

Daniel LEWKOWICZ et Yvonne DELEVOYE-TURELL

Effet de la variabilité terminale sur la vitesse d'exécution et le couplage des mouvements inclus dans une même séquence motrice.

Notice biographique

Daniel Lewkowicz réalise sa thèse au laboratoire URECA de l'Université Lille 3 sous la direction du prof. Y. Delevoye-Turrell depuis Septembre 2010. Ses travaux se placent au carrefour des sciences cognitives, de la psychologie, des neurosciences et de la robotique. L'objectif de sa thèse est de réaliser une analyse de la cinématique des mouvements biologiques lors de situations de manipulation d'objet. De cette analyse, sont extraits des invariants permettant de mieux cerner les liens entre cinématique et intentionnalité. Ces recherches apportent une contribution significative pour le développement de robots humanoïdes capables d'apprendre à partir d'interactions intuitives non verbales. Ainsi, il participe activement au projet ANR interdisciplinaire INTERACT (porteur : P. Gaussier, UMR CNRS 8051) dont l'objectif est la construction d'un robot humanoïde qui aurait la capacité par observation et imitation de travailler conjointement avec une personne.

Résumé en français

Dans la littérature du contrôle moteur, plusieurs théories récentes proposent que le cerveau agit comme un contrôleur optimal, en planifiant les actions motrices de telle sorte que la variabilité d'exécution soit minimale (HARRIS et WOLPERT, 1998 ; VAN BEERS *et al.*, 2004 ; pour revue : TODOROV, 2004). Dans la présente contribution, nous avons étudié l'effet d'une instabilité terminale sur les caractéristiques de planification précoce dans une tâche séquentielle de manipulation d'objet. La tâche du sujet était de saisir un objet pour le placer sur un réceptacle dont la stabilité était plus ou moins prévisible. Les résultats ont révélé une modification précoce de l'exécution motrice avec notamment une réduction significative de la vitesse d'exécution dès le premier élément de la séquence, en réponse à une instabilité de la plateforme terminale. De plus, un

meilleur couplage a été observé entre les paramètres cinématiques des sous-éléments de la séquence d'autant plus que l'instabilité induite expérimentalement était prévisible. Ces résultats sont en accord avec le modèle de planification par anticipation (FISCHER *et al.*, 1997 ; HERBORT et BUTZ, 2007) et apportent un éclairage nouveau sur la notion de rétro-propagation des contraintes environnementales et également, sur le phénomène de planification couplée.

Mots-clés : action, planification, couplage, variabilité, séquence, rétro-propagation.

Résumé en anglais

In the field of motor control, recent theories have described the brain as an optimal controller, which would plan motor actions in such a way to minimise execution variability (HARRIS ET WOLPERT, 1998 ; VAN BEERS *et al.*, 2004 ; for a review see TODOROV, 2004). In the present contribution, we investigated the effects of terminal instability on the early components of action planning in the sequential task of pick and place. The subjects' task was to reach for an object and to place it on a moving platform. The instability of this final pad was more or less predictable. Results showed that terminal variability modulated action execution with significant kinematic changes as early as the first element of the sequence. In addition, greater coupling between the different elements of the sequence was revealed especially for those conditions in which the platform's instability could be predicted. These results are in line with the model of predictive global planning (FISCHER *et al.*, 1997; HERBORT & BUTZ, 2007), and bring new insights on the phenomena of coupled planning in relation to context instability.

Keywords: action, planning, coupling, kinematics, reaching, grasping, placing, sequential, variability, back-propagation.

1. Introduction

Une des caractéristiques prédominantes du contrôle moteur chez l'humain est la variabilité de nos mouvements qui limite la précision avec laquelle nous pouvons réaliser une action. Par exemple, si on demande à quelqu'un de répéter plusieurs fois le même geste (même effecteur, même point d'origine, même point

d'arrivée), on observe rapidement une certaine variabilité dans les caractéristiques cinématiques de ces mouvements (vitesse, accélération, durée, précision terminale). Prenons le cas d'un mouvement réalisé de la manière la plus rapide possible. Dans ce cas, les forces de contraction musculaires sont plus importantes que celles nécessaires pour l'exécution d'un mouvement lent. Il a aussi été montré que la force du signal neuronal qui est envoyé à ces muscles est nécessairement plus importante pour obtenir des contractions rapides et puissantes. Cependant, en augmentant la force du signal, le bruit est aussi augmenté. Harris & Wolpert (1998) suggèrent alors que ce bruit « neuronal » serait à l'origine de la faible précision terminale observée lors de mouvements très rapides. A l'inverse, si pour une tâche donnée, les contraintes de précision sont plus fortes, alors la durée des mouvements pour la réaliser sera plus grande (Loi de Fitts). Par exemple, passer un fil dans le chat d'une aiguille demande beaucoup plus de temps que de passer un lacet dans le trou d'une chaussure. C'est ainsi qu'il a été suggéré que le paramètre de contrôle de nos mouvements serait leur *variabilité*. Afin de minimiser les conséquences délétères du bruit, le cerveau chercherait à réduire l'imprécision de nos gestes en adoptant des stratégies permettant de contrôler la variabilité des mouvements (HARRIS et WOLPERT, 1998). Néanmoins, l'origine de cette variabilité est multiple et de nombreuses études expérimentales ont ainsi été menées pour identifier quelles sont les sources de variabilité dans les différentes étapes du contrôle moteur.

