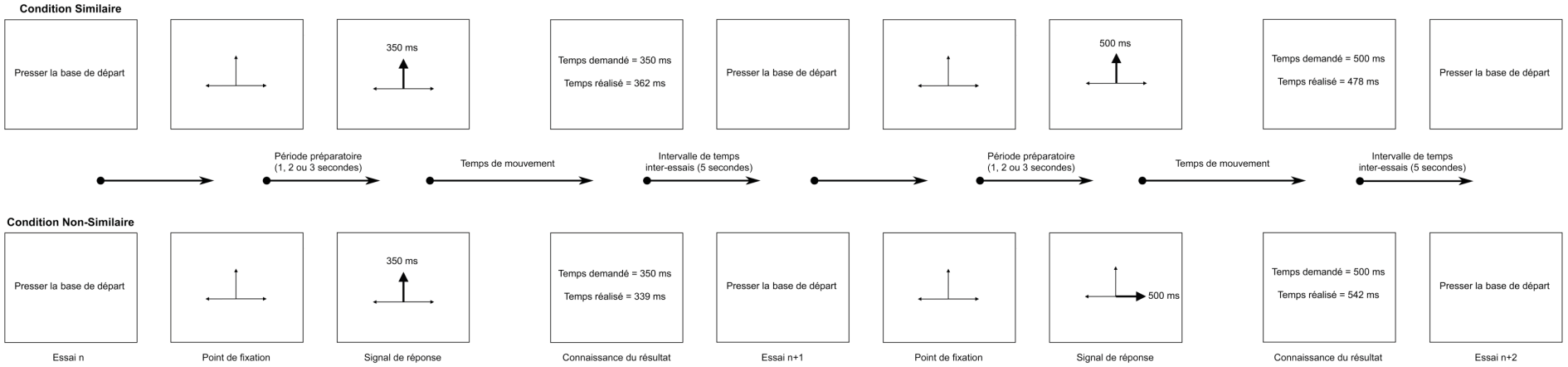


Figure 5. Vue d'ensemble d'une séquence temporelle dans la réalisation de deux essais consécutifs au cours de la phase d'acquisition. L'exemple est dans le cas d'une pratique aléatoire sous condition s*imilaire* et *non-similaire*.

b) Groupes expérimentaux et procédure :

Dès leur arrivée, les participants ont été assignés de manière aléatoire dans une des huit conditions expérimentales. L'expérience s'est déroulée sur deux jours consécutifs et était composée de trois phases expérimentales (Tableau 3) : (a) une phase d'acquisition le Jour 1, (b) un test de rétention et (c) un test de transfert le Jour 2.

Tableau 3. Récapitulatif des phases et groupes expérimentaux.

Groupes	**Acquisition**	**Rétention**	**Transfert**
Aléatoire Non-similaire	99 *vs.* 297 essais	18 essais	18 essais
Aléatoire Similaire	99 *vs.* 297 essais	18 essais	18 essais
Bloquée Non-similaire	99 *vs.* 297 essais	18 essais	18 essais
Bloquée Similaire	99 *vs.* 297 essais	18 essais	18 essais
	Jour 1	*Jour 2*	

Les groupes constitués étaient différenciés par la condition de pratique (bloquée vs. aléatoire), par la similarité des TM à pratiquer (similaire *vs.* non-similaire), et par la quantité de pratique (courte *vs.* longue). Les huit groupes constitués dans cette étude se différencient par une acquisition courte ou longue de quatre groupes indépendants : Aléatoire-Similaire, Aléatoire-Non similaire, Bloquée-Similaire et Bloquée-Non similaire.

Les participants ont été testés individuellement dans une pièce obscure et silencieuse. A leur arrivée dans la salle expérimentale, chaque participant recevait des instructions écrites et verbales sur le déroulement de la tâche.

Selon leur condition expérimentale, chaque participant a réalisé une phase d'acquisition courte de 99 essais ou longue de 297 essais (respectivement 33 et 99 essais pour chacun des trois TM). Les participants assignés à la condition *similaire* devaient exécuter les trois TM en pointant la cible située face à eux dans le plan sagittal. Dans la condition *non-similaire*, les participants devaient exécuter les trois TM en pointant la cible qui leur était associée. Chacun des trois TM était associé à une seule cible sur les trois possibles avec la contrainte que la cible à atteindre et son TM associé soient maintenus tout au long de la phase

de pratique. Cependant, la cible située face au participant dans le plan sagittal était toujours associée au TM de 350 ms. Les TM de 200 et 500 ms pouvaient être associés à la cible située à gauche ou à droite du participant (l'association cible-TM était contrebalancée entre les participants assignés à la condition *non-similaire*). Durant la phase d'acquisition courte, 11 blocs de 9 essais ont été administrés ; 33 blocs de 9 essais ont été administrés dans la phase d'acquisition longue. Pour chaque bloc, les participants assignés à la condition aléatoire ont pratiqué 3 essais sur chacune des trois variations de tâche, avec la contrainte de ne jamais avoir plus de deux essais consécutifs sur la même tâche. Les participants assignés à la condition bloquée ont pratiqué tous les essais d'une même variation de tâche avant de passer à la suivante. L'ordre de présentation des différentes variations de tâches dans la condition bloquée a été contrebalancé entre les participants. A la fin de chaque essai, la CR était affichée pendant 5 secondes. Etaient inclus dans la CR le TM imposé et le TM réalisé par le participant (tous deux en millisecondes).

Approximativement 24 heures après la fin de la phase d'acquisition ont été administrées les phases de rétention et de transfert. Les participants ont réalisé dans un premier temps la phase de rétention puis le test de transfert après un délai de 5 minutes. Lors du test de rétention, les participants devaient pratiquer 18 essais sur la variation de tâche commune à l'ensemble des participants lors de la phase d'acquisition : la cible située face au participant associée au TM de 350 ms. Lors du test de transfert, les participants devaient pointer les trois cibles présentées aléatoirement. Chaque cible était associée à un nouveau TM de 650 ms. Le test de transfert comportait un total de 18 essais : 6 essais sur chaque direction. Aucune CR n'était donnée aux participants durant les tests de rétention et transfert.

c) Analyse des données :

Les variables dépendantes utilisées dans cette expérience étaient l'Erreur Constante Absolue (|CE|) et l'Erreur Variable (EV).

Les analyses de variances (ANOVA) ont été réalisées sur 11 blocs de 9 essais pour l'acquisition courte, sur 33 blocs de 9 essais pour l'acquisition longue, et sur 1 bloc de 18 essais pour les phases de rétention et de transfert.

Une première analyse portait sur les phases d'acquisition. Pour chacune des variables dépendantes (|EC|, EV), l'ANOVA à été réalisée selon le plan 2 × 2 × 3 × 11 (Condition de pratique × Similarité × TM × Bloc) avec mesures répétées sur les deux derniers facteurs pour

l'acquisition courte, et selon le plan 2 × 2 × 3 × 33 (Condition de pratique × Similarité × TM × Bloc) avec mesures répétées sur les deux derniers facteurs pour l'acquisition longue. Une seconde analyse portait sur les phases de rétention et transfert. Les variables dépendantes ont été analysées selon le plan 2 × 2 × 2 (Quantité de pratique × Condition de pratique × Similarité) pour chacune des deux phases de rétention/transfert. Tous les résultats significatifs à $p < .05$ ont été rapportés. Les comparaisons post-hoc des moyennes ont été réalisées par un test de Newman-Keuls. Aucune analyse n'a été réalisée sur les erreurs produites (un maximum de 2-3% d'erreurs au total).

2. Résultats :

a) Phases d'acquisition :

Acquisition courte. Pour la variable |CE|, l'analyse indique un effet principal du facteur Condition de pratique, $F(1,56) = 13.72$, Similarité, $F(1,56) = 4.03$, TM, $F(2,112) = 174.81$, et Bloc, $F(10,560) = 30.68$, $ps < .05$. La Figure 6A illustre la variable |CE|. Pour le facteur Condition de pratique, l'analyse indique que les performances des participants ayant pratiqué sous condition bloquée (44.80 ms) sont supérieures à celles obtenues par les participants assignés à la condition de pratique aléatoire (52.20 ms). L'analyse du facteur Similarité indique que les participants sous condition *similaire* (46.49 ms) obtiennent de meilleures performances que leurs homologues sous condition *non-similaire* (50.50 ms). Pour l'effet principal du facteur TM, l'analyse indique que l'erreur temporelle augmente avec la durée du mouvement à réaliser. Les participants sont plus précis sur le TM court de 200 ms (31.23 ms) que sur le TM moyen de 350 ms (46.87 ms) et le TM long de 500 ms (67.40 ms). La différence entre le TM moyen et le TM long est également significative. L'analyse du facteur Bloc indique que les participants améliorent leurs performances au cours de la phase de pratique, avec une baisse significative de |CE| du Bloc 1 (73.68 ms) au Bloc 3 (49.09 ms).

Pour la variable EV, l'analyse révèle un effet principal du facteur Condition de pratique, $F(1,56) = 14.09$, TM, $F(2,112) = 191.79$, et Bloc, $F(10,560) = 13.40$, $ps < .05$. La Figure 7A illustre la variable EV. L'analyse du facteur Condition de pratique indique que les performances des participants assignés aux groupes sous condition bloquée (34.21 ms) sont moins variables que celles des participants assignés aux groupes sous condition aléatoire (39.53 ms). Pour le facteur TM, l'analyse révèle que la variabilité des performances augmente

avec la durée du mouvement à réaliser. Les performances sont plus stables sur le TM court de 200 ms (22.94 ms) que sur le TM moyen de 350 ms (38.60 ms) et sur le TM long de 500 ms (49.06 ms). Une différence significative est également observée entre le TM moyen et le TM long. L'effet principal du facteur Bloc indique que la variabilité des performances est plus importante sur les Blocs 1 et 2 (respectivement 50.14 et 45.77 ms) que sur les autres blocs de la phase d'acquisition. Les Blocs 1 et 2 diffèrent significativement.

Acquisition longue. Pour la variable |CE|, l'analyse indique un effet principal du facteur Condition de pratique, $F(1,44) = 27.16$, TM, $F(2,88) = 144.01$, et Bloc, $F(32,1408) = 16.16$, $ps < .05$. La Figure 6B illustre la variable |CE|. L'analyse du facteur Condition de pratique indique que les performances des participants ayant pratiqué sous condition bloquée (36.35 ms) sont supérieures à celles obtenues par les participants assignés à la condition de pratique aléatoire (47.74 ms). Pour le facteur TM, l'analyse indique que l'erreur temporelle augmente avec la durée du mouvement à réaliser. Les participants sont plus précis sur le TM court de 200 ms (27.49 ms) que sur le TM moyen de 350 ms (40.65 ms) et le TM long de 500 ms (58.01 ms). La différence entre le TM moyen et le TM long est également significative. L'analyse du facteur Bloc indique que les participants améliorent leurs performances au cours de la phase de pratique, avec une baisse significative de |CE| du Bloc 1 (72.61 ms) au Bloc 4 (45.50 ms).

Pour la variable EV, l'analyse révèle un effet principal du facteur Condition de pratique, $F(1,44) = 25.93$, TM, $F(2,88) = 219.76$, et Bloc, $F(32,1408) = 8.61$, $ps < .05$. La Figure 7B illustre la variable EV. L'analyse du facteur Condition de pratique indique que les performances des participants assignés aux groupes sous condition bloquée (28.86 ms) sont plus stables que celles de leurs homologues sous condition aléatoire (36.28 ms). Pour le facteur TM, l'analyse révèle que la variabilité des performances augmente avec la durée du mouvement à réaliser. Les performances sont plus stables sur le TM court de 200 ms (19.21 ms) que sur le TM moyen de 350 ms (33.47 ms) et sur le TM long de 500 ms (45.04 ms). Une différence significative est également observée entre le TM moyen et le TM long. L'effet principal du facteur Bloc indique que la variabilité des performances est plus importante sur les Blocs 1 et 2 (respectivement 52.16 et 41.24 ms) que sur les autres blocs de la phase d'acquisition. Les Blocs 1 et 2 diffèrent significativement.

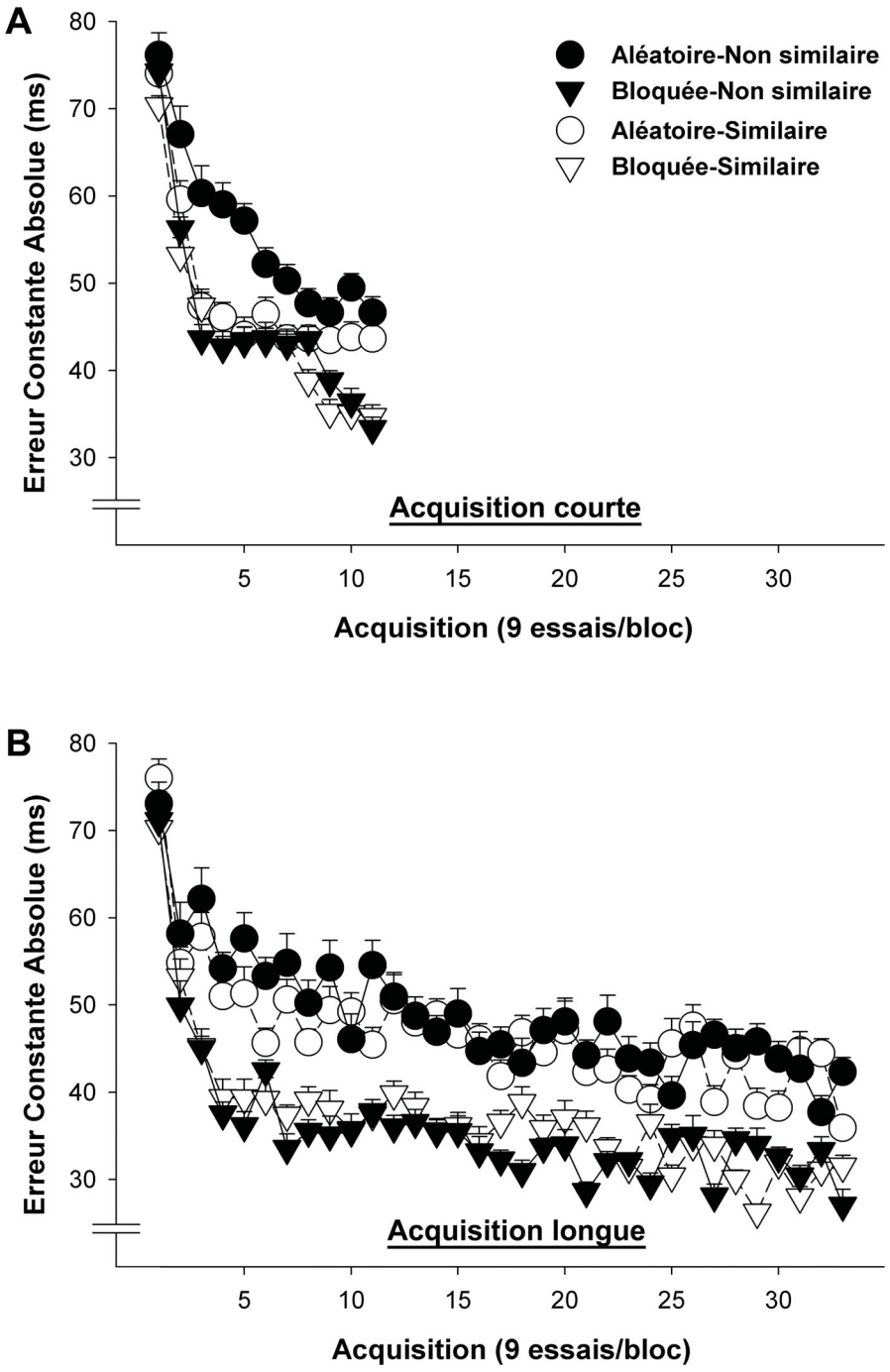


Figure 6. Erreurs Constantes Absolues pour les phases d'acquisition courte (A ; Blocs 1 à 11) et d'acquisition longue (B ; Blocs 1 à 33).

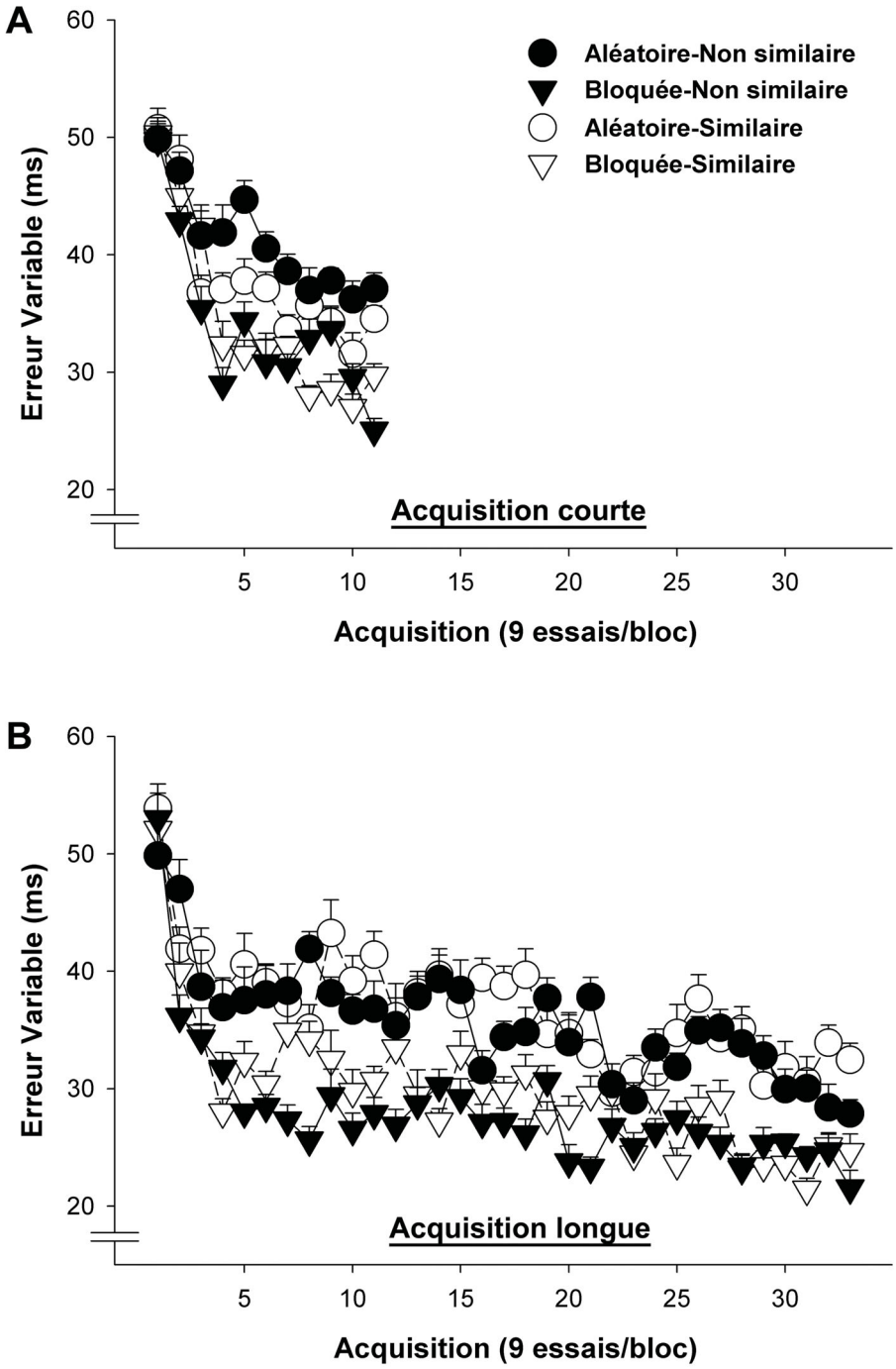


Figure 7. Erreurs Variables pour les phases d'acquisition courte (A ; Blocs 1 à 11) et d'acquisition longue (B ; Blocs 1 à 33).

b) Phase de rétention :

L'analyse de la variable |CE| révèle une interaction Quantité de pratique × Condition de pratique, $F(1,100) = 8.81$, et une interaction Quantité de pratique × Condition de pratique × Similarité, $F(1,100) = 5.75$, $ps < .05$. La Figure 8A illustre la variable |CE|. Pour l'interaction Quantité de pratique × Condition de pratique, l'analyse post-hoc indique que les performances des participants assignés à la condition de pratique bloquée se dégradent avec l'augmentation de la pratique (respectivement 43.44 ms en acquisition courte et 67.36 ms en acquisition longue). Aucune différence n'apparaît lors d'une pratique sous condition aléatoire (respectivement 58.14 ms en acquisition courte et 48.71 ms en acquisition longue). Les comparaisons post-hoc pour l'interaction Quantité de pratique × Condition de pratique × Similarité révèlent une différence bloquée-aléatoire dans la condition *similaire* après une phase d'acquisition longue (respectivement 76.01 et 38.49 ms) ; aucune différence significative bloquée-aléatoire n'est observée après une phase d'acquisition courte (respectivement 33.59 et 56.38 ms, $p = .18$). Notons également qu'aucune différence bloquée-aléatoire n'apparaît dans la condition *non-similaire* et ce, indépendamment de la quantité de pratique administrée : maintien des performances après une phase d'acquisition courte (respectivement 53.30 et 59.90 ms) et une phase d'acquisition longue (respectivement 58.72 et 58.93 ms). L'interaction se traduit donc essentiellement par une détérioration des performances du groupe *bloquée-similaire* entre une acquisition courte (33.59 ms) et une acquisition longue (76.01 ms ; $p < .05$).

L'analyse de la variable EV n'indique aucun effet principal ni interaction. La Figure 9A illustre la variable EV.

c) Phase de transfert :

L'analyse de la variable |CE| révèle un effet principal du facteur Condition de pratique, $F(1,100) = 6.97$, et une interaction Quantité de pratique × Condition de pratique, $F(1,100) = 5.53$, $ps < .05$. La Figure 8B illustre la variable |CE|. L'analyse du facteur Condition de pratique indique que les performances des participants ayant pratiqué sous condition aléatoire (106.76 ms) sont supérieures à celles de leurs homologues assignés à la condition de pratique bloquée (139.60 ms). L'interaction Quantité de pratique × Condition de pratique se traduit par une dégradation des performances pour les participants assignés à la condition de pratique bloquée entre les phases d'acquisition courte et longue (respectivement

117.62 et 167.07 ms), alors qu'un maintien des performances est observé pour les participants assignés à la condition de pratique aléatoire (respectivement 113.65 et 98.14 ms après les phases d'acquisition courte et longue) ; notons l'absence de différence bloquée-aléatoire suite à une phase d'acquisition courte (respectivement 117.62 et 113.65 ms).

L'analyse de la variable EV indique un effet principal du facteur Similarité, $F(1,100) = 8.67$, et une interaction Quantité de pratique × Condition de pratique × Similarité, $F(1,100) = 4.32$, $ps < .05$. La Figure 9B illustre la variable EV. L'analyse du facteur Similarité indique que les participants ayant pratiqué dans la condition *non-similaire* (47.59 ms) sont moins variables comparés aux participants assignés à la condition *similaire* (57.89 ms). Les comparaisons post-hoc pour l'interaction Quantité de pratique × Condition de pratique × Similarité ne révèlent aucune différence bloquée-aléatoire dans les conditions *similaire* et *non-similaire* après des phases d'acquisition courte et longue.

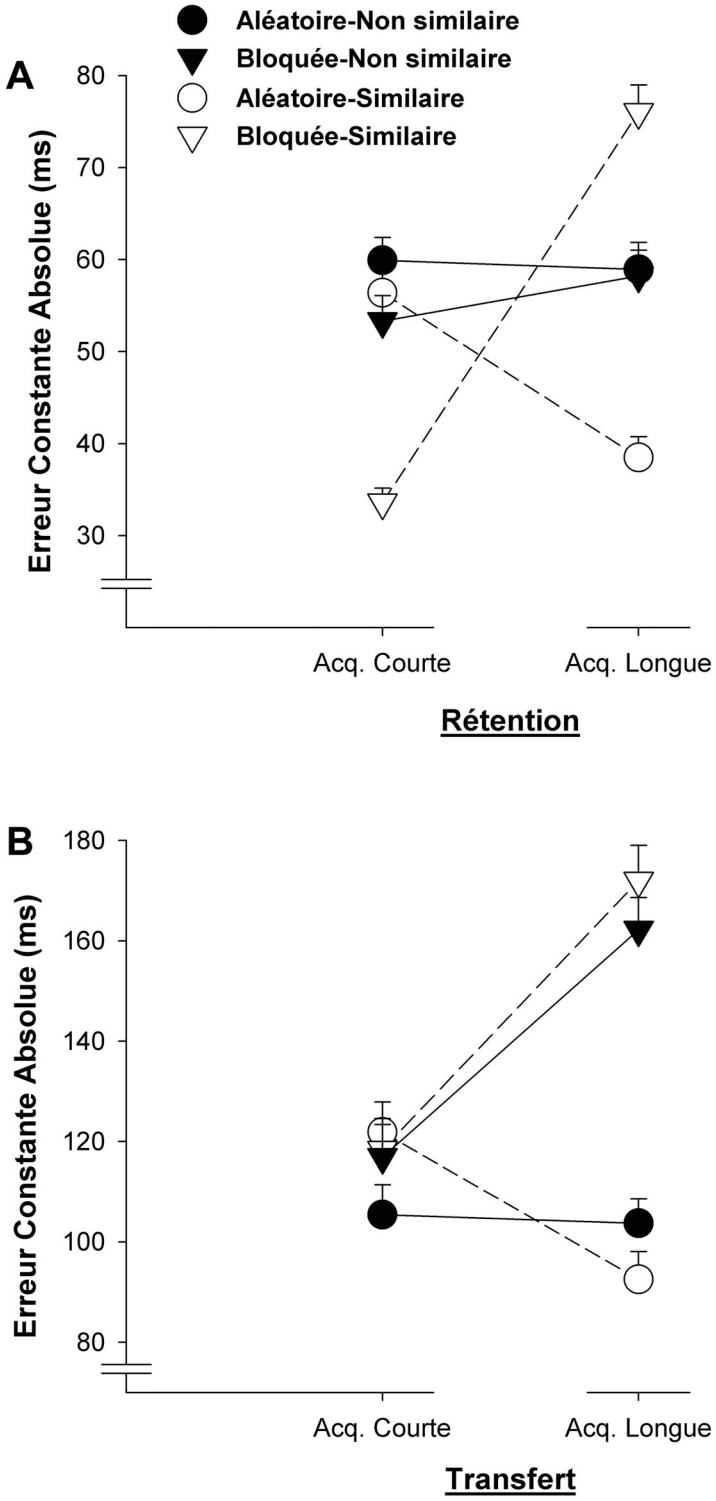


Figure 8. Erreurs Constantes Absolues pour les phases de rétention (A) et de transfert (B). Acq. Courte = Acquisition Courte de 99 essais ; Acq. Longue = Acquisition Longue de 297 essais.

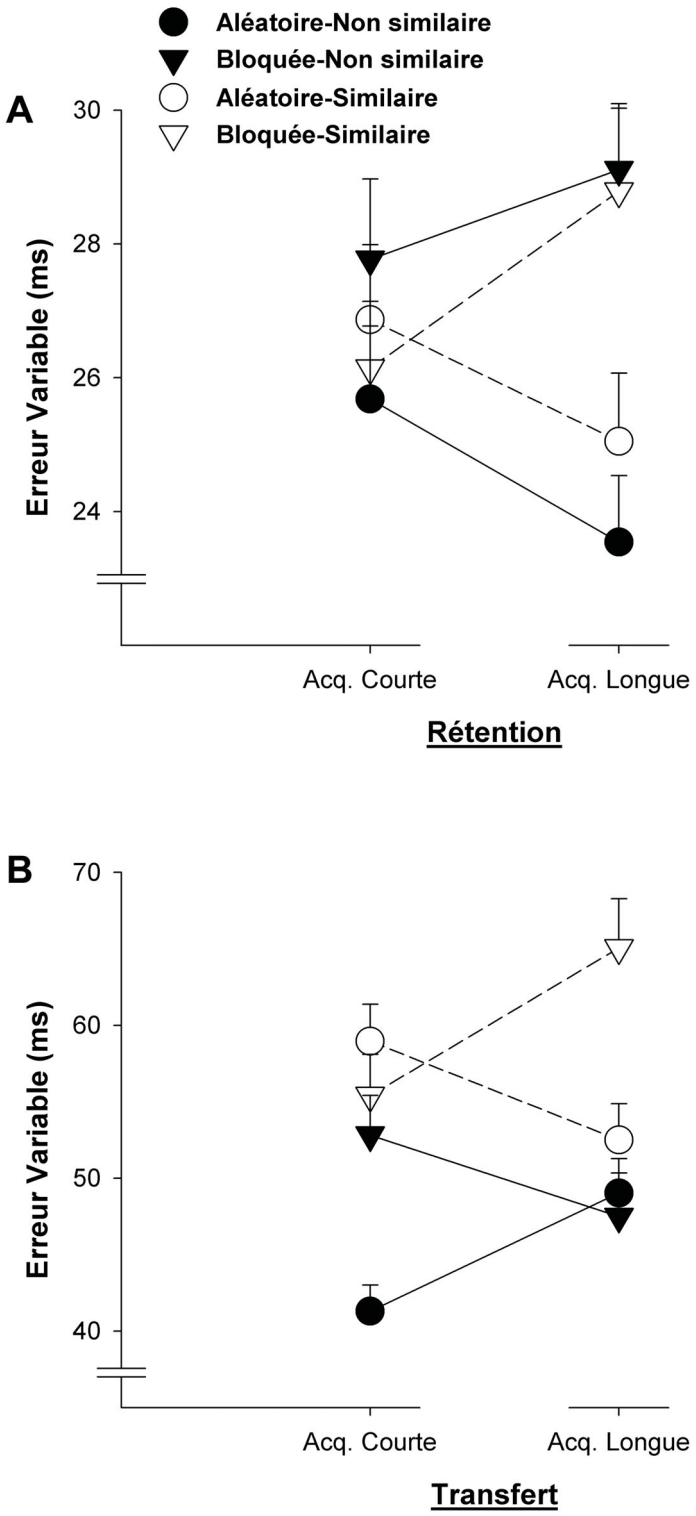


Figure 9. Erreurs Variables pour les phases de rétention (A) et de transfert (B). Acq. Courte = Acquisition Courte de 99 essais ; Acq. Longue = Acquisition Longue de 297 essais.

3. Discussion :

Dans cette seconde expérience, nous avons contrasté deux quantités de pratique : acquisition courte de 99 essais et acquisition longue de 297 essais. Ainsi, seules les données des participants assignés à la condition « acquisition courte » dans l'Expérience 2 ont permis d'établir un lien de comparaison entre les deux expériences (i. e., quantité de pratique identique de 99 essais). Les résultats obtenus en rétention révèlent que contrairement à l'Expérience 1 où un effet IC dû à la condition de pratique a été obtenu dans la condition *non-similaire*, aucune différence bloquée-aléatoire n'apparaît après une acquisition courte dans l'Expérience 2 et ce, quel que soit le niveau de similarité entre les tâches. En effet, l'interaction Condition de pratique × Similarité obtenue sur le test de rétention dans l'Expérience 1 n'apparaît pas dans l'Expérience 2.

Les résultats de l'Expérience 2 révèlent toutefois une interaction Quantité de pratique × Condition de pratique × Similarité qui se traduit par une différence bloquée-aléatoire dans la condition *similaire* après une acquisition longue de 297 essais : différence bloquée-aléatoire principalement due à une détérioration des performances du groupe de pratique bloquée entre les phases d'acquisition courte et d'acquisition longue. En revanche, dans le cas d'une pratique de tâches à faible niveau de similarité, le facteur quantité de pratique semble n'avoir aucune influence sur le facteur condition de pratique : aucune différence bloquée-aléatoire n'apparaît dans la condition *non-similaire* quelle que soit la quantité de pratique administrée.

Les résultats obtenus en rétention/transfert dans les conditions *similaire* et *non-similaire* peuvent être interprétés selon différentes approches théoriques. En effet, dans la condition *similaire*, l'absence de différence bloquée-aléatoire au début de la pratique (i. e., acquisition courte de 99 essais) peut s'expliquer : 1) par une relative difficulté pour l'apprenant à déterminer la stratégie appropriée pour réaliser la tâche de la manière la plus efficace possible (Fitts, 1964 ; Fitts & Posner, 1967) ; 2) par le haut niveau d'interférence induit par la condition de pratique aléatoire, supposé retarder les processus d'élaboration et de reconstruction à ce stade de pratique (Shea, Kohl & Indermill, 1990). Enfin, l'amélioration des performances en rétention/transfert dans la condition *similaire*, après une phase d'acquisition longue de 297 essais sous condition aléatoire, peut s'expliquer : 1) par la mise en place progressive des processus inter-tâches, et 2) par le fait que la pratique aléatoire pourrait se révéler une stimulation nécessaire pour forcer l'apprenant à rester actif dans la

tâche et ainsi prolonger l'apprentissage (Albaret & Thon, 1998 ; voir également Wulf & Shea, 2002, pour une revue).

Dans la condition *non-similaire* au contraire, l'absence de différence bloquée-aléatoire en rétention/transfert apparaît indépendante de la quantité de pratique administrée. Deux points de vues théoriques peuvent être proposés : 1) les processus additionnels de reconstruction induits par la condition de pratique aléatoire dans la condition *non-similaire* pourraient faire obstacle à la mise en place des processus inter-tâches : données en faveur de l'hypothèse d'élaboration ; 2) les participants assignés à la condition *non-similaire* pourraient avoir eu recours à une activité cognitive importante au cours de la phase de pratique, limitant l'effet IC dû à la condition de pratique et les bénéfices observés sur l'apprentissage (Guadagnoli & Lee, 2004 ; Albaret & Thon, 1998 ; Wulf & Shea, 2002).

En effet, Wulf et Shea (2002) ont montré que les préceptes issus d'études sur l'apprentissage de tâches simples ne s'appliquent qu'imparfaitement dans le cas de tâches complexes ; la pratique de tâches complexes pouvant même se révéler sensible à certaines variables d'apprentissage qui ne seraient pas particulièrement pertinentes lors d'une pratique de tâches simples. Wulf et Shea (2002) ont suggéré qu'une tâche pouvait être définie comme plus ou moins complexe dans la mesure où elle requiert le contrôle d'un nombre plus ou moins important de degrés de libertés. Ainsi, la condition *non-similaire* (i. e., requiert la paramétrisation du geste selon 3 directions possibles) utilisée dans cette étude s'apparente à la condition où le niveau de complexité est le plus élevé ; dans la condition *similaire* (i. e., requiert la paramétrisation du geste selon 1 seule direction), supposée moins complexe, la baisse des performances du groupe de pratique bloquée avec l'augmentation de la quantité de pratique peut s'expliquer en partie par une dépendance à la CR.

En effet, l'hypothèse de « guide et dépendance » proposée par Salmoni et al. (1984) prédit que la CR donnée après chaque essai permet de guider l'apprenant vers la réponse correcte et donc d'améliorer ses performances au cours de la phase de pratique. Cependant, la fréquence élevée de CR empêche l'apprenant de traiter correctement son feedback intrinsèque, le rendant ainsi dépendant de cette information ajoutée, d'où une baisse des performances observées sur les tests de rétention/transfert où la CR est totalement absente. Toutefois, cette hypothèse n'est valable que dans le cas d'une pratique de tâches simples, l'apprentissage de tâches complexes étant facilité lorsque la CR est présente après chaque essai (Wulf, Shea & Matschiner, 1998 ; Guadagnoli & Lee, 2004). Ainsi, la baisse du niveau de difficulté de la situation d'apprentissage induite par l'augmentation de la pratique dans la

condition *similaire* a pu engendrer une dépendance progressive à la CR pour les participants assignés à la condition bloquée, d'où une baisse des performances observées sur le test de rétention après une acquisition longue.

4. Discussion générale :

L'objectif principal de ces deux expériences était de combiner les facteurs condition de pratique et similarité des tâches comme sources potentielles d'interférence. Nous avons vérifié dans un premier temps si le niveau d'interférence créé au cours de la phase d'acquisition augmentait avec le niveau de similarité entre les tâches à apprendre, et dans un second temps, si ces deux facteurs pouvaient interagir avec le facteur quantité de pratique.

D'un point de vue général, les résultats révèlent que le niveau IC créé par la condition de pratique est fonction du niveau de similarité entre les tâches. Cependant, contrairement aux prédictions de Battig (1972 ; 1979), la pratique de tâches à haut niveau de similarité ne conduit pas nécessairement à une augmentation du niveau d'interférence au cours de la pratique et/ou à une amélioration de l'apprentissage ; les résultats de cette étude suggèrent que les prédictions issues du domaine verbal ne s'appliquent qu'imparfaitement au domaine moteur. En effet, un effet IC dû à la condition de pratique n'a été obtenu que dans la condition *non-similaire* dans l'Expérience 1, et à l'inverse que dans la condition *similaire* dans l'Expérience 2. En accord avec nos prédictions sur les différents niveaux de difficulté de la tâche créés en fonction de la conception du facteur similarité des tâches (voir Tableau 1 du Chapitre 2), il apparaît difficile de définir précisément et de manière unitaire la notion de « similarité » dans le domaine moteur. En effet, selon la définition de similarité des tâches considérée (Expériences 1 ou 2 par exemple), les effets dus à la manipulation du facteur condition de pratique peuvent être très différents lors de tests de rétention/transfert. De plus, ces effets peuvent également varier en fonction de la quantité de pratique administrée en acquisition. Par exemple, la différence bloquée-aléatoire n'apparaît qu'après une quantité de pratique suffisamment importante (i. e., 297 essais) dans l'Expérience 2 ; le facteur similarité des tâches s'apparente donc à une variable d'apprentissage susceptible de moduler l'effet IC dû à la condition de pratique et ce, en fonction de la quantité de pratique requise lors de la phase d'acquisition.

Hypothèses d'élaboration et de reconstruction :

L'influence du niveau de similarité des tâches et de la quantité de pratique sur l'effet IC soulève malgré tout quelques questions théoriques, et notamment en ce qui concerne les hypothèses d'élaboration (Shea & Morgan, 1979 ; Shea & Zimny, 1983) et de reconstruction (Lee & Magill, 1983 ; 1985). En effet, si les processus inter-tâches impliqués lors d'une pratique sous condition aléatoire sont responsables de l'effet IC, alors en quoi ces processus peuvent-ils être influencés par les facteurs similarité des tâches et quantité de pratique ? En d'autres termes, pourquoi dans certains cas n'observe-t-on pas de différence d'apprentissage entre les conditions de pratique bloquée et aléatoire ? Dans une récente étude, Lin et al. (2008) ont testé le rôle des processus inter-tâches sur l'apprentissage moteur. Leurs résultats supportent dans un premier temps l'hypothèse d'élaboration en montrant que la perturbation des processus intra- et inter-tâches (par des impulsions TMS appliquées au niveau du cortex moteur au cours de la phase d'acquisition) pour le groupe sous condition aléatoire détériore l'apprentissage : les performances en rétention du groupe « Aléatoire-TMS » se révèlent inférieures à celle du groupe contrôle « Aléatoire-Sans TMS » n'ayant subi aucune impulsion TMS au cours de la phase d'acquisition. Dans un second temps, les résultats ne supportent que partiellement l'hypothèse de reconstruction car la perturbation des processus intra-tâche lors d'une pratique sous condition bloquée n'a pas amélioré l'apprentissage : les performances en rétention du groupe « Bloquée-TMS » et du groupe contrôle « Bloquée-Sans TMS » ne diffèrent pas significativement. Toutefois, dans la condition contrôle où aucune perturbation n'était appliquée, les résultats obtenus sont en accord avec ceux issus de la littérature sur l'effet IC : les performances des participants sous condition aléatoire sont supérieures à celles de leurs homologues sous condition bloquée lors du test de rétention. Si dans un premier temps ces résultats supportent l'hypothèse d'élaboration en montrant que la perturbation par TMS des processus inter-tâches induit une détérioration des performances du groupe de pratique aléatoire en rétention, l'absence d'amélioration des performances observées sur le test de rétention après une perturbation par TMS pour le groupe sous condition bloquée suggère dans un second temps que la reconstruction des plans d'actions peut être bénéfique mais pas suffisante pour expliquer les bénéfices liés à la pratique aléatoire sur l'apprentissage moteur.

Bien que l'étude de Lin et al. (2008) ait apporté des données importantes sur la compréhension et le rôle des processus inter-tâches dans l'apprentissage moteur, comment expliquer malgré tout l'influence des facteurs similarité des tâches et quantité de pratique sur

l'effet IC ? Sachant qu'aucune perturbation n'a été appliquée dans notre étude, et partant du principe que seule la pratique aléatoire induit des processus inter-tâches, comment expliquer l'absence d'effet IC dû à la condition de pratique dans certains cas ?

Dans notre étude, nous avons testé les hypothèses d'élaboration et de reconstruction (i. e., processus inter-tâches) en manipulant le facteur similarité des tâches : processus additionnels d'élaboration et de reconstruction, respectivement dans les Expérience 1 et 2. Ainsi, nous pouvons évaluer le rôle respectif des processus d'élaboration et de reconstruction sur les bénéfices liés à l'apprentissage de la tâche et au transfert d'apprentissage. Les résultats issus de l'Expérience 1 sont majoritairement en faveur de l'hypothèse de reconstruction : aucun bénéfice lié aux processus additionnels d'élaboration sur les performances en rétention/transfert. A l'inverse, dans l'Expérience 2, nos résultats sont davantage en faveur de l'hypothèse d'élaboration : détérioration des performances en rétention/transfert liée aux processus additionnels de reconstruction. En résumé, nos résultats suggèrent que l'élaboration des plans d'actions pourrait être en grande partie responsable de l'amélioration des performances en rétention/transfert liée à la condition de pratique aléatoire comparée à la reconstruction des plans d'actions, même si, pour l'une comme pour l'autre, la seule élaboration ou reconstruction des plans d'actions ne suffit pas à expliquer les bénéfices observés sur l'apprentissage et le transfert d'apprentissage.

Un point de vue théorique différent de celui des hypothèses d'élaboration et de reconstruction semble également pouvoir fournir un support théorique pertinent : l'hypothèse de « challenge point » (Guadagnoli & Lee, 2004).

Hypothèse de « challenge point » (Guadagnoli & Lee, 2004) :

Sur la base des prédictions de Battig (1972 ; 1979), la condition *similaire* dans l'Expérience 1 s'apparente à la condition ayant le niveau de complexité le plus élevé. A l'inverse, sur la base des prédictions de Wulf et Shea (2002), la condition *non-similaire* dans l'Expérience 2 peut être considérée comme la condition ayant le niveau de complexité le plus élevé (i. e., requiert la paramétrisation du geste selon 3 directions possible *vs.* 1 direction dans la condition *similaire*). Les résultats observés dans les conditions où le niveau de complexité est supposé le plus élevé (i. e., condition *similaire* dans l'Expérience 1 et *non-similaire* dans l'Expérience 2) ne révèlent aucune différence bloquée-aléatoire sur les tests de rétention : la pratique de tâches complexes pourrait « surcharger » la mémoire de travail, évitant ou tout au

moins limitant les processus d'élaboration impliqués lors d'un apprentissage sous condition aléatoire (e. g., Albaret & Thon, 1998 ; Hebert, Landin & Solmon, 1996 ; Wulf & Shea, 2002) ; Wulf et Shea (2002) ayant par ailleurs montré que l'effet IC créé par la condition de pratique n'est pas obtenu lorsque les participants sont confrontés à des tâches complexes. Toutefois, conformément à l'hypothèse de « challenge point », l'effet IC induit par les facteurs condition de pratique et similarité des tâches après une phase d'acquisition longue peut s'expliquer par une baisse progressive du niveau de difficulté de la tâche avec la pratique. En effet, l'interférence intra-tâche inhérente à la pratique de tâches complexes pourrait être favorable à un apprentissage efficace sous condition bloquée aux premiers stades de la pratique (i. e., acquisition courte). Cependant, la baisse du niveau de difficulté de la situation d'apprentissage induite par l'augmentation de la pratique rend progressivement la tâche moins difficile à réaliser pour l'apprenant ; l'organisation aléatoire de la session d'apprentissage pourrait dans ce cas se révéler une stimulation nécessaire pour forcer l'apprenant à rester actif dans la tâche, et ainsi prolonger l'apprentissage de la tâche (Albaret & Thon, 1998 ; voir également Wulf & Shea, 2002, pour une revue).

Conclusion :

En conclusion, nos résultats ne supportent pas les prédictions de Battig (1966 ; 1972 ; 1979) où une situation à haut niveau IC induite par la condition de pratique aléatoire et/ou un haut niveau de similarité entre les tâches favorise l'apprentissage. En effet, nos résultats fournissent davantage des données comportementales compatibles avec l'hypothèse de « challenge point » proposée par Guadagnoli et Lee (2004), prenant en compte la relation entre la difficulté de la tâche et la quantité de pratique. De plus, la notion de similarité des tâches appliquée au domaine moteur nécessite d'être approfondi : différentes conceptions et différents effets attendus sur l'apprentissage. Ainsi, dans une situation d'apprentissage où un étudiant devrait apprendre des gestes nouveaux et variés, le recours à : 1) une condition de pratique bloquée ou aléatoire, 2) une pratique de tâches à faible ou haut niveau de similarité, et 3) une faible ou importante quantité de pratique, dépend des caractéristiques de la tâche.

A l'issue de cette étude, une question majeure reste en suspens, à savoir si l'interaction des facteurs condition de pratique et similarité des tâches implique la mise en place de processus spécifiques autres que ceux d'élaboration et de reconstruction initialement proposés pour expliquer les différences d'apprentissage liées aux conditions de pratique. L'étude du facteur similarité des tâches dans le domaine moteur reste donc un champ de recherche à

poursuivre, dans un premier temps pour définir plus précisément le terme « similarité », et dans un second temps pour apporter des données nouvelles et complémentaires aux hypothèses d'élaboration et de reconstruction.

5. Perspectives :

- Trente ans après les travaux princeps de Shea & Morgan (1979) sur l'effet IC dans le domaine de l'apprentissage moteur, force est de constater que les hypothèses d'élaboration (Shea & Morgan, 1979 ; Shea & Zimny, 1983) et de reconstruction (Lee & Magill, 1983 ; 1985), initialement proposées pour expliquer cet effet paradoxal, semblent encore aujourd'hui relativement pertinentes. Toutefois, les limites théoriques révélées dans ce travail de thèse, relatives aux hypothèses d'élaboration et de reconstruction, nécessitent d'être approfondies. Pour cela, le projet de recherche actuellement en cours de réalisation comporte des études IMRf et TMS, afin d'évaluer plus spécifiquement les processus cognitifs sous-jacents aux hypothèses d'élaboration et de reconstruction. En effet, sur la base des récentes études de Cross et al. (2007) et Lin et al. (2008), notre objectif est d'élaborer des études IMRf et TMS où seront manipulés les facteurs condition de pratique et similarité des tâches ; dès lors, il nous sera possible de mettre en évidence les supports neuroanatomiques relatifs aux hypothèses d'élaboration et de reconstruction (et plus généralement à l'effet IC), et d'évaluer le rôle respectif de chacun des processus d'élaboration et de reconstruction sur l'amélioration des performances en rétention/transfert.

- Dans une perspective théorique similaire, une approche différente de celle utilisée dans ce manuscrit pourrait être abordée. En effet, une récente étude de Lin et al. (2007) ayant évalué l'apprentissage moteur chez une population de sujets Parkinsoniens révèle que ces derniers obtiennent des performances supérieures en rétention après une phase d'acquisition sous condition bloquée, contrairement à un groupe contrôle où une amélioration des performances en rétention s'observe pour les participants assignés à la condition de pratique aléatoire (i. e., obtention d'un effet IC chez les sujets « contrôle » uniquement). Alors qu'il est relativement bien établi dans la littérature que les sujets Parkinsoniens démontrent des difficultés à réaliser plus de deux tâches différentes présentées sous une forme non systématique (e. g., Owen, 2004 ; Lewis, Slabosz, Robbins, Barker & Owen, 2005), Lin et al. (2007) suggèrent que la condition de pratique aléatoire utilisée dans leur étude aurait pu contribuer à « dépasser » le seuil critique de « challenge point » chez les sujets Parkinsoniens

et de fait détériorer leurs performances observées sur le test de rétention. Une interprétation différente de ces résultats repose sur le postulat que les sujets Parkinsoniens ne seraient pas capables de maintenir un plan d'action en mémoire de travail (Robertson & Flowers, 1990) et seraient donc dans l'impossibilité de réaliser des comparaisons de plans d'actions au cours de la phase de pratique (i. e., processus inter-tâches). Ainsi, de par les déficits cognitifs avérés des sujets Parkinsoniens et des processus sous-jacents aux hypothèses d'élaboration, de reconstruction et de « challenge point », il nous apparaît pertinent d'entreprendre une investigation plus approfondie de ces hypothèses théoriques à partir de populations présentant de tels déficits.

CHAPITRE 6

Apprentissage et nature de la représentation des séquences motrices.

EXPERIENCE 3 :

La fluidité dans la production de mouvements quotidiens, composés principalement de séquences de mouvements (écrire, conduire, etc.), et la façon dont ces séquences de mouvements sont apprises, stockées et représentées en mémoire est une question d'intérêt général (Keele, Ivry, Mayr, Hazeltine & Heuer, 2003). Une technique répandue ces 20 dernières années pour étudier l'apprentissage de séquences motrices était de demander aux participants de répondre le plus rapidement possible à un stimulus, présenté visuellement sur un écran d'ordinateur, en appuyant sur des boutons de réponse correspondant au stimulus visuel (e. g., Nissen & Bullemer, 1987 ; Povel & Collard, 1982). Ce type de tâches a été nommé Temps de Réaction Sériel (TRS) car les participants devaient réagir non pas à un seul stimulus, comme dans le cas de tâches de Temps de Réaction de Choix (TRC), mais à une série de stimuli. Cependant, dans une tâche de TRS, les stimuli présentés appartiennent à une séquence répétée et donc, le participant commence progressivement à anticiper le stimulus suivant. Au fur et à mesure que la séquence est apprise par le participant, le temps nécessaire pour produire la séquence est réduit. Avec la pratique, l'apprenant anticipe le stimulus suivant et devient de ce fait moins dépendant des stimuli visuels. Sur un plan comportemental, l'exécution du geste produit par l'apprenant devient alors plus rapide et plus fluide.

De nombreuses revues issues de la littérature sur l'apprentissage de séquences motrices indique qu'au cours de la pratique, les participants regroupent (« chunks ») certains éléments de la séquence ensemble : l'exécution motrice devient alors plus rapide et plus fluide comparée au début de la pratique (Verwey, 1994 ; 2001). La mesure du temps inter-éléments (i. e., intervalle de temps entre chaque élément) indique clairement que deux ou plusieurs éléments de la séquence sont groupés ensemble de manière à pouvoir être produits sous forme de sous-séquences relativement indépendantes. La façon dont une séquence de mouvements est organisée en sous-séquences fournit une information cruciale sur les processus cognitifs impliqués au cours des étapes de récupération, de programmation et d'exécution de la séquence motrice. Initialement, une sous-séquence débute par une réponse relativement lente

sur le premier élément puis par une réponse plus rapide sur un ou plusieurs éléments de la sous-séquence (e. g., Povel & Collard, 1982 ; Kovacs, Müehlbauer & Shea, 2009 ; Park & Shea, 2005 ; Wilde & Shea, 2006). Le temps de réponse sur le premier élément de la sous-séquence est supposé plus important parce que la sous-séquence doit être récupérée, programmée, et préparée pour l'exécution de la réponse. D'un autre côté, les éléments suivants de la sous-séquence sont produits plus rapidement et de manière plus fluide parce que les processus associés à leur production ont déjà été effectués. Après une quantité de pratique suffisante, les participants sont capables d'initier les processus relatifs à la sous-séquence suivante durant l'exécution de la sous-séquence en cours. Il en résulte une augmentation de la rapidité et de la fluidité de la production de la séquence. Ces processus parallèles, nommés processus de « concaténation » (voir Verwey, 2001 ; Wright, Black, Immink, Brueckner & Magnuson, 2004), permettent de réduire le délai entre les sous-séquences (e. g., Verwey, 1994 ; 2001 ; Wilde & Shea, 2006). La manière dont ces sous-séquences sont « chunkées » et « concaténées » renseigne sur l'évolution de la structure de la séquence au cours de la pratique et de fait, sur l'apprentissage de la séquence motrice (voir également Perruchet, Bigand & Benoit-Gonin, 1997 ; Buchner, Steffens & Rothkegel, 1998) ; si la mise en place des processus de « chunking » renseigne sur l'apprentissage de la séquence au niveau comportemental, l'apprentissage de la séquence se traduit également par des modifications neurophysiologiques, et notamment au niveau de la représentation des séquences motrices.

En effet, Hikosaka et al. (1999 ; 2002 ; Bapi, Doya & Harner, 2000) ont montré, en s'appuyant sur des données comportementales et physiologiques, que l'apprentissage de séquences motrices apparaissait simultanément et indépendamment à deux niveaux : une représentation visuo-spatiale (e. g., position spatiale de la partie distale du membre et/ou position séquentielle des cibles) et une représentation motrice (e. g., activation du pattern de muscles agoniste/antagoniste – angles articulaires). La représentation du code visuo-spatial est supposée se développer sous une forme relativement abstraite (effecteur indépendant), de manière consciente (i. e., explicite), et être la représentation dominante au début de la pratique. La représentation du code moteur est quant à elle supposée se développer avec la pratique (i. e., représentation dominante tard dans la pratique), de manière inconsciente (i. e., implicite), intégrant et représentant plus efficacement les aspects dynamiques du mouvement ; optimisation de la spécificité des effecteurs (effecteur dépendant) utilisés pour produire la séquence.

L'objectif de cette étude était la compréhension des processus de codage, de stockage, et l'évaluation de la nature des représentations sensori-motrices dans l'apprentissage de séquences motrices. Pour cela, nous avons utilisé une tâche continue de flexion-extension du bras dominant (i. e., bras droit). Ce dispositif expérimental nous permettra d'évaluer la cinématique du geste afin d'analyser le pattern de mouvement produit, incluant les transitions entre les éléments, ce qui n'est pas possible avec des tâches de TRS de type « presse-boutons ». Ainsi, notre tâche de mouvement de bras devrait fournir des données complémentaires sur l'apprentissage et la représentation des séquences motrices, et plus particulièrement sur l'évolution du pattern de mouvement produit avec la pratique (i. e., mise en place des « chunks ») et sur les capacités de transfert du pattern de mouvement.

Pour évaluer l'apprentissage et la représentation de la séquence, nous avons utilisé un test de rétention, et deux tests de transfert inter-manuels après 1 et 2 jours de pratique. Lors du test de rétention, les conditions de pratique étaient identiques à celles de la phase d'acquisition (e. g., localisation spatiale des cibles et activation du pattern de flexion-extension identiques à ceux requis en phase d'acquisition). Basés sur les modèles d'Hikosaka et al. (1999 ; 2002), les tests de transfert visuo-spatial et moteur sont supposés évaluer la nature des représentations de la séquence motrice à différents stades de pratique (i. e., après 1 et 2 jours de pratique). Le test de transfert visuo-spatial repose sur l'activation d'un pattern de flexion-extension opposé à celui requis lors de la phase d'acquisition ; l'organisation spatiale des cibles était similaire à celle présentée lors de la phase de pratique, mais les participants devaient réaliser la tâche avec le bras non-dominant (i. e., bras gauche). Le test de transfert moteur repose quant à lui sur l'activation d'un pattern de flexion-extension identique à celui requis lors des phases d'acquisition et de rétention ; l'organisation spatiale des cibles était inversée par rapport à la séquence présentée au cours de la phase de pratique (séquence « miroir »), et les participants devaient également réaliser la tâche avec le bras non-dominant.

En accord avec les prédictions des modèles d'Hikosaka et al. (1999 ; 2002), nous faisons l'hypothèse d'un passage progressif d'un codage de type visuo-spatial et effecteur indépendant tôt dans la pratique (après 1 jour), à un codage de type moteur et effecteur dépendant avec plus de pratique (après 2 jours). En résumé, après 1 jour de pratique, des performances supérieures devraient être observées sur les tests de rétention et transfert visuo-spatial par rapport au transfert moteur ; après 2 jours de pratique, une dégradation des performances sur le test visuo-spatial, et à l'inverse une amélioration des performances sur les tests de rétention et transfert moteur devraient induire de meilleures performances sur les tests de rétention et transfert moteur par rapport au transfert visuo-spatial.

1. Méthode :

Vingt et un participants droitiers (âge moyen = 20.1 ans ± 2.7) ont volontairement participé à cette expérience. Tous ont néanmoins été récompensés pour leur participation sous la forme de crédits de cours. Aucun d'entre eux n'était familier avec la tâche et n'avait été informé sur le but de cette étude. Tous les participants ont rempli le « Edinburgh Handedness Inventory » (Oldfield, 1971) afin de s'assurer que tous étaient droitiers. Le choix de ne sélectionner que des participants ayant tous une même dominance manuelle repose sur les contraintes imposées dans cette étude, et notamment sur le transfert d'apprentissage main dominante *vs.* non-dominante. Le protocole a été approuvé par le comité éthique régional. Chaque participant a également dû au préalable remplir et signer une fiche d'information individuelle témoignant de son consentement à participer à cette expérience.

a) Tâche et dispositif expérimental :

Le dispositif expérimental, illustré sur la Figure 1A, était constitué d'un levier en bois horizontal et d'un écran d'ordinateur. Equipé d'un système de roulement à billes, l'axe du levier permettait un mouvement de rotation de gauche à droite selon un plan horizontal. A proximité de la partie distale du levier était fixée verticalement une poignée en bois. La poignée était ajustable, de sorte que le coude aligné sur l'axe de rotation et l'avant-bras reposant sur le levier, chaque participant puisse confortablement saisir la poignée. Le mouvement horizontal du levier était quantifié par un potentiomètre (fréquence d'échantillonnage de 700 Hz) fixé sur la partie inférieure de l'axe. Un pointeur attaché à l'extrémité du levier permettait de positionner avec précision le levier face à la cible présentée sur l'écran d'ordinateur. Les données mesurées par le potentiomètre concernant les différentes positions du levier au cours du temps ont été récoltées et sauvegardées sur un ordinateur compatible IBM. Les cibles et le temps de mouvement total (TMT) étaient affichés sur un écran d'ordinateur couleur 21" positionné à 80 cm du participant.

Avant de débuter chaque bloc d'essais, les participants avaient pour consigne d'amener le levier sur la position de départ située à l'extrémité gauche sur l'écran d'ordinateur (0 degré, désigné par un « S » sur la Figure 1B). Une fois la position de départ atteinte, neuf cercles étaient horizontalement présentés sur l'écran d'ordinateur. Sur les neuf cercles, seuls quatre d'entre eux (position 1, 4, 7 et 9) ont été utilisés comme cibles dans cette

étude. Le diamètre inter-cibles représentait une extension ou une flexion du coude de 1.5 degré avec le centre des quatre autres cibles utilisées dans la séquence de mouvement, soit des positions de levier de 13.34, 26.68, 40.02, et 53.36 degrés par rapport à la position de départ (incrémentation de 13.34 degrés). Par commodité, les quatre cibles utilisées dans la séquence répétée ont été nommée 1, 2, 3 et 4 par rapport à la position de départ. L'affichage des neuf cercles indiquait que le bloc d'essais pouvait débuter. Après une période préparatoire aléatoire (2-5 secondes avec un intervalle de 0.5 seconde), un signal sonore était émis et la première cible était illuminée (le cercle était rempli).

Les participants avaient pour instruction de déplacer le levier de la position de départ à la cible illuminée le plus rapidement et avec la plus grande fluidité possible. Dès que le pointeur avait franchi le bord du cercle de la cible illuminée, celle-ci s'éteignait et une autre cible s'illuminait instantanément. Cette séquence était répétée jusqu'à ce que le bloc d'essais soit terminé. Notons cependant que les périmètres des cibles non illuminées restaient visibles sur l'écran d'ordinateur durant toute la durée du bloc d'essais.

Une séquence composée de 16 éléments (cibles : 2, 3, 4, 3, 2, 3, 2, 1, 2, 3, 2, 3, 4, 3, 2, et 1) était présentée consécutivement dix fois dans chaque bloc (160 essais par bloc). Si une cible était omise ou non atteinte par le participant, celle-ci restait illuminée jusqu'à ce que le participant finisse par l'atteindre en déplaçant le levier. Les dix répétitions de la séquence (1 bloc d'essais) achevées, un signal sonore était émis et les neuf cercles présentés sur l'écran d'ordinateur disparaissaient. La connaissance du résultat (CR) sur le TMT réalisé par le participant lui était fournie visuellement à l'écran après chaque essai pendant 5 secondes. Chaque bloc d'essais était suivi d'une période de 30 secondes durant laquelle les participants pouvaient se reposer. Les participants n'étaient pas informés sur le fait que les cibles étaient présentées selon un ordre répété.

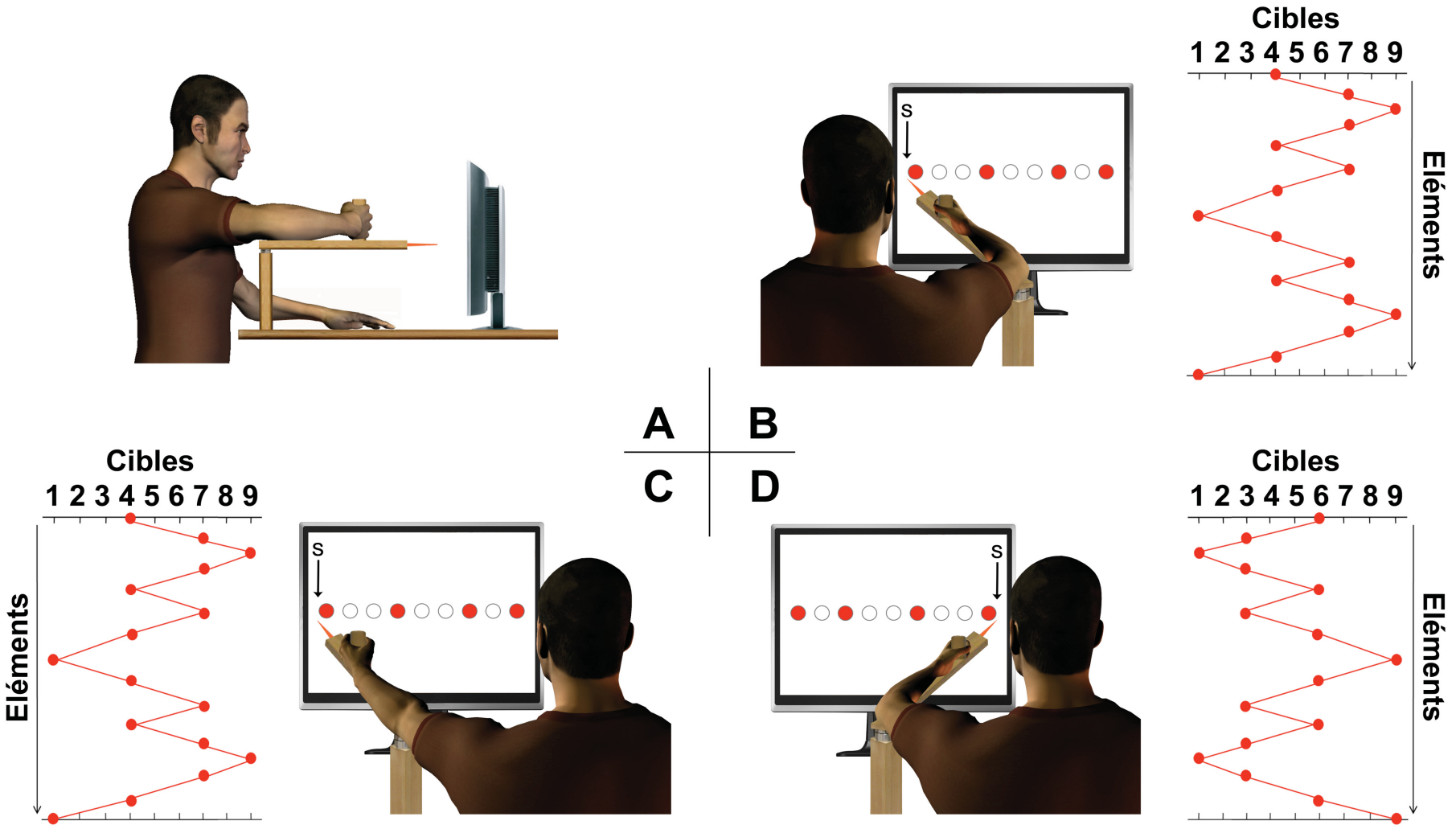


Figure 1. Illustration du dispositif expérimental (A) et du pattern de mouvement à réaliser (séquence à 16 éléments) avec la main dominante lors des phases d'acquisition et de rétention (B), et avec la main non-dominante lors des phases de transferts visuo-spatial (C) et moteur (D). La position de départ (S) et les cibles (cercles pleins) utilisées pour produire la séquence sont illustrées pour chacune des phases expérimentales (conditions B à D) ; les cibles (cercles vides) non utilisées dans la séquence étaient également affichées sur l'écran d'ordinateur mais n'étaient jamais illuminées.

b) Groupes expérimentaux et procédure :

Dès leur arrivée, les participants ont été assignés de manière aléatoire dans une des deux conditions expérimentales, définies par la quantité de pratique (1 ou 2 jours de pratique) : groupe « Acquisition courte » pour 1 jour de pratique, et groupe « Acquisition longue » pour 2 jours de pratique. Pour une partie des participants (N = 12) l'expérience s'est déroulée sur deux jours consécutifs et était composée de quatre phases expérimentales : une phase d'acquisition le Jour 1, un test de rétention et deux tests de transfert le Jour 2. Pour l'autre partie des participants (N = 9) l'expérience s'est déroulée sur trois jours consécutifs et était composée de cinq phases expérimentales : une phase d'acquisition le Jour 1, une seconde phase d'acquisition le Jour 2, un test de rétention et deux tests de transfert le Jour 3 (voir Tableau 1).

Tableau 1. Récapitulatif des phases et groupes expérimentaux.

		Jour 1	*Jour 2*		
		Acquisition 1	**Rét.***	**Tr. VS***	**Tr. M***
GROUPES	Acquisition courte	1 bloc SA + 14 blocs SR + 1 bloc SA	1 bloc	1 bloc	1 bloc

		Jour 1	*Jour 2*	*Jour 3*		
		Acquisition 1	**Acquisition 2****	**Rét.****	**Tr. VS****	**Tr. M****
GROUPES	Acquisition longue	1 bloc SA + 14 blocs SR + 1 bloc SA	1 bloc SA + 14 blocs SR + 1 bloc SA	1 bloc	1 bloc	1 bloc

*réalisé par les participants du groupe « Acquisition courte » uniquement.
**réalisé par les participants du groupe « Acquisition longue » uniquement.
SA = Séquence Aléatoire ; SR = Séquence Répétée ; Rét. = Rétention ; Tr. VS = Transfert visuo-spatial ; Tr. M = Transfert moteur ; Bloc = 10 répétitions d'une séquence à 16 éléments.

Les participants ont été testés individuellement dans une pièce obscure et silencieuse. A leur arrivée dans la salle expérimentale, chaque participant recevait des instructions écrites et verbales sur le déroulement de la tâche. Les participants devaient s'asseoir sur une chaise surélevée et ajustable face à l'écran d'ordinateur. Le dispositif expérimental était ajusté de manière à ce que le bras inférieur du participant soit placé approximativement à 80 degrés du bras supérieur en position de départ.

Pour se familiariser au dispositif expérimental, tous les participants devaient réaliser un premier bloc d'essais dont l'ordre de présentation des cibles était aléatoire, nommée Séquence Aléatoire (SA). A la suite de ce premier bloc de familiarisation, tous les participants ont pratiqué quatorze blocs d'essais composés de dix répétitions d'une séquence répétée (SR) à 16 éléments (cibles : 2, 3, 4, 3, 2, 3, 2, 1, 2, 3, 2, 3, 4, 3, 2, et 1). Pour terminer la phase d'acquisition du Jour 1, l'ensemble des participants a réalisé un dernier bloc d'essais composé de dix répétitions de la séquence aléatoire. Ce bloc sert de référence pour déterminer l'amélioration générale des performances des participants.

Pour résumer, un total de seize blocs d'essais constituait la phase d'acquisition du Jour 1 pour l'ensemble des participants. Les blocs comportant la séquence aléatoire étaient utilisés aux Blocs 1 et 16. A noter que les participants n'étaient pas informés sur l'ordre de présentation des cibles, aussi bien pour les blocs composés de la séquence aléatoire que pour les blocs composés de la séquence répétée.

Approximativement 24 heures après la fin de la phase d'acquisition du Jour 1 ont été administrées les phases de rétention et transferts pour le groupe « Acquisition courte », et la seconde phase d'acquisition (procédure identique à celle de la phase d'acquisition du Jour 1) pour le groupe « Acquisition longue ». Pour finir, le groupe « Acquisition longue » a pratiqué les mêmes tests de rétention et transferts que le groupe « Acquisition courte » approximativement 24 heures après la fin de la phase d'acquisition du Jour 2. Au cours du test de rétention (R), les participants avaient pour consigne de réaliser la séquence expérimentale avec la main droite (i. e., main dominante utilisée lors de la phase d'acquisition ; voir Figure 1B). Les deux tests de transferts ont été quant à eux pratiqués avec la main non-dominante (i. e., main gauche). Dans le premier test, nommé transfert visuo-spatial (S), la configuration visuo-spatiale des cibles sur l'écran (i. e., localisation spatiale des cibles successives) utilisée lors de la phase d'acquisition a été conservée (voir Figure 1C). Dans le second test, nommé transfert moteur (M), le pattern de muscles agonistes/antagonistes utilisé en phase d'acquisition a été réintroduit sur le bras non-dominant (i. e., séquence « miroir » – voir Figure 1D).

Les tests de rétention et transferts étaient tous constitués d'un bloc de 160 essais (i. e., 10 répétitions de la séquence à 16 éléments). Les participants réalisaient dans un premier temps la phase de rétention avant de finir la session par les deux tests de transfert. L'ordre d'administration des tests de transfert visuo-spatial et moteur a été contrebalancé entre les participants de chaque groupe expérimental. Aucune CR n'était donnée aux participants

durant les tests de rétention et transferts. Lors de la réalisation de ces tests, les participants étaient à nouveau encouragés à réaliser la tâche de la manière la plus rapide et fluide possible.

c) Questionnaire post-expérimental :

A la fin de l'expérience, chaque participant a rempli un questionnaire post-expérimental afin de déterminer et quantifier le niveau de conscience et de connaissance des participants sur la tâche/séquence répétée. Dans ce questionnaire (cf. annexes), et par l'intermédiaire de questions d'ordre général puis spécifiques sur la séquence expérimentale pratiquée, nous avons voulu évaluer l'apprentissage implicite et/ou explicite des participants sur la séquence répétée.

d) Analyse des données cinématiques :

L'analyse des données cinématiques (déplacement, vitesse et accélération) a été réalisée à partir du logiciel Matlab (Mathworks, Natick, MA). Le signal correspondant au déplacement angulaire du levier a été obtenu à partir des données potentiométriques récoltées. Pour réduire le bruit, le signal a été filtré avec un filtre Butterworth passe haut/bas de deuxième ordre avec une coupe de fréquence de 10 Hz. A partir de ce signal, nous avons calculé la vitesse angulaire en utilisant un algorithme de différence à 3 points. Un lissage du signal « vitesse » a été réalisé avec un algorithme de moyenne mobile à 3 points avant de calculer l'accélération angulaire en utilisant un algorithme de différence à 3 points.

2. Résultats :

Un exemple de tracés sur les données cinématiques (déplacement, vitesse et accélération) récoltées lors de la réalisation du Bloc 15 (Jour 1) est présenté sur la Figure 2. Dans cette étude, le nombre de *zero crossings* produits a été comptabilisé à partir des données d'accélération. Les *zero crossings* (i. e., accélération nulle) indiquent des pauses ou des changements de direction dans la réalisation de la séquence motrice : 8 étant le nombre minimum de *zero crossings* requis pour réaliser la tâche (i. e., 8 changements de directions), cette mesure renseigne sur la fluidité du geste lors de la production de la séquence ; plus le nombre de *zero crossings* produits sera proche de 8, et plus le geste sera fluide. Les

graphiques des variables TM et *zero crossings* au cours des phases d'acquisitions et rétention/transferts sont respectivement représentés sur les Figures 3A et 3B.

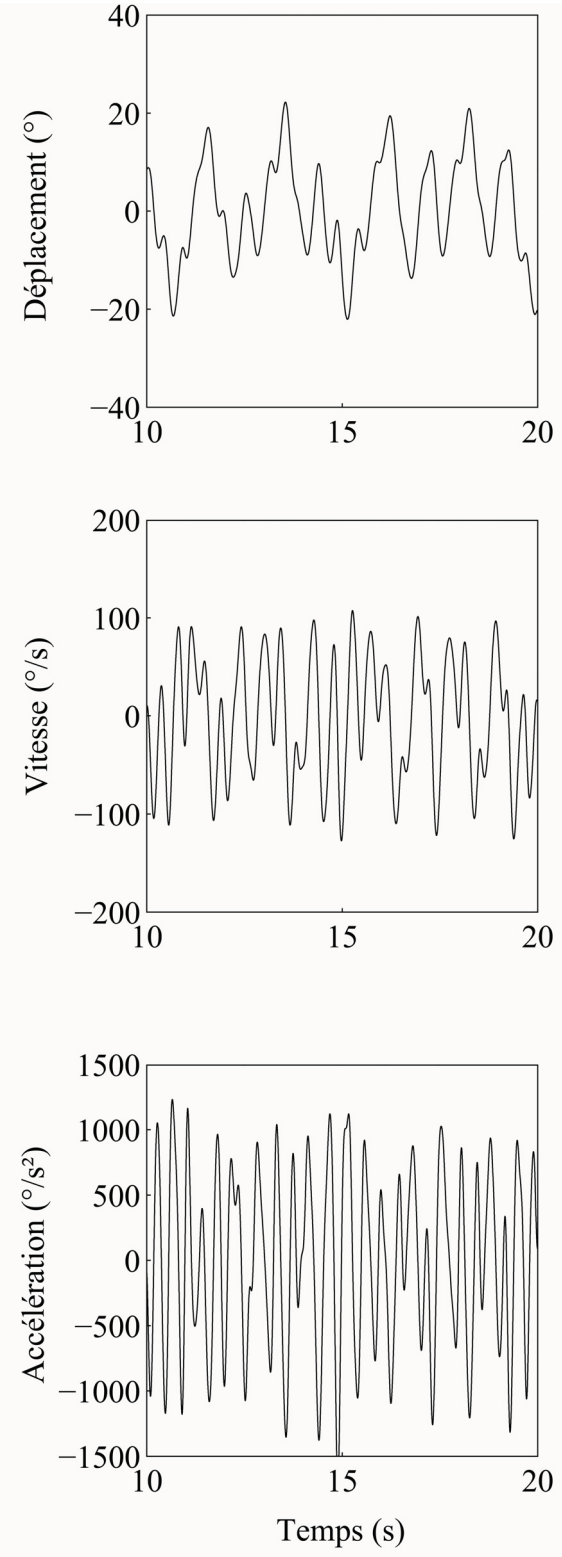


Figure 2. Exemple de tracés sur les données cinématiques (déplacement du levier, vitesse et accélération) récoltées au cours de la réalisation du Bloc 15 du Jour 1 (dernier bloc d'essais comportant la séquence répétée lors de la phase d'acquisition). ° = degré ; s = seconde.

a) Phase d'acquisition (Jour 1) :

Temps de mouvement. Les données enregistrées en phase d'acquisition ont été analysées en deux temps. Une première analyse portait sur les Blocs 1 et 16 : blocs d'essais réalisés sur la séquence aléatoire. L'ANOVA a été réalisée selon le plan 2 × 2 (Groupe × Bloc) avec mesures répétées sur le facteur Bloc. La seconde analyse portait sur les blocs d'essais comportant la séquence répétée (Blocs 2 à 15) selon le plan 2 × 14 (Groupe × Bloc), avec mesures répétées sur le facteur Bloc (Figure 3A). Tous les résultats significatifs à $p < .05$ ont été rapportés. Les comparaisons post-hoc ont été réalisées par le Test multi-étendues de Ducan et étendues critiques.

La première analyse indique un effet principal du facteur Bloc, $F(1,19) = 152.90$, $p < .05$, indiquant que les participants sont plus rapides pour réaliser la séquence aléatoire du Bloc 16 (TM moyen = 301.98 ms) que celle du Bloc 1 (427.55 ms).

La seconde analyse révèle un effet principal du facteur Bloc, $F(13,247) = 50.51$, $p < .05$, qui se traduit par une augmentation significative des performances des participants au cours des quatre premiers blocs (Blocs 2, 3, 4 et 5 avec respectivement 384.18, 345.34, 335.42 et 314.57 ms). Le TM ne diminue pas significativement après le Bloc 10 (253.14 ms).

Zero crossings. Les données enregistrées en phase d'acquisition ont été analysées en deux temps (Figure 3B). Une première analyse portait sur les Blocs 1 et 16 selon le plan 2 × 2 (Groupe × Bloc) avec mesures répétées sur le facteur Bloc. L'ANOVA de la seconde analyse a porté sur les Blocs 2 à 15 selon le plan 2 × 14 (Groupe × Bloc), avec mesures répétées sur le facteur Bloc.

La première analyse indique un effet principal du facteur Bloc, $F(1,19) = 48.39$, $p < .05$, révélant une diminution du nombre de *zero crossings* du Bloc 1 (nombre moyen = 30.90) au Bloc 16 (n = 22.09).

La seconde analyse révèle un effet principal du facteur Bloc, $F(13,260) = 18.37$, $p < .05$, avec un nombre de *zero crossings* supérieur sur les trois premiers blocs (Blocs 2, 3 et 4 avec respectivement n = 26.52, 24.57 et 23.71) comparés aux autres blocs. Le nombre de *zero crossings* diminue progressivement au cours de la phase de pratique jusqu'au Bloc 9 (n = 18.76), après lequel aucune baisse significative n'est observée.

Temps de mouvement moyen par élément. Deux analyses séparées ont été réalisées, respectivement sur les Blocs 1 et 16 selon le plan 2 × 16 (Bloc × Elément) et sur les Blocs 2 et 15 selon le plan 2 × 16 (Bloc × Elément), avec mesures répétées sur les deux facteurs pour chacune des deux analyses (respectivement Figures 4A et 4B). Le facteur Elément a été inclus dans ces analyses afin de déterminer l'évolution de la structure de la séquence motrice produite au début et à la fin de la première phase d'acquisition.

La première analyse (Blocs 1 et 16 – séquence aléatoire) révèle un effet principal du facteur Bloc, $F(1,20) = 160.74$, Elément, $F(15,300) = 82.38$, ainsi qu'une interaction Bloc × Elément, $F(15,300) = 8.76$, $ps < .05$. Les comparaisons post-hoc révèlent une augmentation significative du temps de mouvement sur les éléments 3, 7, 12, 13 et 15 de la séquence sur le Bloc 1, et une augmentation significative du temps de mouvement sur les éléments 3, 6, 7, 12, 13 et 15 de la séquence sur le Bloc 16.

La seconde analyse (Blocs 2 et 15 – séquence répétée) révèle un effet principal du facteur Bloc, $F(1,20) = 128.98$, Elément, $F(15,300) = 18.49$, ainsi qu'une interaction Bloc × Elément, $F(15,300) = 9.53$, $ps < .05$. Les comparaisons post-hoc indiquent une augmentation significative du temps de mouvement sur les éléments 3, 6, 7, 13 et 15 de la séquence sur le Bloc 2, et une augmentation significative du temps de mouvement sur les éléments 1, 3, 6, 11 et 16 de la séquence sur le Bloc 15.

b) Phase d'acquisition (Jour 2) :

Temps de mouvement. Les données enregistrées lors de la seconde phase d'acquisition ont été analysées en deux temps. La première analyse portait sur les Blocs 1 et 16 (séquence aléatoire) et la seconde sur les Blocs 2 à 15 (séquence répétée), avec mesures répétées sur le facteur Bloc pour les deux analyses (Figure 3A).

La première analyse indique un effet principal du facteur Bloc, $F(1,8) = 7.88$, $p < .05$, qui se traduit par des performances supérieures sur le Bloc 16 (248.64 ms) comparé au Bloc 1 (277.36 ms).

La seconde analyse révèle un effet principal du facteur Bloc, $F(13,104) = 18.25$, $p < .05$. L'analyse indique que les participants sont moins performants sur les Blocs 2 et 3

(respectivement 219.53 et 200.09 ms) que sur les autres blocs. Le TM ne diminue pas significativement après le Bloc 12 (155.42 ms).

Zero crossings. Les données enregistrées lors de la seconde phase d'acquisition ont été analysées en deux temps (Figure 3B). La première analyse portait sur les Blocs 1 et 16 et la seconde sur les Blocs 2 à 15, avec mesures répétées sur le facteur Bloc pour les deux analyses.

La première analyse n'indique aucun effet principal.

La seconde analyse révèle un effet principal du facteur Bloc, $F(13,104) = 7.55$, $p < .05$, avec un nombre de *zero crossings* supérieur sur les trois premiers blocs (Blocs 2, 3 et 4 avec respectivement n = 15.44, 14.22 et 13.77) comparés aux autres blocs.

Temps de mouvement moyen par élément. Deux analyses séparées ont été réalisées, respectivement sur les Blocs 1 et 16 selon le plan 2 × 16 (Bloc × Elément) et sur les Blocs 2 et 15 selon le plan 2 × 16 (Bloc × Elément), avec mesures répétées sur les deux facteurs pour chacune des deux analyses (respectivement Figures 4C et 4D). Ces analyses ne reposent que sur les données du groupe « Acquisition longue ».

La première analyse révèle des effets principaux pour les facteurs Bloc, $F(1,8) = 7.88$ et Elément, $F(15,120) = 39.57$, $ps < .05$. L'analyse du facteur Bloc révèle une baisse du temps du mouvement sur le Bloc 16 (276.27 ms) comparé au Bloc 1 (308.18 ms). Pour le facteur Elément, l'analyse indique une augmentation significative du temps de mouvement sur les éléments 3, 6, 7, 12, 13 et 15 de la séquence.

La seconde analyse révèle un effet principal du facteur Bloc, $F(1,8) = 134.59$, $F(15,120) = 23.27$, ainsi qu'une interaction Bloc × Elément, $F(15,120) = 24.23$, $ps < .05$. Les comparaisons post-hoc indiquent une augmentation significative du temps de mouvement sur les éléments 3, 6, 7, 12, 13 et 15 de la séquence au Bloc 2, et sur les éléments 1, 3, 6, 11 et 16 de la séquence au Bloc 15.

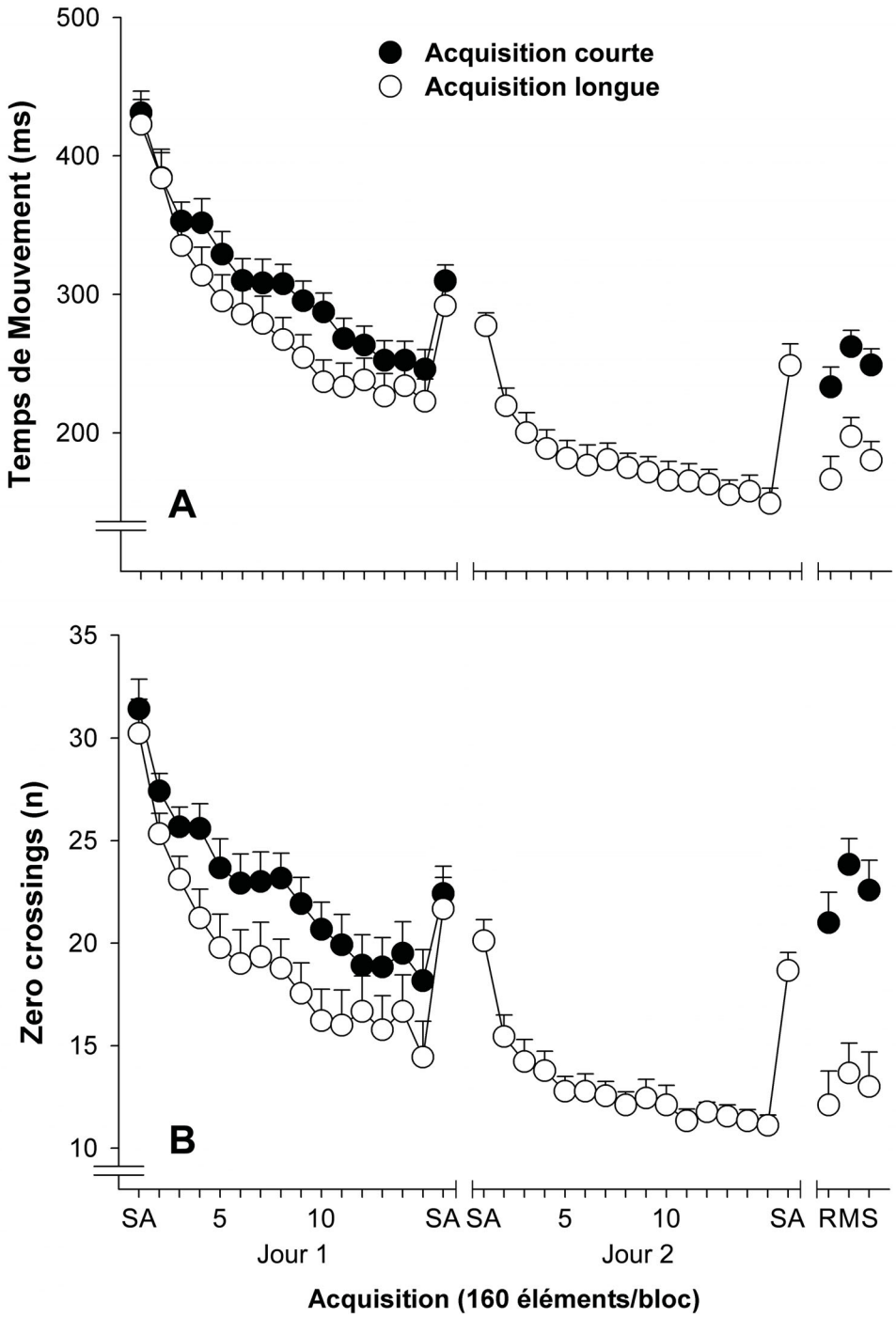


Figure 3. Temps de Mouvement moyens (A) et nombre de Zero crossings moyens (B) produits au cours des phases d'acquisitions (Jour 1 et Jour 2), rétention (R), transfert moteur (M) et transfert visuo-spatial (S) pour les groupes « Acquisition courte » et « Acquisitioin longue ». SA = Séquence Aléatoire.

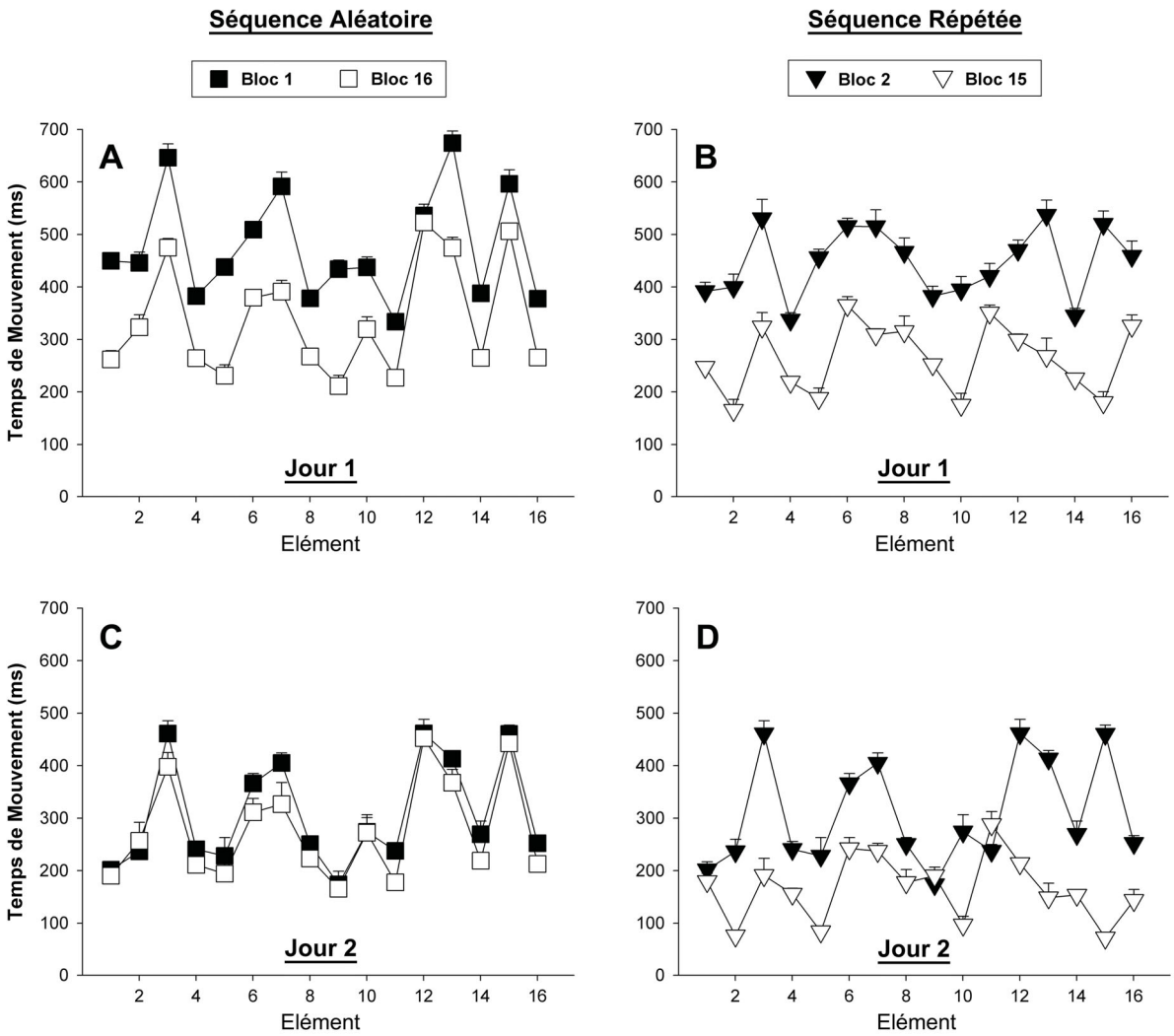


Figure 4. Temps de Mouvement moyens par élément produits sur la séquence aléatoire aux Blocs 1 et 16 (Jour 1 et Jour 2, respectivement A et C), et sur la séquence répétée aux Blocs 2 et 15 (Jour 1 et Jour 2, respectivement B et D).

c) Phases de rétention/transferts :

Temps de mouvement. Les tests de rétention (R) et transferts (S et M) ont été analysés selon le plan 2 × 3 × 16 (Groupe × Test × Elément), avec mesures répétées sur les deux derniers facteurs. Le facteur Elément a été inclus dans cette analyse afin de déterminer si la structure de la séquence motrice produite varie au cours des tests de rétention/transferts (Figure 5).

L'analyse indique un effet principal du facteur Groupe, $F(1,19) = 8.02$, Test, $F(2,38) = 13.67$, Elément, $F(15,285) = 31.78$, ainsi qu'une interaction Test × Elément, $F(30,570) = 3.22$, $ps < .05$. L'analyse du facteur Groupe indique qu'avec plus de pratique, les participants du groupe « Acquisition longue » obtiennent des performances supérieures (188.14 ms) à celle du groupe « Acquisition courte » (248.11 ms) sur les tests de rétention/transferts. Pour le facteur Test, l'analyse révèle que les participants sont significativement plus rapides sur le test de rétention (207.39 ms) comparé aux tests de transfert visuo-spatial (223.56 ms) et moteur (236.27 ms) ; notons que les performances obtenues sur les tests de transfert visuo-spatial et moteur diffèrent significativement. L'analyse du facteur Elément indique une augmentation significative du temps de mouvement pour produire les éléments 1, 3, 6, 11, 14 et 16 de la séquence. Enfin, pour l'interaction Test × Elément, les comparaisons post-hoc révèlent que l'augmentation significative du temps de mouvement pour produire les éléments 1, 3, 6, 11, 14 et 16 se retrouve sur les deux tests de transfert visuo-spatial et moteur, ainsi que sur le test de rétention à l'exception de l'élément 14 : augmentation du temps de mouvement sur les éléments 1, 3, 6, 11 et 16 en rétention.

Zero crossings. Les tests de rétention (R) et transferts (S et M) ont été analysés selon le plan 2 × 3 (Groupe × Test), avec mesure répétée sur le facteur Test (Figure 3B).

L'analyse révèle des effets principaux des facteurs Groupe, $F(1,19) = 20.69$, et Test, $F(2,38) = 6.45$, $ps < .05$. L'analyse du facteur Groupe indique une plus grande fluidité dans la production de la séquence motrice pour le groupe « Acquisition longue » (n = 12.92 contre 22.47 pour le groupe « Acquisition courte »). L'effet principal du facteur Test se traduit par une fluidité du geste plus importante sur le test de rétention (n = 17.19) comparée aux tests de transfert visuo-spatial (n = 18.47) et moteur (n = 19.47). Le nombre de *zero crossings* produit sur les deux tests de transfert ne diffère pas significativement.

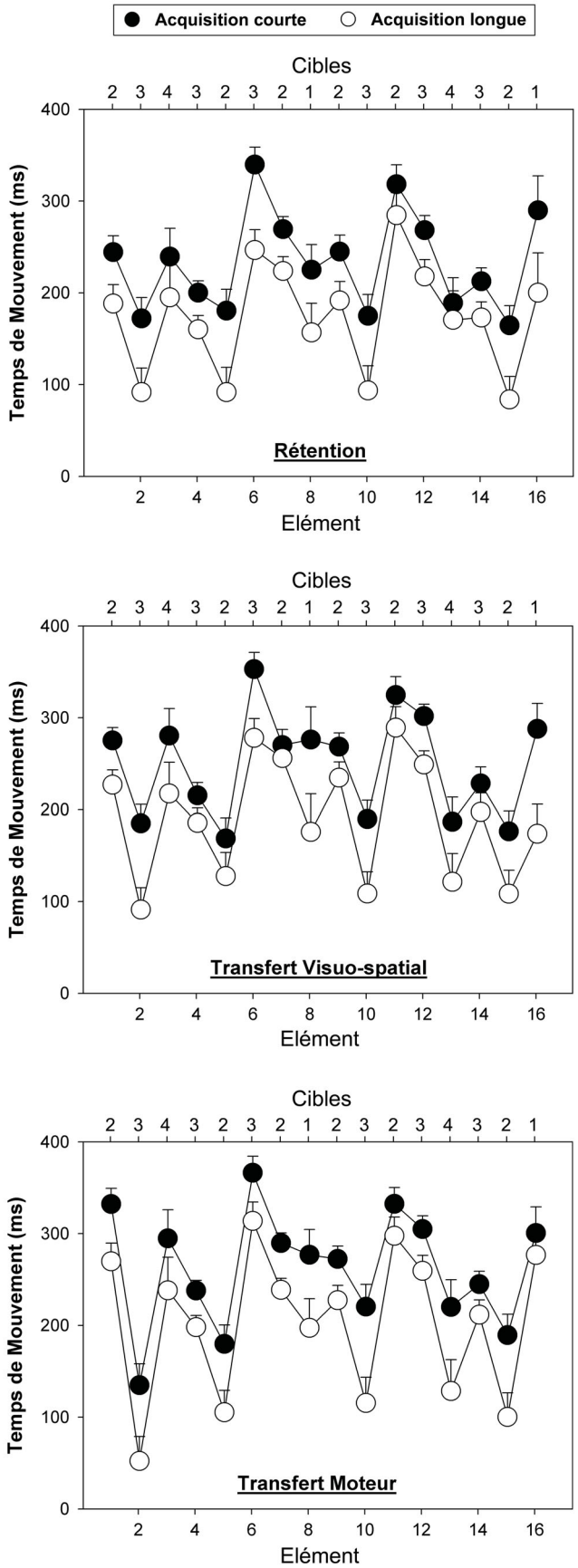


Figure 5. Temps de Mouvement moyens par élément produits par les participants des groupes « Acquisition courte » et « Acquisition longue » au cours des tests de rétention, transfert visuo-spatial et transfert moteur.

d) Questionnaire post-expérimental :

Le questionnaire a révélé que tous les participants ont démontré une connaissance explicite de la séquence, en indiquant qu'une séquence répétée était utilisée au cours de la phase d'acquisition, mais que certains blocs de pratique étaient différents. De plus, de manière assez inattendue, certains d'entre eux ont fourni des informations détaillées sur l'ordre de la séquence et sur son mouvement associé (voir annexes).

3. Discussion :

L'objectif principal de cette étude était la compréhension des processus de codage, de stockage, et l'évaluation de la nature des représentations sensori-motrices dans l'apprentissage de séquences motrices à différents stades de pratique. Pour cela, nous avons évalué les performances des participants après une phase d'acquisition courte ou longue (respectivement 1 ou 2 jours de pratique) lors de tests de rétention et de transferts inter-manuels.

Dans un premier temps, tous les participants ont réalisé une première phase d'acquisition le Jour 1. Les analyses révèlent que les participants améliorent leurs performances au cours de la phase d'acquisition (baisse du temps de mouvement et du nombre de *zero crossings*) sur les blocs d'essais comportant la séquence répétée à 16 éléments (i. e., Blocs 2 à 15) ; notons qu'aucune différence significative n'est observée entre les performances des groupes « Acquisition courte » et « Acquisition longue ». De plus, l'analyse du pattern de mouvement produit sur la séquence répétée aux Blocs 2 et 15 révèle une interaction Bloc × Elément qui indique une évolution de la structure de la séquence avec la pratique : l'apparition progressive des « chunks » renseigne notamment sur l'apprentissage de la séquence répétée (e. g., Perruchet, Bigand & Benoit-Gonin, 1997 ; Buchner, Steffens & Rothkegel, 1998).

Les participants des deux groupes se sont également révélés plus performants en termes de rapidité d'exécution et de fluidité du geste sur le bloc 16 comparé au bloc 1 (les blocs 1 et 16 comportaient la séquence aléatoire). Ce résultat suggère une amélioration générale de la performance qui n'est pas directement liée à l'apprentissage de la séquence répétée, mais plutôt à une familiarisation des participants avec les caractéristiques générales de la tâche. Des résultats similaires apparaissent pour le groupe « Acquisition longue » lors la seconde phase d'acquisition (Jour 2) : amélioration des performances au cours de la phase de

pratique (i. e., Blocs 2 à 15 comportant la séquence répétée), et performances supérieures sur le Bloc 16 comparé au Bloc 1 (i. e., Blocs 1 et 16 comportant la séquence aléatoire).

Les données observées sur les tests de rétention-transferts après 1 et 2 jours de pratique montrent que les participants des deux groupes sont plus performants sur le test de rétention (207.39 ms) comparé aux tests de transfert visuo-spatial (223.56) et moteur (236.27 ms). Notons également que les performances obtenues sur les tests de transfert visuo-spatial et moteur diffèrent significativement. De plus, l'absence d'interaction Groupe × Test lors des tests de rétention/transferts dans cette étude suggère que contrairement à nos hypothèses, le groupe « Acquisition longue » ayant bénéficié d'un jour supplémentaire de pratique n'a pas produit des performances supérieures sur le test de transfert moteur comparé au transfert visuo-spatial : les groupes « Acquisition courte » et « Acquisition longue » ont tous les deux été plus performants sur le transfert visuo-spatial. Les résultats indiquent simplement une baisse générale du temps de mouvement et du nombre de *zero crossings* produits sur les tests de rétention/transferts avec la pratique. Nos résultats suggèrent donc une prédominance du code visuo-spatial dans la représentation de la séquence motrice à ce stade de pratique ; une influence modérée du code moteur étant par ailleurs révélée par l'absence d'indépendance du système effecteur pour produire la séquence lors des tests de transfert.

Indépendance/dépendance du système effecteur :

Sur la base des modèles d'Hikosaka et al. (1999 ; 2002), nos hypothèses étaient en faveur d'une dominance du code visuo-spatial au début de la pratique, associée à une indépendance du pattern d'activation des effecteurs (flexion-extension) impliqués dans la réalisation de la séquence motrice : un passage progressif d'une représentation abstraite (effecteur indépendant) à une représentation plus spécifique (effecteur dépendant) étant supposée se développer avec la pratique. Cependant, les résultats obtenus après 1 et 2 jours de pratique indiquent que les performances observées sur le test de rétention sont supérieures à celles obtenues sur les tests de transferts ; notons également que les participants sont plus performants sur le test de transfert visuo-spatial que sur le test de transfert moteur et ce, indépendamment de la quantité de pratique administrée (i. e., après 1 et 2 jours de pratique). Les résultats obtenus suggèrent donc une prédominance du code visuo-spatial dans la représentation de la séquence motrice (après 1 et 2 jours de pratique) qui n'est toutefois pas associée à une indépendance du système effecteur. Se pose alors la question de la quantité de

pratique : le code moteur est-il suffisamment développé après 1 jour de pratique (i. e., 14 blocs d'essais) pour influencer les capacités de transfert inter-manuels ? En d'autres termes, ne faudrait-il pas administrer une moindre quantité d'essais de pratique pour observer une dominance du code visuo-spatial associée à une indépendance du système effecteur ? Au contraire, ne faudrait-il pas davantage de pratique pour observer une dépendance du système effecteur associée à une dominance du code moteur dans la représentation des séquences motrices ? Une analyse théorique détaillée sur la représentation des séquences motrices devrait permettre d'éclaircir ces interrogations.

En effet, de nombreuses théories sur l'apprentissage de séquences motrices s'accordent sur un point : les représentations sous-tendant la production des séquences de mouvements seraient hiérarchiquement organisées en deux niveaux principaux. D'une façon générale, les propositions théoriques suggèrent une représentation de la séquence à un niveau « cognitif » ou « haut niveau » (i. e., organisation spatiale et temporelle des éléments de la séquence) supposée se développer indépendamment d'une représentation de la séquence à un niveau « moteur » ou « bas niveau » (i. e., activation spécifique des effecteurs). Bien que ces deux représentations se développent indépendamment et hiérarchiquement, elles sont toutefois supposées se coordonner pour pouvoir produire un comportement adéquat. Notons par ailleurs que ces niveaux de représentations ont déjà largement été étudiés dans le passé sous différentes formes : caractéristiques relatives et absolues (e.g., Schmidt, 1975), invariantes et paramétriques (Schmidt, 1985 ; 1988), structurelles et métriques (Kelso, 1981), essentielles et non-essentielles (e. g., Kelso, Putnam & Goodman, 1983 ; Langley & Zelaznik, 1984), visuo-spatiales et motrices (e. g., Bapi, Doya & Harner, 2000 ; Hikosaka, Nakahara, Rand, Sakai, Lu, Nakamura, Miyachi & Doya, 1999 ; Hikosaka, Nakamura, Sakai & Nakahara, 2002), ou cognitives et motrices (e. g., Keele, Jennings, Jones, Caulton & Cohen, 1995 ; Park, Wilde & Shea, 2004 ; Verwey, 1999). Plus directement, Keele et al. (1995 ; voir également Verwey, 1994) proposent qu'un module « cognitif » serait responsable de l'organisation des séquences motrices, alors qu'un module indépendant nommé « moteur » serait quant à lui responsable de générer les commandes motrices spécifiques associées à la production des éléments de la séquence. Ainsi, la capacité de transfert sur le test visuo-spatial devrait être favorisée tôt dans la pratique, car la représentation cognitive/haut niveau joue un rôle primordial dans la production de la réponse à ce stade de pratique. Ensuite, avec plus de pratique, un lien accru entre les niveaux cognitif/haut niveau et moteur/bas niveau devrait conduire à une représentation à dominance motrice en optimisant la spécificité des effecteurs

utilisés pour produire la séquence : une dépendance du système effecteur apparaît alors avec suffisamment de pratique.

Dans notre étude, la quantité de pratique après 1 jour de pratique (i. e., 14 blocs d'essais) pourrait donc avoir été suffisamment importante pour voir apparaître un lien entre ces deux niveaux de représentations cognitif et moteur, d'où une infériorité des performances sur le test de transfert visuo-spatial par rapport au test de rétention pour le groupe « Acquisition courte ». A l'inverse, alors que les processus de « chunking » s'avèrent toujours présents lors de la seconde phase d'acquisition (i. e., mise en évidence d'un pattern « chunké » entre les Blocs 2 et 15 de la phase d'acquisition du Jour 2), ce résultat laisse penser que le niveau de représentation cognitif a toujours un rôle à jouer à ce stade de pratique, d'où l'absence de mise en évidence d'une dominance du code moteur associée à une dépendance du système effecteur après 2 jours de pratique. Malgré la dépendance du système effecteur observée dans cette étude, notons toutefois les capacités de transfert du pattern de mouvement « chunké » : l'analyse de la structure du mouvement produit sur les tests de rétention/transferts révèle que la structure développée au cours des deux phases de pratique (i. e., pattern produit sur le Bloc 15 des phases d'Acquisition 1 et Acquisition 2) est réutilisée sur les tests de rétention/transferts et ce, indépendamment de l'effecteur et/ou du pattern d'activation musculaire requis pour réaliser la tâche. L'un des résultats importants dans notre étude concerne cette apparente antinomie entre la dépendance du système effecteur et les capacités de transfert du pattern « chunké ». Nous allons donc nous intéresser plus spécifiquement dans la prochaine partie à la structure de la séquence motrice produite lors des phases d'acquisitions et de rétention/transferts.

Structure de la séquence :

Les résultats ne révèlent aucune différence dans l'organisation structurelle de la séquence produite à la fin de chacune des deux phases d'acquisition. Les données indiquent simplement une baisse du temps de mouvement et du nombre de *zero crossings* produits pour réaliser la séquence après 2 jours de pratique. A la fin de la seconde phase d'acquisition, le nombre de *zero crossings* produits approche le nombre minimum requis de 8 *zero crossings* pour réaliser la séquence : un nombre de *zero crossings* supérieur à 8 est le résultat d'hésitations ou de changements de direction inappropriés dans la réalisation de la tâche ; ces *zero crossings* superflus ont tendance à se produire au niveau des transitions entre les sous-séquences (e. g., Shea, Park & Braden, 2006 ; Wilde et Shea, 2006). De plus, l'augmentation

du temps de mouvement sur les éléments 1, 3, 6, 11 et 16 à la fin de chacune des deux phases d'acquisition peut-être interprétée comme le point de départ des différentes sous-séquences développées au cours de la pratique (évolution de la structure du mouvement du Bloc 2 au Boc 15, voir Figures 4B et 4D). Cette interprétation est en accord avec de précédentes études ayant montré que les éléments sont organisés en sous-séquences (Verwey, 2003 ; Park & Shea, 2002 ; 2005), et que le « buffer moteur » serait un facteur limitant dans la mesure où il déterminerait le nombre d'éléments par sous-séquences (Verwey, 1996) ; généralement un maximum de cinq éléments (Verwey, 1999 ; Braden, Panzer & Shea, 2008).

La façon dont ces séquences sont organisées en sous-séquences fournit une information cruciale sur les processus cognitifs impliqués au cours des étapes de récupération, de programmation et d'exécution. Généralement, ces sous-séquences peuvent être définies par une réponse relativement lente sur les premiers éléments de la séquence (i. e., début de la sous-séquence), puis par une réponse plus rapide sur l'élément ou les éléments suivants (e. g., Povel & Collard, 1982 ; Kovacs, Müehlbauer & Shea, 2009 ; Park & Shea, 2005 ; Wilde & Shea, 2006). Le temps de réponse sur le premier élément de la sous-séquence est supposé plus important parce que la sous-séquence doit être récupérée, programmée, et préparée pour l'exécution de la réponse alors que les éléments suivants dans la sous-séquence sont produits plus rapidement et de manière plus fluide parce que les processus associés à leur production ont déjà été effectués. Avec la pratique, le temps requis pour produire le premier élément de la sous-séquence est également réduit par des processus parallèles appelés « concaténation » (Verwey, 2001) ou « co-articulation » (Jordan, 1995). Cette notion de « concaténation » suggère que les processus impliqués dans la préparation de la sous-séquence suivante débutent durant l'exécution de la sous-séquence en cours. Nos résultats supportent la notion de « concaténation » : les données observées après 1 et 2 jours de pratique révèlent que le temps de mouvement moyen pour produire les éléments 1, 3, 6, 11 et 16 (début des sous-séquences) est inférieur après 2 jours.

Toutefois, ces transitions entre les sous-séquences (i. e., processus de « concaténation ») apparaissent désorganisées lorsque le bras non-dominant est requis pour réaliser la tâche lors des tests de transfert visuo-spatial et moteur. Les résultats indiquent que la structure du mouvement développée après 1 jour de pratique pour le groupe « Acquisition courte » et après 2 jours de pratique pour le groupe « Acquisition longue » est apprise, stockée, et réutilisée sur les tests de rétention/transferts. En effet, l'absence d'interaction Groupe × Test × Elément révèle que l'amélioration des performances (i. e., baisse du temps

de mouvement et du nombre de *zero crossings* produits) sur les tests de rétention-transferts pour le groupe « Acquisition longue » comparé au groupe « Acquisition courte » n'est pas due à une modification de la structure du pattern de mouvement produit mais plutôt à une perturbation des processus de « concaténation » lors des tests de transferts inter-manuels. Nos résultats suggèrent également que les informations visuo-spatiales auraient un rôle important à jouer dans la réalisation des processus de « concaténation » comparées aux informations motrices, étant donné qu'une perturbation plus importante apparaît lors du test de transfert moteur.

Conclusion :

En résumé, en faisant varier la quantité de pratique (1 *vs.* 2 jours) et la nature du code requis pour réaliser la séquence lors de tests de rétention et transferts inter-manuels (i. e., visuo-spatial et moteur), nos résultats ont mis en évidence une prédominance du code visuo-spatial tôt dans la pratique, associée à une dépendance du système effecteur. Contrairement aux propositions d'Hikosaka et al. (1999 ; 2002), nos résultats ne révèlent pas de dominance du code moteur associée à la dépendance du système effecteur avec davantage de pratique.

Toutefois, de récents travaux ont apporté des contributions théoriques intéressantes pour interpréter nos résultats. En effet, alors que Panzer et al. (2009) ont récemment mis en évidence la dominance du code moteur dans la représentation des séquences motrices après seulement 99 essais de pratique sur une tâche de production de forme (« waveform task »), il apparaît que les caractéristiques de la tâche, la difficulté de la tâche, et le nombre d'éléments dans une séquence peuvent davantage influencer l'indépendance/dépendance du système effecteur que la quantité de pratique (Kovacs, Boyle, Grützmacher & Shea, en préparation ; Kovacs, Han & Shea, 2009). Ainsi, alors qu'à ce jour aucune étude ayant utilisé une tâche de mouvement de bras sur des séquences à 14 ou 16 éléments n'a permis de mettre en évidence une dominance du code moteur dans la représentation des séquences motrices et ce, même après 12 jours de pratique (Kovacs, Müehlbauer & Shea, 2009), il nous semble intéressant de s'orienter sur ce type de tâches (e. g., « waveform task ») pour poursuivre nos recherches.

4. Perspectives :

Sur la base des travaux précédemment cités (Kovacs, Boyle, Grützmacher & Shea, en préparation ; Kovacs, Han & Shea, 2009 ; Panzer, Krüeger, Müehlbauer & Shea, 2009), nous avons élaboré un projet de recherche sur une tâche de production de forme (« waveform task »). Sachant qu'il n'a été administré qu'une seule quantité de pratique de 99 essais dans ces trois études (Kovacs, Boyle, Grützmacher & Shea, en préparation ; Kovacs, Han & Shea, 2009 ; Panzer, Krüeger, Müehlbauer & Shea, 2009), il nous est pour le moment impossible de déterminer si la dominance du code moteur dans la représentation de la séquence évaluée après 99 essais de pratique est le résultat d'un passage progressif d'une dominance visuo-spatiale à une dominance motrice entre le début et la fin de la phase d'acquisition comme le suggèrent Hikosaka et al. (1999 ; 2002). Ainsi, en utilisant un dispositif expérimental similaire à celui de Panzer et al. (2009), l'originalité de notre étude va reposer sur :

- la manipulation du facteur quantité de pratique : une première phase d'acquisition de 18 essais le Jour 1, des tests de rétention et transferts visuo-spatial/moteur le Jour 2 suivis d'une seconde phase d'acquisition de 135 essais, et enfin des tests de rétention et transferts visuo-spatial/moteur le Jour 3.

- l'utilisation de groupes expérimentaux d'observation et de pratique physique (voir également Boutin, Fries, Panzer, Shea & Blandin, soumis). Le groupe de Pratique Physique (PP) réalisera la tâche ; le groupe Observation d'action (Obs_S+A) observera un sujet modèle réaliser la tâche (observation de la « waveform » + bras du sujet) ; le groupe Observation de la Séquence (Obs_S) n'aura accès qu'à la vision de la « waveform » réalisée par le même sujet modèle, c'est-à-dire aux effets du mouvement de bras du sujet modèle (observation de la « waveform » seule).

L'utilisation de groupes d'observation, en plus du groupe de pratique physique, permet de tester séparément les codes visuo-spatial (groupes Obs_S+A et Obs_S) et moteur (groupe Obs_S+A seul), afin d'évaluer la part respective de chacun des deux codes dans la représentation des séquences motrices et ce, à différents stades de pratique. Il nous sera dès lors possible, à partir des résultats obtenus sur les tests de rétention/transferts (Jours 2 et 3), de déterminer l'évolution de la représentation de la séquence motrice avec la pratique.

– TROISIEME PARTIE –

DISCUSSION GENERALE

CHAPITRE 7

Dans le cadre de ce travail de recherche, nous nous sommes intéressés aux capacités d'apprentissage et de transfert de tâches motrices discrètes et continues. Dans une première partie, nous avons tout d'abord réalisé deux expériences dont l'objectif principal était l'étude des processus mis en jeu lors d'un apprentissage moteur. Pour cela, sur la base des travaux issus de la littérature sur l'effet IC (e. g., Magill et Hall, 1990 ; Brady, 1998, pour des revues), nous avons testé différentes conditions expérimentales visant à faire varier le niveau IC, de manière à approfondir les liens théoriques entre les données comportementales observées et les hypothèses explicatives d'élaboration (Shea & Morgan, 1979 ; Shea & Zimny, 1983) et de reconstruction (Lee & Magill, 1983 ; 1985). D'un point de vue général, la présente étude (Expériences 1 et 2) nous a permis de préciser certaines limites quant aux conditions d'obtention de l'effet IC (e. g., Wulf & Shea, 2002 ; Guadagnoli & Lee, 2004), ainsi que des limites théoriques relatives aux hypothèses d'élaboration et de reconstruction, notamment sur les processus de planification et de programmation du geste lors de la réalisation de tâches discrètes. Nous avons donc, dans la seconde partie de ce travail (Expérience 3), voulu étudier ces mêmes processus dans le cas d'une pratique de tâches continues. Pour ce faire, nous avons utilisé un dispositif expérimental particulier, permettant à la fois des mesures discrètes et continues de la performance. L'apprentissage et les capacités de transfert d'apprentissage (tâches discrètes et continues) ont servi de fil conducteur dans la réalisation de ce travail de thèse.

La discussion générale sera divisée en deux sections principales, dans lesquelles nous reviendrons sur les résultats issus des Expériences 1 et 2 pour la première partie, et sur les résultats de l'Expérience 3 pour la seconde partie.

1. Effet d'interférence contextuelle :

L'un des enjeux majeurs de ce travail de thèse était d'étudier les effets de la condition de pratique et de la similarité des tâches sur les capacités d'apprentissage et de transfert moteur. Nous avons pour cela réalisé deux expériences, où différents niveaux d'IC ont été créés par la manipulation conjointe de ces deux facteurs. Sur la base des travaux de Sekiya et al. (1994 ; 1996), l'une des originalités de cette étude portait sur une approche différente du

facteur « similarité » dans le domaine moteur. En effet, la notion de similarité entre les tâches ne porte plus sur les caractéristiques invariantes du geste (e. g., Lee, Wulf, & Schmidt, 1992 ; Wood & Ging, 1991) mais sur les caractéristiques paramétriques : temporelles (Expérience 1) et spatiales (Expérience 2).

Similarité des tâches motrices :

Sur la base des rares études ayant à ce jour manipulé les facteurs condition de pratique et similarité des tâches dans une même expérience (e. g., Shea & Zimny, 1998 ; Wood & Ging, 1991), nous avions suggéré que la divergence des résultats obtenus entre le domaine verbal (e. g., Battig, 1972 ; 1979) et le domaine moteur pouvait être attribuée à la définition de la « similarité » dans le cas de tâches motrices. En effet, si la similarité sémantique des mots à apprendre semble un critère de jugement assez évident, la similarité de tâches motrices semble au contraire beaucoup plus difficile à établir. L'objectif majeur de cette étude était donc d'aborder la notion de « similarité » dans le domaine moteur sous une approche relativement différente : créer différents niveaux de similarité entre les tâches motrices en fonction du degré de variation des caractéristiques paramétriques du geste.

D'un point de vue général, les données issues des Expériences 1 et 2 où nous avons respectivement fait varier les caractéristiques temporelles et spatiales des tâches à apprendre, révèlent que le niveau IC créé par la condition de pratique est fonction du niveau de similarité entre les tâches. Toutefois, contrairement aux prédictions de Battig (1972 ; 1979) dans le domaine moteur, la pratique de tâches à haut niveau de similarité ne produit pas nécessairement d'augmentation du niveau d'interférence au cours de la phase de pratique et/ou d'amélioration sur l'apprentissage (voir également Wood & Ging, 1991). Ainsi, le facteur similarité des tâches, tel qu'il est actuellement défini dans le domaine moteur (i. e., au niveau des caractéristiques invariantes et/ou paramétriques du geste), ne permet pas de rendre compte des prédictions issues du domaine verbal ; la généralisation du facteur similarité des tâches du domaine de l'apprentissage verbal à celui du domaine moteur reste donc un champ de recherche à approfondir. Notons néanmoins que nos résultats révèlent que le facteur similarité des tâches s'apparente à une variable d'apprentissage susceptible de moduler l'effet IC, ce qui de fait soulève quelques limites théoriques au vu des hypothèses (i. e., hypothèses d'élaboration et de reconstruction) initialement proposées pour expliquer l'effet IC traditionnellement dû à la condition de pratique.

Limites théoriques des hypothèses d'élaboration et de reconstruction :

S'il est relativement bien établi dans la littérature que les processus inter-tâches impliqués dans la condition de pratique aléatoire sont responsables de l'effet IC, alors comment expliquer l'émergence de cet effet IC en fonction du niveau de similarité des tâches et de la quantité de pratique dans cette étude ? L'interaction de ces facteurs implique-t-elle la mise en place de processus spécifiques autres que ceux d'élaboration et de reconstruction initialement proposés pour expliquer les différences d'apprentissage liées aux conditions de pratique ? Ces questions ont largement été discutées dans la partie « Discussion générale » du Chapitre 5. En effet, nous avons détaillé l'étude de Lin et al. (2008), où il ressort que la reconstruction des plans d'actions peut être bénéfique, mais pas suffisante pour expliquer les bénéfices liés à la pratique aléatoire sur l'apprentissage moteur. En ce qui concerne l'hypothèse d'élaboration, qui repose principalement sur l'existence d'une dissociation entre les processus cognitifs impliqués (i. e., processus intra- et inter-tâches) sous condition aléatoire, il convient de s'intéresser précisément aux effets des processus intra- et/ou inter-tâches sur l'apprentissage moteur : l'avantage lié à la condition de pratique aléatoire est-il dû à l'implication des processus inter-tâches seuls, ou associés aux processus intra-tâches ?

Young et al. (1993) ont montré que « surajouter » des processus intra-tâche (i. e., un exemple de mouvement réalisé sur la même tâche que celle précédemment pratiquée par le participant lui était présenté au cours de l'intervalle inter-essais) à des participants sous condition aléatoire était plus avantageux que « surajouter » des processus inter-tâches (i. e., un exemple de mouvement réalisé sur une tâche différente de celle précédemment pratiquée par le participant lui était présenté au cours de l'intervalle inter-essais) : l'ajout de processus inter-tâches pourrait perturber les processus inhérents à la condition de pratique aléatoire. Ces auteurs suggèrent l'existence d'un effet « plafond » sur l'amélioration des performances en rétention due aux processus inter-tâches (voir également Wright, Li & Whitacre, 1994). La condition de pratique aléatoire pourrait de plus engendrer des effets délétères sur l'apprentissage si les participants assignés à la condition de pratique aléatoire ont recours à une activité inter-tâches trop importante lors de la phase de pratique. En d'autres termes, ces résultats ne sont pas en faveur de l'hypothèse d'élaboration : si les bénéfices sur l'apprentissage liés à la condition de pratique aléatoire semblent dus à l'implication des processus intra- et inter-tâches, il reste toutefois quelques points théoriques à éclaircir, notamment en ce qui concerne les effets du facteur similarité des tâches sur les processus intra- et inter-tâches.

Dans notre étude, les conditions *similaire* dans l'Expérience 1 et *non-similaire* dans l'Expérience 2 s'apparentent aux conditions ayant le niveau de complexité le plus élevé. Les résultats dans ces deux conditions à haut niveau de complexité ne révèlent aucune différence bloquée-aléatoire sur les tests de rétention : la pratique de tâches complexes pourrait « surcharger » la mémoire de travail, évitant ou tout au moins limitant les processus d'élaboration (i. e., processus intra- et inter-tâches) impliqués lors d'un apprentissage sous condition aléatoire (Albaret & Thon, 1994 ; Wulf & Shea, 2002). Parallèlement, une reconstruction active et complète des plans d'actions semble de ce fait difficilement réalisable d'un essai à l'autre sous une même condition aléatoire. En d'autres termes, tant que les processus inter-tâches induits par la condition de pratique aléatoire se surajoutent à la charge cognitive déjà importante en mémoire de travail, le développement et la représentation des différents plans d'actions en mémoire seront dégradés. Ainsi, l'interférence intra-tâche inhérente à la pratique de tâches complexes pourrait se révéler favorable à un apprentissage efficace sous condition bloquée aux premiers stades de la pratique. Cependant, la baisse du niveau de difficulté de la situation d'apprentissage induite par l'augmentation de la pratique rend progressivement la tâche moins difficile à réaliser pour l'apprenant ; l'organisation aléatoire de la session d'apprentissage pourrait dans ce cas se révéler une stimulation nécessaire pour forcer l'apprenant à rester actif dans la tâche, et ainsi prolonger l'apprentissage de la tâche (Albaret & Thon, 1998 ; voir également Wulf & Shea, 2002, pour une revue). Un approche différente semble également pouvoir être en mesure de fournir un support théorique pertinent au vu des résultats obtenus : l'hypothèse de « challenge point » (Guadagnoli & Lee, 2004).

Hypothèse de « challenge point » (Guadagnoli & Lee, 2004) :

Selon l'hypothèse de « challenge point », l'effet IC créé par les facteurs condition de pratique et similarité des tâches après une phase d'acquisition longue (i. e., 297 essais *vs.* 99 essais pour l'acquisition courte) peut s'expliquer par une baisse progressive du niveau de difficulté de la tâche avec la pratique. Ces auteurs suggèrent notamment que le concept de « difficulté de la tâche » peut être séparé en deux catégories : une difficulté *nominale* de la tâche et une difficulté *fonctionnelle* de la tâche (voir Chapitre 1). Dans notre étude, en manipulant les facteurs condition de pratique, similarité des tâches et quantité de pratique, nous avons modulé à la fois le niveau de difficulté *fonctionnelle* de la tâche (e. g., bloquée *vs.* aléatoire ; acquisition courte *vs.* acquisition longue) et le niveau de difficulté *nominale* de la

tâche (e. g., similaire *vs.* non-similaire). Les résultats observés sur les tests de rétention après une phase d'acquisition courte et longue sont en accord avec le modèle proposé par Guadagnoli et Lee (2004) : détérioration importante des performances liée au passage d'une acquisition courte à une acquisition longue pour le groupe ayant la difficulté *fonctionnelle* de la tâche la plus faible (i. e., groupe *bloquée-similaire*) et à l'inverse, amélioration des performances avec la pratique pour le groupe expérimental ayant la difficulté *fonctionnelle* de la tâche la plus élevée (i. e., groupe *aléatoire-non similaire*).

Les données comportementales issues de cette étude supportent donc les prédictions théoriques relatives à l'hypothèse de « challenge point » sur l'apprentissage moteur. Toutefois, si ce modèle met en lien la performance immédiate du participant et l'évolution des bénéfices attendus sur l'apprentissage, il ne rend pas compte des capacités de transfert. Autrement dit, comment l'apprentissage de la tâche en fonction des niveaux de difficulté *fonctionnelle* et *nominale* de la tâche peut-il influencer les capacités de transfert au niveau du système effecteur (e. g., apprentissage bras droit et transfert bras gauche) ou sur une nouvelle tâche (e. g., tâche relativement différente de celle(s) pratiquée(s) en acquisition) ? L'étude spécifique des capacités de transfert d'apprentissage en fonction des niveaux de difficulté *fonctionnelle* et *nominale* de la tâche pourrait par ailleurs fournir des données intéressantes, et notamment en lien avec les hypothèses d'élaboration et de reconstruction, sur les processus impliqués lors de la phase de pratique en fonction des caractéristiques de la tâche et des participants.

Conclusion :

Les données comportementales issues des Expériences 1 et 2 fournissent des informations complémentaires importantes sur la compréhension des processus de planification et de programmation du geste. Sur la base des hypothèses d'élaboration, de reconstruction et de « challenge point », il nous est maintenant possible à partir des caractéristiques de la tâche et des participants, de déterminer les conditions de pratique les plus favorables à l'apprentissage et au transfert d'apprentissage de tâches discrètes. La deuxième partie de ce travail de thèse nous a permis de définir plus spécifiquement les processus relatifs à l'apprentissage et au transfert d'apprentissage de tâches continues.

2. Représentation et apprentissage de séquences motrices :

Les objectifs principaux de l'Expérience 3 étaient la compréhension des processus de codage, de stockage, et l'évaluation de la nature des représentations sensori-motrices dans l'apprentissage de séquences motrices à différents stades de pratique. A l'instar de l'étude précédente, nous avons évalué les performances des participants après une phase d'acquisition courte ou longue lors de tests de rétention/transferts. Sur la base des modèles d'Hikosaka et al. (1999 ; 2002), élaborés à partir de données comportementales et neurophysiologiques issues d'études utilisant des tâches de TRS, nous avons utilisé dans notre étude une tâche de mouvement de bras continue comprenant des séquences motrices à la fois discrètes et continues ; dans un premier temps pour reproduire les résultats des précédentes études ayant utilisé des tâches de TRS, et dans un second temps pour fournir des données cinématiques complémentaires sur le pattern de mouvement produit et sur son évolution avec la pratique.

Indépendance/dépendance du système effecteur :

De manière surprenante, et contrairement aux prédictions d'Hikosaka et al. (1999 ; 2002), l'analyse ne révèle aucune interaction Groupe × Test en rétention/transferts, ce qui suggère que le groupe « Acquisition longue » (i. e., 2 jours de pratique) ayant bénéficié d'un jour supplémentaire de pratique n'a pas produit des performances supérieures sur le test de transfert moteur comparé au transfert visuo-spatial ; les groupes « Acquisition courte » et « Acquisition longue » ayant tous les deux été plus performants sur le transfert visuo-spatial. En d'autres termes, contrairement à nos hypothèses, nous n'avons pas observé de passage progressif d'une représentation à dominance visuo-spatiale et effecteur indépendant tôt dans la pratique, à une représentation à dominance motrice et effecteur dépendant avec davantage de pratique. Toutefois, les résultats révèlent que les participants des groupes « Acquisition courte » et « Acquisition longue » sont plus performants sur le test de rétention que sur les tests de transfert visuo-spatial et moteur, ce qui suggère une dépendance du système effecteur relativement tôt dans la pratique, après seulement 1 jour de pratique. Nous avons largement détaillé dans la partie « Discussion » du Chapitre 6 la question de la quantité de pratique, à savoir si le code moteur n'était pas suffisamment développé après 1 jour de pratique pour influencer les capacités de transfert inter-manuels. Cependant, d'un point de vue purement pragmatique, se pose la question de l'évaluation de l'indépendance/dépendance du système effecteur dans notre étude : l'utilisation de transferts inter-manuels pour évaluer une

dominance du code visuo-spatial ou moteur dans la représentation de la séquence motrice est-elle adaptée pour rendre compte également de l'indépendance/dépendance du système effecteur ? En d'autres termes, l'interaction Groupe × Test attendue en rétention/transferts ne suppose-t-elle pas une dépendance du système effecteur ? Peut-on mettre en évidence l'indépendance du système effecteur alors que les deux tests de transfert requièrent l'utilisation du bras non-dominant pour produire la séquence ? Les données observées dans notre étude semblent donc davantage évaluer une capacité à produire un pattern de mouvement censé refléter la nature du code dominant dans la représentation de la séquence, plutôt qu'une indépendance/dépendance du système effecteur : le transfert visuo-spatial repose sur l'activation d'un pattern de flexion-extension opposé à celui requis lors de la phase d'acquisition ; le transfert moteur repose sur l'activation du même pattern de flexion-extension que celui requis lors de la phase d'acquisition. L'utilisation d'un dispositif expérimental permettant à la fois une évaluation des codes visuo-spatial et moteur, et de l'indépendance/dépendance du système effecteur par des tests de transferts appropriés, inter-manuels ou non, semble une piste intéressante dans la poursuite de recherches sur la représentation des séquences motrices.

De plus, notons également que de récents travaux suggèrent qu'une spécialisation hémisphérique limiterait le développement et/ou l'utilisation d'un ou de plusieurs codes en fonction du membre utilisé lors des phases d'acquisition/transfert (e. g., Rushworth, Krams & Passingham, 2001 ; Grafton, Hazeltine & Ivry, 2002 ; Schumacher, Elston & D'Esposito, 2003 ; Sainburg, 2002). Une étude de Sakai et al. (2003) ayant par ailleurs mis en évidence une capacité de transfert de la main non-dominante à dominante pour réaliser la séquence motrice et à l'inverse, une incapacité à transférer de la main dominante à non-dominante. En effet, ces auteurs suggèrent une asymétrique des hémisphères cérébraux dans le stockage et/ou la représentation des « chunks » appris : lorsqu'une séquence est apprise avec la main dominante (e. g., main droite), le pattern « chunké » serait représenté dans l'hémisphère dominant (e. g., hémisphère gauche ; voir Graybiel, 1998) et la main non-dominante (e. g., main gauche) n'aurait pas accès à la représentation du pattern « chunké », d'où une incapacité à transférer de la main dominante à non-dominante. A l'inverse, lorsqu'une séquence est apprise avec la main non-dominante (e. g., main gauche), il y a deux possibilités : 1) soit le pattern « chunké » est stocké dans l'hémisphère non-dominant (e. g., hémisphère droit) et l'hémisphère dominant peut avoir accès à la représentation du pattern « chunké », 2) soit le pattern « chunké » est représenté dans les deux hémisphères et par conséquent les mains

dominante et non-dominante ont accès à la représentation du pattern « chunké » ; dans ce cas le pattern de mouvement appris avec la main non-dominante peut être transférer à la main dominante.

Cette asymétrie de transfert observée dans l'étude de Sakai et al. (2003) pourrait toutefois s'expliquer par la différence dans le niveau d'apprentissage entre les mains dominante et non-dominante. En effet, Rand et al. (1998 ; 2000) ont suggéré que tôt dans la pratique, le pattern « chunké » pouvait être représenté dans les deux hémisphères alors qu'avec plus de pratique, seul l'hémisphère controlatéral de la main qui pratique la tâche peut contrôler la séquence. Les données issues des travaux de Sakai et al. (2003) et Rand et al. (1998 ; 2000) incitent donc à ce que nous nous intéressions plus particulièrement aux capacités de transfert du pattern « chunké », c'est-à-dire à la structure de la séquence produite sur les tests de rétention et transferts inter-manuels.

Structure de la séquence – pattern de mouvement :

Le dispositif expérimental utilisé dans cette étude nous a permis d'évaluer l'évolution de l'organisation structurelle de la séquence motrice avec la pratique (i. e., apparition des « chunks »), ainsi que les capacités d'apprentissage et de transfert d'un pattern de mouvement « chunké » : la structure du mouvement produit sur les tests de rétention/transferts révèle que l'organisation structurelle de la séquence développée au cours des phases d'Acquisition 1 et d'Acquisition 2 est réutilisée sur les tests de rétention/transferts et ce, indépendamment de l'effecteur et/ou du pattern d'activation musculaire requis pour réaliser la tâche. Ce résultat est très intéressant car malgré l'indépendance du système effecteur révélée après seulement 1 jour de pratique dans cette étude, les données révèlent néanmoins une capacité de transfert inter-manuel du pattern de mouvement « chunké ». En d'autres termes, même si les participants sont plus performants sur le test de rétention (i. e., temps de mouvement et nombre de *zero crossings* inférieurs) que sur les tests de transferts visuo-spatial et moteur, ils sont cependant capables de reproduire la structure de la séquence développée tout au long de la phase de pratique (i. e., bras dominant) sur les tests de transferts inter-manuels (i. e., bras non-dominant).

L'augmentation de la rapidité et de la fluidité de la production de la séquence suggère que les participants sont capables d'initier les processus relatifs à la sous-séquence suivante durant l'exécution de la sous-séquence en cours. La façon dont les séquences motrices sont organisées en sous-séquences (i. e., processus de « chunking ») fournit des informations

importantes sur les processus cognitifs impliqués lors des étapes de récupération, de programmation et d'exécution de la réponse. En effet, il a été proposé que des processus parallèles, nommés processus de « concaténation » (voir Verwey, 2001 ; Wright, Black, Immink, Brueckner & Magnuson, 2004) permettraient de réduire le délai entre les sous-séquences (e. g., Verwey, 1994 ; 2001 ; Wilde & Shea, 2006). Nos résultats supportent la notion de « concaténation » car l'organisation structurelle du pattern de mouvement « chunké » en fin d'Acquisition 1 et d'Acquisition 2 se révèle identique, avec toutefois une réduction du délai entre les sous-séquences révélée par une baisse du temps de mouvement sur les éléments 1, 3, 6, 11 et 16 constituant le début des sous-séquences.

Processus de « concaténation » :

Si dans un premier temps nos résultats supportent la notion de « concaténation », il nous faut cependant déterminer la nature des informations requises pour la réalisation de ces processus de « concaténation ». Pour cela, nous nous sommes intéressés à la structure de la séquence produite sur les tests de transferts inter-manuels. En effet, une analyse de l'organisation structurelle de la séquence sur les tests de transfert visuo-spatial et moteur révèle que les transitions entre les sous-séquences (i. e., processus de « concaténation ») apparaissent désorganisées lorsque le bras non-dominant est requis pour réaliser la tâche. Plus particulièrement, nos résultats indiquent une perturbation des processus de « concaténation » plus importante sur le test de transfert moteur que sur le test de transfert visuo-spatial : le délai entre les sous-séquence est davantage dégradé sur le transfert moteur. Nos résultats suggèrent donc un rôle majoritaire des informations visuo-spatiales comparées aux informations motrices dans la réalisation des processus de « concaténation » ; la dépendance du système effecteur étant en effet supposée dépendre de l'optimisation des processus de « concaténation » (voir Verwey & Clegg, 2005 ; Jordan, 1995).

En résumé, bien que les tests de transferts inter-manuels utilisés dans cette étude pour évaluer la nature de la représentation de la séquence motrice et l'indépendance/dépendance du système effecteur ne permettent pas de mettre en évidence le passage progressif d'une indépendance à une dépendance du système effecteur avec la pratique, l'analyse de la structure de la séquence produite en rétention/transferts renseigne toutefois sur une relative indépendance du système effecteur. En effet, même si les performances des participants observées sur le test de rétention sont supérieures à celles observées sur les tests de transferts

visuo-spatial et moteur, les données suggèrent malgré tout une capacité d'apprentissage, de stockage, et de transfert du pattern de mouvement « chunké » ; l'indépendance/dépendance du système effecteur résulterait donc respectivement d'un maintien/perturbation des processus de « concaténation » lors de transferts inter-manuels.

Conclusion :

Les données issues de cette expérience fournissent des informations complémentaires sur les processus impliqués dans le codage, le stockage, et sur la nature des représentations des séquences motrices. Nos résultats révèlent qu'une prédominance du code visuo-spatial associée à une dépendance du système effecteur pour produire la séquence se développe relativement tôt dans la pratique ; les informations visuo-spatiales joueraient notamment un rôle primordial dans la réalisation des processus de « chunking » et de « concaténation ».

– REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES –

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Adams, J. A. (1971). A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior, 3*, 111-150.

Alexander, G. E., & Crutcher, M. D. (1990). Neural representations of the target (goal) of visually guided arm movements in three motor areas of the monkey. *Journal of Neurophysiology, 64*, 164-178.

Albaret, J. M., & Thon, B. (1998). Differential effects of task complexity on contextual interference in a drawing task. *Acta Psychologica, 100*, 9-24.

Anderson, J. R. (1982). Acquisition of cognitive skill. *Psychological Review, 89*, 369-406.

Anson, J. G., Hyland, B. I., Kötter, R., & Wickens, J. R. (2000). Parameter precuing and motor preparation. *Motor Control, 4*, 221-231.

Asatryan, D. G. & Feldman, A. G. (1965). Functional tuning of the nervous system with control of movement or maintenance of a steady posture: I. Mechanographic analysis of the work of the limb on execution of a postural task. *Biophysics, 10*, 925-935.

Baddeley, A. (1993). La mémoire humaine : théorie et pratique. Grenoble : Presses Universitaires de Grenoble.

Badets, A., & Blandin, Y. (2005). Observational learning: Effects of bandwidth knowledge of results. *Journal of Motor Behavior, 37*, 211-216.

Bapi, R. S., Doya, K., & Harner, A. M. (2000). Evidence for effector independent and dependent representations and their differential time course of acquisition during motor sequence learning. *Experimental Brain Research, 132*, 149-162.

Battig, W. F. (1966). Facilitation and interference. In: E.A. Bilodeau (ed.), *Acquisition of skill* (pp. 215-244). New York: Academic Press.

Battig, W. F. (1972). Intratask interference as a source of facilitation in transfer and retention. In: R. F. Thompson & J. F. Voss (Eds.). New York: Academic Press.

Battig, W. F. (1979). The flexibility of human memory. In: L. S. Cermak & F. I. M. Craik (Eds.), *Levels of processing in human memory* (pp. 23-44). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Berner, M. P., & Hoffmann, J. (2009). Acquisition of effector-specific and effector-independent components of sequencing skill. *Journal of Motor Behavior, 41*, 30-44.

Bizzi, E., Accornero, N., Chapple, W., & Hogan, N. (1982). Arm trajectory formation in monkeys. *Experimental Brain Research, 46*, 139-143.

Bizzi, E., Accornero, N., Chapple, W., & Hogan, N. (1984). Posture control and trajectory formation during arm movement. *Journal of Neuroscience, 4*, 2738-2744.

Bizzi, E., Polit, A., & Morasso, P. (1976). Mechanisms underlying achievement of final head position. *Journal of Neurophysiology, 39*, 435-444.

Blandin, Y., Lhuisset, L., & Proteau, L. (1999). Cognitive processes underlying observational learning of motor skills. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 52A*, 957-979.

Blandin, Y., Proteau, L., & Alain, C. (1994). On the cognitive processes underlying contextual interference and observational learning. *Journal of Motor Behavior, 26*, 18-26.

Bock, O., & Eckmiller, R. (1986). Goal-directed arm movements in absence of visual guidance: Evidence for amplitude rather than position control. *Experimental Brain Research, 62*, 451-458.

Bonnet, M., Requin, J., & Stelmach, G. E. (1982). Specification of direction and extent in motor programming. *Bulletin of the Psychonomic Society, 19*, 31-34.

Bortoli, L., Robazza, C., Durigon, V., & Carra, C. (1992). Effects of contextual interference on learning technical sports skills. *Perceptual and Motor Skills, 75*, 555-562.

Boutin, A., Fries, U., Panzer, S., Shea, C. H., & Blandin, Y. (soumis). Role of action observation and action in sequences learning and coding. Acta Psychologica.

Braden, H. W., Panzer, S., & Shea, C. H. (2008). The effects of sequence difficulty and practice on proportional and nonproportional transfer. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 61*, 1321-1339.

Brady, F. (1997). Contextual interference and teaching golf skills. *Perceptual and Motor Skills, 84*, 347-350.

Brady, F. (1998). A theoretical and empirical review of the contextual interference effect and the learning of motor skills. *Quest, 50*, 266-293.

Bransford, J. D., Franks, J. J., Morris, C. D., & Stein, B. S. (1979). Some general constraints on learning and memory research. In: L. S. Cermak and F. I. M. Craik (Eds.), *Levels of processing in human memory* (pp. 331-354). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Buchner, A., Steffens, M. C., & Rothkegel, R. (1998). On the role of fragmentary knowledge in a sequence learning task. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 51A*, 251-281.

Carnahan, H., Vaneerd, D. L., & Allard, F. (1990). A note on the relationship between task requirements and the contextual interference effect. *Journal of Motor Behavior, 22*, 159-169.

Coello, Y., Orliaguet, J. P., & Prablanc, C. (1996). Pointing movement in an artificial perturbing inertial field: A prospective paradigm for motor control study. *Neuropsychologia, 34*, 879-892.

Craik, F. I. M., & Lockhart, R. S. (1972). Levels of processing: A framework for memory research. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior, 11*, 671-684.

Cross, E. S., Schmitt, P. J., & Grafton, S. T. (2007). Neural substrates of contextual interference during motor learning support a model of active preparation. *Journal of Cognitive Neuroscience, 19*, 1854-1871.

Cuddy, L. J., & Jacoby, L. L. (1982). When forgetting helps memory: An analysis of repetition effects. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior, 21*, 451-467.

Doyon, J., Song, A. W., Karni, A., Lalonde, F., Adams, M. M., & Ungerleider, L. G. (2002). Experience-dependent changes in cerebellar contributions to motor sequence learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 99*, 1017-1022.

Delignières, D. (1991). Apprentissage moteur et énergie. Cours d'agrégation externe EPS, Ecrit 2, Centre National d'Enseignement à Distance.

Dizio, P., & Lackner, J. R. (1995). Motor adaptation to Coriolis force perturbations of reaching movements: Endpoint but not trajectory adaptation transfers to the nonexposed arm. *Journal of Neurophysiology, 74*, 1787-1792.

Feldman, A. G. (1966). Functional tuning of the nervous system with control of movement or maintenance of a steady posture: II. Controllable parameters of the muscle. *Biophysics, 11*, 565-578.

Feldman, A. G. (1986). Once more on the equilibrium-point hypothesis (Lambda-model) for motor control. *Journal of Motor Behavior, 18*, 17-54.

Fitts, P. M. (1964). Perceptual-motor skills learning. In: A. W. Melton (Ed.), *Categories of learning*. New York: Academic Press.

Fitts, P. M., & Posner, M. I. (1967). Human performance. Belmont, CA Brooks/Cole.

Flash, T. (1987). The control of hand equilibrium trajectories in multi-joint arm movements. *Biological Cybernetics, 57*, 257-274.

Fleischman, E. A. (1967). Human abilities and the acquisition of skill. In E.A. Bilodeau (Ed.), *Acquisition of skill*. New York: Academic Press.

Gabriele, T. E., Hall, C. R., & Buckolz, E. E. (1987). Practice schedule effects on the acquisition and retention of a motor skill. *Human Movement Science, 6*, 1-16.

Gabriele, T. E., Hall, C. R., & Lee, T. D. (1989). Cognition in motor learning: Imagery effects on contextual interference. *Human Movement Science, 8*, 227-245.

Gabriele, T. E., Lee, T. D., & Hall, C. R. (1991). Contextual interference in movement timing: Specific effects in retention and transfer. *Journal of Human Movement Studies, 20*, 177-188.

Georgopoulos, A. P., Taira, M., & Lukashin, A. (1993). Cognitive neurophysiology of the motor cortex. *Science, 260*, 47-52.

Ghilardi, M. F., Gordon, J., & Ghez, C. (1995). Learning a visuomotor transformation in a local area of work space produces directional biases in other areas. *Journal of Neurophysiology, 74*, 2535-2539.

Grafton, S. T., Hazeltine, E., & Ivry, R. B. (1998). Abstract and effector-specific representations of motor sequences identified with PET. *Journal of Neuroscience, 18*, 9420-9428.

Grafton, S. T., Hazeltine, E., & Ivry, R. B. (2002). Motor sequence learning with the nondominant left hand - A PET functional imaging study. *Experimental Brain Research, 146*, 369-378.

Graybiel, A. M. (1998). The basal ganglia and chunking of action repertoires. *Neurobiology of Learning and Memory, 70*, 119-136.

Guadagnoli, M. A., Holcomb, W. R., & Weber, T. J. (1999). The relationship between contextual interference effects and performer expertise on the learning of a putting task. *Journal of Human Movement Studies, 37*, 19-36.

Guadagnoli, M. A., & Lee, T. D. (2004). Challenge point: A framework for conceptualizing the effects of various practice conditions in motor learning. *Journal of Motor Behavior, 36*, 212-224.

Guthrie, E. R. (1935). The psychology of learning. (Rev. ed.) New York: Harper.

Hallett, M. (2000). Transcranial magnetic stimulation and the human brain. *Nature, 406*, 147-150.

Hebert, E. P., Landin, D., & Solmon, M. A. (1996). Practice schedule effects on the performance and learning of low- and high-skilled students: An applied study. *Research Quarterly for Exercise and Sport, 67*, 52-58.

Hikosaka, O., Nakahara, H., Rand, M. K., Sakai, K., Lu, X. F., Nakamura, K., Miyachi, S., & Doya, K. (1999). Parallel neural networks for learning sequential procedures. *Trends in Neurosciences, 22*, 464-471.

Hikosaka, O., Nakamura, K., Sakai, K., & Nakahara, H. (2002). Central mechanisms of motor skill learning. *Current Opinion in Neurobiology, 12*, 217-222.

Immink, M. A., & Wright, D. L. (1998). Contextual interference: A response planning account. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 51A*, 735-754.

Immink, M. A., & Wright, D. L. (2001). Motor programming during practice conditions high and low in contextual interference. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 27*, 423-437.

Jacoby, L. L. (1978). Interpreting the effects of repetition: Solving a problem versus remembering a solution. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior, 17*, 649-667.

Jacoby, L. L., & Craik, F. I. M. (1979). Effects of elaboration of processing at encoding and retrieval: Trace distinctiveness and recovery of initial context. In: L. S. Cermack & F. I. M. Craik (Eds.), *Levels of processing in human memory*. Hillsdale, N. J.: Lawrence Elbaum associates.

Jarus, T., & Gutman, T. (2001). Effects of cognitive processes and task complexity on acquisition, retention, and transfer of motor skills. *The Canadian Journal of Occupational Therapy, 68*, 280-289.

Jiménez, L. (2008). Taking patterns for chunks: Is there any evidence of chunk learning in continuous serial reaction-time tasks? *Psychological Research, 72*, 387-396.

Jordan, M. I. (1995). The organization of action sequence: Evidence from a relearning task. *Journal of Motor Behavior, 27*, 179-192.

Kansaku, K., Muraki, S., Umeyama, S., Nishimori, Y., Kochiyama, T., Yamane, S., & Kitazawa, S. (2005). Cortical activity in multiple motor areas during sequential finger movements: An application of independent component analysis. *Neuroimage, 28*, 669-681.

Keele, S. W. (1968). Movement control in skilled motor performance. *Psychological Bulletin, 70*, 387-403.

Keele, S. W., Cohen, A., & Ivry, R. (1990). Motor programs: Concepts and issues. *Attention and Performance, 13*, 77-110.

Keele, S. W., Ivry, R., Mayr, U., Hazeltine, E., & Heuer, H. (2003). The cognitive and neural architecture of sequence representation. *Psychological Review, 110*, 316-339.

Keele, S. W., Jennings, P., Jones, S., Caulton, D., & Cohen, A. (1995). On the modularity of sequence representation. *Journal of Motor Behavior, 27*, 17-30.

Kelso, J. A. S. (1977). Motor control mechanisms underlying human movement reproduction. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 3*, 529-543.

Kelso, J. A. S. (1981). Contrasting perspectives on order and regulation in movement. In: J. Long & A. Baddeley (Eds.), *Attention and Performance IX* (pp. 437-457). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Kelso, J. A. S., Putnam, C. A., & Goodman, D. (1983). On the nature of human interlimb coordination. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 35A,* 347-375.

Klapp, S. T. (1996). Reaction time analysis of central motor control. In: H. N. Zelaznik (Ed.), *Advances in motor learning and control* (pp. 13-34). Champaign, IL.: Human Kinetics.

Koch, I., & Hoffmann, J. (2000). Patterns, chunks, and hierarchies in serial reaction-time tasks. *Psychological Research, 63*, 22-35.

Kovacs, A., Boyle, J., Grützmacher, N., & Shea, C. H. Coding of on-line and pre-planned movement sequences (in preparation).

Kovacs, A., Han, D-W., & Shea, C. H. (2009). Representation of movement sequences is related to task characteristics. *Acta Psychologica, 132*, 54-61.

Kovacs, A. J., Müehlbauer, T., & Shea, C. H. (2009). The Coding and Effector Transfer of Movement Sequences. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 35*, 390-407.

Kurata, K. (1993). Premotor cortex of monkeys: Set- and movement-related activity reflecting amplitude and direction of wrist movements. *Journal of Neurophysiology, 69*, 187-200.

Laforce, R., & Doyon, J. (2002). Differential role for the striatum and cerebellum in response to novel movements using a motor learning paradigm. *Neuropsychologia, 40*, 512-517.

Lackner, J. R., & Dizio, P. (1994). Rapid adaptation to Coriolis force perturbations of arm trajectory. *Journal of Neurophysiology, 72*, 299-313.

Langley, D. J., & Zelaznik, H. N. (1984). The acquisition of time properties associated with a sequential motor skill. *Journal of Motor Behavior, 16*, 275-301.

Lee, T. D. (1988). Transfer-appropriate processing: A framework for conceptualizing practice effects in motor learning. In: O. G. Meijer & K. Roth (Eds.), *Complex movement behavior: The motor-action controversy* (pp. 201-215). Amsterdam: North-Holland.

Lee, T. D., & Magill, R. A. (1983). The locus of contextual interference in motor skill acquisition. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition, 9*, 730-746.

Lee, T. D., & Magill, R. A. (1985). Can forgetting facilitate skill acquisition? In: D. Goodman, R. B. Wilberg, & I. M. Franks (Eds.), *Differing perspectives in motor learning, memory, and control* (pp. 3-22). Amsterdam: North-Holland.

Lee, T. D., Magill, R. A. & Weeks, D. J. (1985). Influence of practice schedule on testing schema theory predictions in adults. *Journal of Motor Behavior, 17*, 283-299.

Lee, T. D., Wulf, G., & Schmidt, R. A. (1992). Contextual interference in motor learning: Dissociated effects due to the nature of task variations. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 44A*, 627-644.

Lepine, D., Glencross, D., & Requin, J. (1989). Some experimental evidence for and against a parametric conception of movement programming. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 15*, 347-362.

Lewis, S. J. G., Slabosz, A., Robbins, T. W., Barker, R. A., & Owen, A. M. (2005). Dopaminergic basis for deficits in working memory but not attentional set-shifting in Parkinson's disease. *Neuropsychologia, 43*, 823-832.

Limons, E., & Shea, J. B. (1988). Deficient processing in learning and performance. In: A. M. Colley & R. J. Beech (Eds.), *Cognition and action in skilled behavior* (pp. 333-347). Amsterdam: North-Holland.

Lin, C. H., Fisher, B. E., Winstein, C. J., Wu, A. D., & Gordon, J. (2008). Contextual interference effect: Elaborative processing or forgetting-reconstruction? A post-hoc analysis of transcranial magnetic stimulation-induced effects on motor learning. *Journal of Motor Behavior, 40*, 578-586.

Lin, C. H., Fisher, B. E., Wu, A. D., Ko, Y. A., Lee, L. Y., & Winstein, C. J. (2009). Neural correlate of the contextual interference effect in motor learning: A kinematic analysis. *Journal of Motor Behavior, 41*, 232-242.

Lin, C. H., Sullivan, K. J., Wu, A. D., Kantak, S., & Winstein, C. J. (2007). Effect of task practice order on motor skill learning in adults with Parkinson disease: A pilot study. *Physical Therapy, 87*, 1120-1131.

Lu, X. F., & Ashe, J. (2005). Anticipatory activity in primary motor cortex codes memorized movement sequences. *Neuron, 45*, 967-973.

Magill, R. A., & Hall, K. G. (1990). A review of the contextual interference effect in motor skill acquisition. *Human Movement Science, 9*, 241-289.

Mushiake, H., Inase, M., & Tanji, J. (1991). Neuronal-activity in the primate premotor, supplementary, and precentral motor cortex during visually guided and internally determined sequential movements. *Journal of Neurophysiology, 66*, 705-718.

Nissen, M. J., & Bullemer, P. (1987). Attentional requirements of learning: Evidence from performance measures. *Cognitive Psychology, 19*, 1-32.

Oldfield, R. C. (1971). Assessment and analysis of handedness: Edinburgh inventory. *Neuropsychologia, 9*, 97-113.

Owen, A. M. (2004). Cognitive dysfunction in Parkinson disease: The role of frontostriatal circuitry. *Neuroscientist, 10*, 525-537.

Paillard, J. (1996). Fast and slow feedback loops for the visual correction of spatial errors in a pointing task: A reappraisal. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology, 74*, 401-417.

Panzer, S., Krueger, M., Müehlbauer, T., Kovacs, A., & Shea, C. H. (2009). Inter-manual transfer and practice: Coding of simple motor sequences. *Acta Psychologica, 131*, 99-109.

Park, J. H., & Shea, C. H. (2002). Effector independence. *Journal of Motor Behavior, 34*, 253-270.

Park, J. H., & Shea, C. H. (2005). Sequence learning: Response structure and effector transfer. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 58A*, 387-419.

Park, J. H., Wilde, H., & Shea, C. H. (2004). Part-whole practice of movement sequences. *Journal of Motor Behavior, 36*, 51-61.

Perruchet, P., Bigand, E., & BenoitGouin, F. (1997). The emergence of explicit knowledge during the early phase of learning in sequential reaction time tasks. *Psychological Research, 60*, 4-13.

Polit, A., & Bizzi, E. (1979). Characteristics of motor programs underlying arm movements in monkeys. *Journal of Neurophysiology, 42*, 183-194.

Povel, D. J., & Collard, R. (1982). Structural factors in patterned finger tapping. *Acta Psychologica, 52*, 107-123.

Proteau, L., Blandin, Y., Alain, C., & Dorion, A. (1994). The effects of the amount and variability of practice on the learning of a multi-segmented motor task. *Acta Psychologica, 85*, 61-74.

Rand, M. K., Hikosaka, O., Miyachi, S., Lu, X. F., & Miyashita, K. (1998). Characteristics of a long-term procedural skill in the monkey. *Experimental Brain Research, 118*, 293-297.

Rand, M. K., Hikosaka, O., Miyachi, S., Lu, X. F., Nakamura, K., Kitaguchi, K., & Shimo, Y. (2000). Characteristics of sequential movements during early learning period in monkeys. *Experimental Brain Research, 131*, 293-304.

Richter, W., Andersen, P. M., Georgopoulos, A. P., & Kim, S. G. (1997). Sequential activity in human motor areas during a delayed cued finger movement task studied by time-resolved fMRI. *Neuroreport, 8*, 1257-1261.

Robertson, C., & Flowers, K. A. (1990). Motor set in Parkinson's disease. *Journal of Neurology Neurosurgery and Psychiatry, 53*, 583-592.

Rosenbaum, D. A. (1980). Human movement initiation: Specification of arm, direction, and extent. *Journal of Experimental Psychology: General, 109*, 444-474.

Rosenbaum, D. A. (1983). The movement precuing technique: Assumptions, applications, and extensions. In: R. A. Magill (Ed.), *Memory and control of action* (pp. 231-274). Amsterdam: North-Holland.

Rushworth, M. F. S., Krams, M., & Passingham, R. E. (2001). The attentional role of the left parietal cortex: The distinct lateralization and localization of motor attention in the human brain. *Journal of Cognitive Neuroscience, 13*, 698-710.

Sainburg, R. L. (2002). Evidence for a dynamic-dominance hypothesis of handedness. *Experimental Brain Research, 142*, 241-258.

Sakai, K., Kitaguchi, K., & Hikosaka, O. (2003). Chunking during human visuomotor sequence learning. *Experimental Brain Research, 152*, 229-242.

Salmoni, A. W., Schmidt, R. A., & Walter, C. B. (1984). Knowledge of results and motor learning: A review and critical reappraisal. *Psychological Bulletin, 95*, 355-386.

Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review, 82*, 225-260.

Schmidt, R. A. (1982). Motor control and learning: A behavioral emphasis. Champaign: IL.: Human Kinetics.

Schmidt, R. A. (1985). The search for invariance in skilled movement behavior. *Research Quarterly for Exercise and Sport, 56*, 188-200.

Schmidt, R. A. (1988). Motor control and learning: A behavioral emphasis. (2nd ed.). Champaign, IL.: Human Kinetics.

Schmidt, R. A., & Lee, T. D. (1999). Motor control and learning: A behavioral emphasis. (3rd ed.). Champaign, IL.: Human Kinetics.

Schmidt, R. A., & Lee, T. D. (2005). Motor control and learning: A behavioral emphasis. (4rd ed.). Champaign, IL.: Human Kinetics.

Schneider, W., Dumais, S. T., & Shiffrin, R. M. (1984). Automatic and controlled processing and attention. In: R. Parausuraman, R. Davies, & J. Beatty (Eds.), *Varieties of Attention* (pp. 1-27). New York: Academic Press.

Schumacher, E. H., Elston, P. A., & D'Esposito, M. (2003). Neural evidence for representation-specific response selection. *Journal of Cognitive Neuroscience, 15*, 1111-1121.

Sekiya, H., Magill, R. A., & Anderson, D. I. (1996). The contextual interference effect in parameter modifications of the same generalized motor program. *Research Quarterly for Exercise and Sport, 67*, 59-68.

Sekiya, H., Magill, R. A., Sidaway, B., & Anderson, D. I. (1994). The contextual interference effect for skill variations from the same and different generalized motor programs. *Research Quarterly for Exercise and Sport, 65*, 330-338.

Shea, C. H., Kohl, R., & Indermill, C. (1990). Contextual interference: Contributions of practice. *Acta Psychologica, 73*, 145-157.

Shea, C. H., Park, J. H., & Braden, H. W. (2006). Age-related effects in sequential motor learning. *Physical Therapy, 86*, 478-488.

Shea, J. B., & Morgan, R. L. (1979). Contextual interference effects on the acquisition, retention, and transfer of a motor skill. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory, 5*, 179-187.

Shea, J. B., & Zimny, S. T. (1983). Context effects in memory and learning movement information. In: R. A. Magill (Ed.), *Memory and control of action* (pp. 145-366). Amsterdam: North-Holland.

Shea, J. B., & Zimny, S. T. (1988). Knowledge incorporation in motor representation. In: O. G. Meijer & K. Roth (Eds.), *Complex movement behavior: "The" motor-action controversy* (pp. 289-314). Amsterdam: North-Holland.

Tsutsui, S., Lee, T. D., & Hodges, N. J. (1998). Contextual interference in learning new patterns of bimanual coordination. *Journal of Motor Behavior, 30*, 151-157.

Verwey, W. B. (1994). Evidence for the development of concurrent processing in a sequential keypressing task. *Acta Psychologica, 85*, 245-262.

Verwey, W. B. (1996). Buffer loading and chunking in sequential keypressing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 22*, 544-562.

Verwey, W. B. (1999). Evidence for a multistage model of practice in a sequential movement task. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 25*, 1693-1708.

Verwey, W. B. (2001). Concatenating familiar movement sequences: The versatile cognitive processor. *Acta Psychologica, 106*, 69-95.

Verwey, W. B. (2003). Effect of sequence length on the execution of familiar keying sequences: Lasting segmentation and preparation? *Journal of Motor Behavior, 35*, 343-354.

Verwey, W. B., & Clegg, B. A. (2005). Effector dependent sequence learning in the serial RT task. *Psychological Research, 69*, 242-251.

Verwey, W. B., & Wright, D. L. (2004). Effector-independent and effector-dependent learning in the discrete sequence production task. *Psychological Research, 68*, 64-70.

Wilde, H., & Shea, C. H. (2006). Proportional and nonproportional transfer of movement sequences. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 59*, 1626-1647.

Wood, C. A., & Ging, C. A. (1991). The role of interference and task similarity on the acquisition, retention, and transfer of simple motor skills. *Research Quarterly for Exercise and Sport, 62*, 18-26.

Woodworth, R. S. (1899). The accuracy of voluntary movement. *Psychological Review, 3*, 1-119.

Wright, D. L. (1991). The role of intertask and intratask processing in acquisition and retention of motor skills. *Journal of Motor Behavior, 23*, 139-145.

Wright, D. L., Black, C. B., Immink, M. A., Brueckner, S., & Magnuson, C. (2004). Long-term motor programming improvements occur via concatenation of movement sequences during random but not during blocked practice. *Journal of Motor Behavior, 36*, 39-50.

Wright, D. L., Li, Y. H., & Whitacre, C. (1992). The contribution of elaborative processing to the contextual interference effect. *Research Quarterly for Exercise and Sport, 63*, 30-37.

Wulf, G., & Lee, T. D. (1993). Contextual interference in movements of the same class: Differential effects on program and parameter learning. *Journal of Motor Behavior, 25*, 254-263.

Wulf, G., & Shea, C. H. (2002). Principles derived from the study of simple skills do not generalize to complex skill learning. *Psychonomic Bulletin & Review, 9*, 185-211.

Wulf, G., & Shea, C. H. (2004). Understanding the role of augmented feedback: The good, the bad, and the ugly. In A. M. Williams & N. J. Hodges (Eds.), *Skill acquisition in sport: Research, theory and practice* (pp. 121-144). London: Routledge.

Wulf, G., Shea, C. H., & Matschiner, S. (1998). Frequent feedback enhances complex motor skill learning. *Journal of Motor Behavior, 30*, 180-192.

Young, D. E., Cohen, M. J., & Husak, W. S. (1993). Contextual interference and motor skill acquisition: On the processes that influence retention. *Human Movement Science, 12*, 577-600.

Zang, Y. F., Jia, F. C., Weng, X. C., Li, E. Z., Cui, S. Z., Wang, Y. F., Hazeltine, E., & Ivry, R. (2003). Functional organization of the primary motor cortex characterized by event-related fMRI during movement preparation and execution. *Neuroscience Letters, 337*, 69-72.

– INDEX DES FIGURES –

Index des figures

PREMIERE PARTIE : CADRE THEORIQUE

Figure 1. Modèle « mass-spring » ou « point d'équilibre » – Extrait et traduit de Schmidt et Lee (2005). Représentation schématique (a) des muscles agonistes et antagonistes dans la flexion et l'extension de l'avant-bras, et (b) des courbes tension/longueur des extenseurs et des fléchisseurs pour différentes positions angulaires du coude ; l'intersection des courbes longueur/tension des deux groupes musculaires situe le point d'équilibre E pour un angle α d'environ 90° 11

Figure 2. Dispositif expérimental utilisé dans l'étude de Polit et Bizzi (1979). Les singes devaient pointer des cibles illuminées de manière aléatoire à l'aide d'un levier attaché à leur bras (non vision du bras). Les singes étaient évalués avant et après section de la moelle épinière 12

Figure 3. Illustration du dispositif expérimental – Extrait et traduit de l'étude de Shea et Morgan (1979). Chaque participant a pratiqué trois tâches au cours de la phase de pratique selon un ordre bloquée ou aléatoire. Pour chaque essai, un signal de réponse (lumière jaune) indiquait au participant de répondre le plus rapidement possible à la tâche imposée. Avec leur main droite, les participants devaient relâcher le bouton de départ et attraper la balle de tennis supportée par le premier des deux trous. Après avoir pris la balle de tennis, le participant devait ensuite renverser le plus rapidement possible et dans un ordre déterminé trois plaquettes. L'ordre des plaquettes à abattre était différent pour chaque tâche, et était présenté sous forme de diagrammes juste derrière le stimulus lumineux associé à la tâche. La partie haute de chaque diagramme était marquée d'une couleur similaire à celle du stimulus lumineux présenté. Enfin, après avoir abattu les trois plaquettes, le participant devait reposer la balle de tennis dans le trou correspondant à la base d'arrivée. Les trois tâches pratiquées en acquisition consistaient à abattre trois plaquettes dans l'ordre suivant : (a) arrière droit, milieu gauche et avant droit ; (b) avant droit, milieu gauche et arrière droit ; (c) avant gauche, milieu droit et arrière gauche. Chacune des trois tâches était associée à un stimulus de couleur : respectivement bleu, rouge et blanc pour les tâches a, b et c. Les trois tâches (a, b et c) pratiquées en acquisition ont également été pratiquées en rétention selon un ordre bloquée ou aléatoire 17

Figure 4. Performances obtenues lors des tests de rétention sous condition bloquée et aléatoire après une phase d'acquisition de 50, 200 ou 400 essais de pratique sous condition bloquée et aléatoire – Extrait et traduit de l'étude de Shea et al. (1990) 29

Figure 5. Relation entre les courbes d'apprentissage et de performance en fonction du niveau de difficulté *fonctionnelle* de la tâche – Extrait et traduit de l'étude de Guadagnoli et Lee (2004) 32

Figure 6. Illustration des prédictions sur l'évolution simultanée des performances en acquisition et sur l'apprentissage de la tâche en fonction de la condition de pratique (bloquée vs. aléatoire), de la quantité de pratique (99 vs. 297 essais), et du niveau de similarité entre les tâches (similaire vs. non-similaire). A = pratique aléatoire ; B = pratique bloquée ; 99 = acquisition courte de 99 essais ; 297 = acquisition longue de 297 essais..... 33

Figure 7. Illustration des performances attendues en rétention en fonction de la quantité de pratique (acquisition courte vs. acquisition longue), de la condition de pratique (bloquée vs. aléatoire), et du niveau de similarité entre les tâches (similaire vs. non-similaire). Acq. courte = Acquisition courte de 99 essais ; Acq. longue = Acquisition longue de 297 essais... 34

Figure 8. Temps de Mouvement moyens par élément produits sur une séquence répétée (SR) à 16 éléments au cours de la phase d'acquisition (Bloc 2 : premier bloc d'essais comportant la SR ; Bloc 15 : dernier bloc d'essais comportant la SR) – Extrait et traduit de l'étude de Boutin et al. (soumis) ; Evolution de la structure de la séquence avec la pratique due à la mise en place progressive des processus de « chunking » 37

Figure 9. Changements hypothétiques des processus de codage de l'information au cours de l'apprentissage de séquences motrices – Extrait et traduit de Hikosaka et al. (1999). (A) représente le premier stade de pratique : les participants réalisent trois actions (Actions 1 – 3), l'une après l'autre, en procédant à des transformations d'informations sensori-motrices pour chaque action (connections verticales). En réalisant ces actions dans le même ordre, (B) et (C), les processus séquentiels se forment avec la pratique des actions (connections horizontales). La séquence est alors apprise selon différentes perspectives : codage des coordonnées visuo-spatiales (séquence spatiale – en vert) et des coordonnées motrices (séquence motrice – en bleu). L'acquisition des coordonnées spatiales de la séquence est rapide, apparaît tôt dans la pratique (B), alors que l'acquisition des coordonnées motrices de la séquence est plus lente, apparaît plus tard dans la pratique (C). Les flèches les plus

épaisses indiquent les processus dominants dans chacun des deux niveaux de pratique (B et C) 41

Figure 10. Représentation schématique de l'apprentissage de séquences motrices – Extrait et traduit de Hikosaka et al. (2002). L'apprentissage de séquences motrices est supposé fonctionner sur l'interaction des connections horizontales et verticales : connections sérielles intra-corticales (flèches horizontales) et circuits des boucles cortico-GB/cortico-CB (flèches verticlaes) ; GB = Ganglions de la Base, et CB = système Cérébelleux. Une séquence de mouvements est représentée sous deux formes : séquence spatiale et séquence motrice. La séquence spatiale est représentée sur le côté gauche de la figure (partie en vert), et la séquence motrice sur le côté droit de la figure (partie en bleu). Le cortex préfrontal-pariétal forme un circuit en boucle avec les régions associatives des ganglions de la base et du système cérébelleux, alors que le cortex moteur forme un circuit en boucle avec les régions motrices des ganglions de la base et du système cérébelleux. Au début de l'apprentissage, les mouvements sont exécutés individuellement grâce à des processus de conversion spatio-motrices (connections horizontales). A la fin de l'apprentissage, la séquence de mouvements est représentée selon au moins deux réseaux de coordonnées différents : une séquence spatiale supportée par la boucle du cortex préfrontal-pariétal et une séquence motrice supportée par la boucle du cortex moteur (connections verticales). Des signaux provenant des cortex préfrontal-pariétal et moteur sont envoyés aux différentes parties fonctionnelles des ganglions de la base et du système cérébelleux (flèches verticales). Dans les ganglions de la base, ils sont évalués sur leurs erreurs récompensées ou nouvelles ; dans le système cérébelleux, ils sont évalués sur leurs erreurs sensori-motrices ou temporelles (lignes grises). Ainsi, les mécanismes responsables de l'acquisition de la séquence spatiale et de la séquence motrice peuvent être améliorés de manière indépendante 43

DEUXIEME PARTIE : PARTIE EXPERIMENTALE

EXPERIENCES 1 ET 2

Figure 1. Illustration du dispositif expérimental. La tâche consistait à presser successivement quatre boutons selon un ordre préétabli : « A », « B », « C » et « D » ; « A et D » désignant respectivement les bases de départ et d'arrivée..... 51

Figure 2. Erreur Constante Absolue (A) et Erreur Variable (B) pour les quatre conditions expérimentales au cours de la phase d'acquisition (Blocs 1 à 11) 56

Figure 3. Erreur Constante Absolue (A) et Erreur Variable (B) pour les tests de rétention (R), transfert inférieur (T1), et transfert supérieur (T2) 59

Figure 4. Illustration du dispositif expérimental. Le bouton « A » désigne la base de départ ; « B, C et D » représentent les trois boutons de réponse possibles dans la condition non-similaire, et « C » le seul bouton de réponse requis dans la condition similaire..... 67

Figure 5. Vue d'ensemble d'une séquence temporelle dans la réalisation de deux essais consécutifs au cours de la phase d'acquisition. L'exemple est dans le cas d'une pratique aléatoire sous condition similaire et non-similaire 69

Figure 6. Erreurs Constantes Absolues pour les phases d'acquisition courte (A ; Blocs 1 à 11) et d'acquisition longue (B ; Blocs 1 à 33) 74

Figure 7. Erreurs Variables pour les phases d'acquisition courte (A ; Blocs 1 à 11) et d'acquisition longue (B ; Blocs 1 à 33) 75

Figure 8. Erreurs Constantes Absolues pour les phases de rétention (A) et de transfert (B). Acq. Courte = Acquisition Courte de 99 essais ; Acq. Longue = Acquisition Longue de 297 essais 78

Figure 9. Erreurs Variables pour les phases de rétention (A) et de transfert (B). Acq. Courte = Acquisition Courte de 99 essais ; Acq. Longue = Acquisition Longue de 297 essais 79

EXPERIENCE 3

Figure 1. Illustration du dispositif expérimental (A) et du pattern de mouvement à réaliser (séquence à 16 éléments) avec la main dominante lors des phases d'acquisition et de rétention (B), et avec la main non-dominante lors des phases de transferts visuo-spatial (C) et moteur (D). La position de départ (S) et les cibles (cercles pleins) utilisées pour produire la séquence sont illustrées pour chacune des phases expérimentales (conditions B à D) ; les cibles (cercles vides) non utilisées dans la séquence étaient également affichées sur l'écran d'ordinateur mais n'étaient jamais illuminées 93

Figure 2. Exemple de tracés sur les données cinématiques (déplacement du levier, vitesse et accélération) récoltées au cours de la réalisation du Bloc 15 du Jour 1 (dernier bloc

d'essais comportant la séquence répétée lors de la phase d'acquisition). ° = degré ; s = seconde 97

Figure 3. Temps de Mouvement moyens (A) et nombre de Zero crossings moyens (B) produits au cours des phases d'acquisitions (Jour 1 et Jour 2), rétention (R), transfert moteur (M) et transfert visuo-spatial (S) pour les groupes « Acquisition courte » et « Acquisitioin longue ». SA = Séquence Aléatoire 101

Figure 4. Temps de Mouvement moyens par élément produits sur la séquence aléatoire aux Blocs 1 et 16 (Jour 1 et Jour 2, respectivement A et C), et sur la séquence répétée aux Blocs 2 et 15 (Jour 1 et Jour 2, respectivement B et D) 102

Figure 5. Temps de Mouvement moyens par élément produits par les participants des groupes « Acquisition courte » et « Acquisition longue » au cours des tests de rétention, transfert visuo-spatial et transfert moteur 104

– INDEX DES TABLEAUX –

Index des tableaux

PREMIERE PARTIE : CADRE THEORIQUE

Tableau 1. Récapitulatif des différents niveaux de difficulté de la tâche créés en fonction du niveau de similarité entre les tâches pour chacune des conditions expérimentales de cette étude 26

DEUXIEME PARTIE : PARTIE EXPERIMENTALE

EXPERIENCES 1 ET 2

Tableau 1. Récapitulatif des phases et groupes expérimentaux 52

Tableau 2. Temps relatif moyen (TRM) sur chaque segment pour les phases d'acquisition (A et B, respectivement Bloc 1 et Bloc 11), (C) rétention, (D) transfert inférieur, et (E) transfert supérieur. EV intra = Erreur Variable intra-participants ; EV inter = Erreur Variable inter-participants 60

Tableau 3. Récapitulatif des phases et groupes expérimentaux 70

EXPERIENCE 3 :

Tableau 1. Récapitulatif des phases et groupes expérimentaux 94

– ANNEXES –

« Edinburgh Handedness Inventory » (Oldfield, 1971)

Nr. ____

Lateralitätsfragebogen (in Anlehnung an Oldfield)

Bitte geben Sie Ihre bevorzugte Hand bei den folgenden Tätigkeiten oder bei der Benutzung der aufgeführten Gegenstände an.

Tragen Sie ein „+“ in die Spalte LINKS oder RECHTS hinter der jeweiligen Tätigkeit ein, wenn Sie dabei die linke oder rechte Hand bevorzugen. Ist die Bevorzugung einer Hand so stark, dass Sie die andere niemals verwenden würden, tragen Sie bitte „++“ in das zugehörige Feld ein. Können Sie bei einer Tätigkeit wirklich keine bevorzugte Hand angeben, tragen Sie bitte ein „+“ in beide Felder hinter der Tätigkeit ein. Bei manchen Tätigkeiten oder der Benutzung der Gegenstände werden beide Hände benötigt. In diesen Fällen ist in Klammern angegeben, auf welche Tätigkeit sich die Frage genau bezieht.

Bitte versuchen Sie alle Fragen zu beantworten. Lassen Sie nur dann eine Tätigkeit aus, wenn Sie überhaupt keine Erfahrung damit haben.

		LINKS	RECHTS
1	Schreiben		
2	Malen		
3	Werfen		
4	Schere		
5	Zähneputzen		
6	Messer (ohne Gabel)		
7	Löffel		
8	Besen (obere Hand)		
9	Streichholz anzünden (Streichholz)		
10	Dose öffnen (Deckel)		

Post Experiment Interview

Name: **Groupe "Acquisition courte"**

Bitte beschreiben Sie, wie Sie die Aufgabe ausgeführt haben.

Auswendig lernen des Ablaufs der Sequenzen, da gleiche Abläufe wiederkehrten

Haben Sie eine Sequenz wahrgenommen? Bei allen Ausführungen?

Bei Tag 2 Sequenz gewusst

Beim 1. Versuch an Tag 1 Sequenz nicht wahrgenommen/erkannt

Wie sicher sind Sie sich, dass es bei allen Ausführungen die gleiche Sequenz war (1 absolut unsicher - 10 absolut sicher)?

Jeden andere Sequenz, als Tag 2

Können Sie eine Sequenz beschreiben?



2 -> 3 3 -> 4 4 -> 3 3 -> 2 2 -> 3 3 -> 2 2 -> 1

1 -> 2 2 -> 3 3 -> 2 2 -> 3 3 -> 4

4 -> 3 3 -> 2 2 -> 1

1 -> ?

Post Experiment Interview

Name: Groupe "Acquisition longue"

Bitte beschreiben Sie, wie Sie die Aufgabe ausgeführt haben.

... wie einen Test! Das Kästl nach den Anweisungen ... so gut ich konnte!

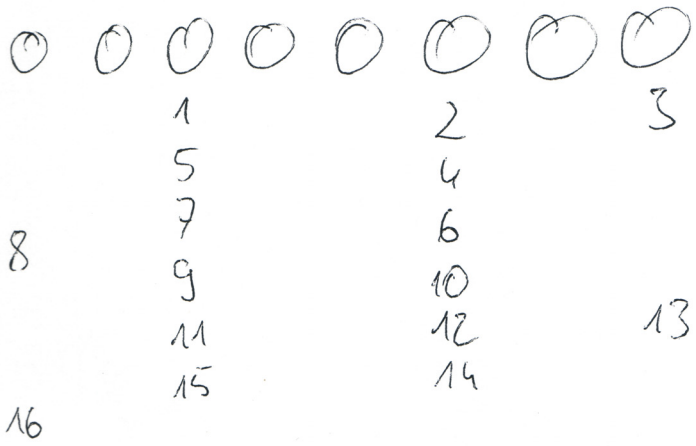
Haben Sie eine Sequenz wahrgenommen? Bei allen Ausführungen?

Ja, allerdings veränderte sich die Sequenz bei manchen (z.B. der letzten) Aufgabe!

Wie sicher sind Sie sich, dass es bei allen Ausführungen die gleiche Sequenz war (1 absolut unsicher - 10 absolut sicher)?

10 (ich bin sicher, dass die Sequenz kleinweise veränderd war!)

Können Sie eine Sequenz beschreiben?



Auteur : Arnaud Boutin
Titre : Conditions d'apprentissage moteur et représentations sensori-motrices : Des mouvements discrets aux séquences motrices.
Directeur de thèse : Yannick Blandin

RESUME

Ce travail de thèse repose sur l'analyse des processus impliqués dans l'apprentissage de nouveaux comportements moteurs, et sur l'étude de nos capacités à adapter notre comportement à de nouvelles situations. Nous avons réalisé une série de trois expériences où ont été utilisés des dispositifs expérimentaux permettant une analyse de mouvements discrets et continus. L'objectif principal qui a motivé ce travail était d'évaluer : 1) les variables d'apprentissage susceptibles d'influencer l'acquisition d'un geste discret et/ou continu (Expériences 1 et 2), et 2) la nature des représentations sensori-motrices dans l'apprentissage de séquences motrices (Expérience 3).

Les données obtenues dans la première étude (Expériences 1 et 2) révèlent que la condition de pratique et/ou le niveau de similarité entre les tâches à apprendre sont susceptibles de moduler les processus intra- et/ou inter-tâches mis en jeu par l'apprenant au cours de la phase de pratique, et donc d'influencer l'apprentissage. De plus, nos résultats indiquent également que les facteurs condition de pratique et similarité des tâches interagissent avec le facteur quantité de pratique ; l'apprentissage de nouveaux comportements moteurs nécessite donc de prendre en considération l'ensemble de ces facteurs. Les résultats de l'Expérience 3 révèlent une prédominance du code visuo-spatial dans la représentation des séquences motrices, associée à une dépendance du système effecteur, quelle que soit la quantité de pratique. Nos résultats ne confirment pas l'hypothèse du passage progressif d'un codage de type visuo-spatial (effecteur indépendant) au début de la pratique (après 1 jour), à un codage de type moteur (effecteur dépendant) avec davantage de pratique (après 2 jours). Les implications théoriques et pratiques qui émergent de ces résultats sont discutées au regard des données et modèles théoriques préexistants.

Mots-clés : Apprentissage moteur ; Interférence contextuelle ; Processus intra- et inter-tâches ; Conditions de pratique ; Similarité des tâches ; Représentation des séquences motrices.

ABSTRACT

This thesis focuses on the analysis of the cognitive processes underlying learning of new motor behavior, and the study of our faculties to adapt this behavior to new ones. To address this issue, three experiments were designed to analyze discrete and continuous movements. The main purpose of this work was to assess: 1) learning variables that are supposed to influence the acquisition of discrete and/or continuous movements (Experiments 1 and 2), and 2) the way sequential movements are coded (Experiment 3).

Experiments 1 and 2 revealed that the schedule of practice and/or task similarity can modulate intra- and/or inter-task processing during practice, and thus, influence subsequent learning. Further, our results also indicated that both schedule of practice and task similarity interact with the amount of practice; thus, learning of new motor behavior supposes to consider all these factors. In Experiment 3, our data argue for the existence of both effector-dependent and visual-spatial sequence representation, irrespective of the amount of practice. These findings are not consistent with the notion that the amount of practice is thought to be a determinant factor in the shifting from a visual-spatial (effector-independent) to a motor (effector-dependent) code representation (from 1 to 2 days of practice). Theoretical and practical implications emerging from these results are discussed with regard to pre-existent theoretical data and models.

Keywords: Motor learning; Contextual interference; Intra- and intertask processing; Schedule of practice; Task similarity; Sequence movement representations.