Lorsque nous souhaitons atteindre une cible avec notre main, au moins trois étapes sont nécessaires pour nous permettre de produire le mouvement : la localisation, la planification et l'exécution. Etant donné qu'elles se déroulent dans le système nerveux, chacune de ces étapes est sujette au bruit inhérent à la transmission neuronale. Dès lors, nous pouvons légitimement nous demander quelles sont les conséquences de ce bruit dans leur réalisation.

1.1. Localisation

Lors de l'étape de localisation, les positions de la cible et de la main sont obtenues à l'aide d'informations sensorielles à la fois visuelles et proprioceptives. La question de la variabilité pour l'étape de localisation a fait l'objet de nombreux travaux expérimentaux. Par exemple, Rossetti et collaborateurs (1994) ont demandé à des sujets

de pointer en direction d'une cible selon différentes conditions de visibilité. Les sujets pouvaient voir ou non leur main préalablement à l'initiation du mouvement mais jamais pendant son exécution. Leurs résultats montrent que la variabilité terminale des actions était significativement réduite lorsqu'à la fois la main et la cible étaient visibles, par rapport à une condition où uniquement la cible est visible. Les auteurs en ont conclu que les informations visuelles de position *initiale* de la main et de la cible sont importantes afin de compenser la variabilité *initiale* associée à la programmation du geste, et que ce phénomène ne dépendait donc pas du retour visuel pendant l'exécution de la tâche (ROSSETTI *et al.*, 1994). D'autres auteurs ont trouvé des résultats similaires en manipulant la position de la cible en 2D (VAN BEERS *et al.*, 1998) ou en 3D (MC INTYRE *et al.*, 1997). Dans cette dernière étude, un délai temporel était manipulé entre la présentation de la cible et l'initiation du mouvement. Les résultats ont montré qu'en augmentant ce délai, l'erreur terminale était très largement accrue, et ce, dans les trois dimensions de l'espace. Ces auteurs ont alors suggéré que l'information de position de la cible était maintenue en mémoire dans une forme dont la stabilité est indépendante de la direction de l'espace (MC INTYRE *et al.*, 1997).

Ces études ont permis de mettre en évidence des effets de la variabilité liée à l'étape de *localisation*. Afin de réduire cette variabilité, le cerveau doit avoir accès à des informations visuelles précises pour reconstruire l'espace en trois dimensions dans lequel le mouvement doit être exécuté. Une fois déterminées, les informations de localisation vont ensuite être utilisées lors de l'étape de planification du mouvement. La façon le cerveau va alors contrôler la variabilité inhérente à l'étape de planification est aussi une question qui a suscité de nombreux travaux expérimentaux.

1.2. Planification

La planification du mouvement est l'étape qui consiste en la sélection des commandes motrices qui vont permettre de produire un mouvement désiré, de la position initiale jusqu'à la position finale. Cette étape utilise les sorties de l'étape de localisation comme entrée et génère des commandes motrices en sortie. Par exemple, pour atteindre et saisir un objet, nous devons à la fois déplacer notre main en direction de cet objet (composante de transport) et ouvrir notre main de façon à l'attraper correctement (composante de

manipulation). En demandant à des sujets de saisir des objets placés à différentes distances, Jeannerod (1984) a analysé les caractéristiques de la coordination spatio-temporelle entre les composantes de transport et de manipulation. Les résultats ont suggéré que le pic d'ouverture maximal de la pince digitale est hautement corrélé avec le pic de décélération du transport de la main (à environ 75% de la trajectoire totale). De plus, ce lien existe même dans les conditions pour lesquelles les sujets n'ont aucun retour visuel de leur membre en mouvement (JEANNEROD, 1984). Les théories motrices actuelles concèdent donc la possibilité qu'une programmation centrale, commune et globale, soit mise en place par le cerveau pour coordonner les deux composantes d'une même séquence de mouvement. Au cours de cette étape de planification, les commandes motrices pour le bras et la main seraient déterminées préalablement à l'initiation du mouvement de préhension afin de faciliter la probabilité d'atteinte de l'objectif moteur (prendre l'objet), de part notamment la maîtrise de la variabilité inhérente aux différentes boucles de contrôle impliquées pour l'exécution de séries d'actions motrices (KAWATO, 1999).

Pour considérer le rôle des boucles de retour sensoriel dans l'optimisation des mouvements de saisie, la question de la compensation en absence de vision a été étudiée par Wing et collaborateurs (1986). Leurs études ont montré que la taille de l'ouverture de la pince pouvait compenser les facteurs qui influencent la variabilité liée à l'exécution de la composante de transport. En effet, pour un mouvement réalisé le plus rapidement possible, l'ouverture de la pince est plus grande comparativement à ce qui est observé dans le cas d'un mouvement réalisé à vitesse naturelle. De plus, l'ouverture maximale de la main est encore plus grande lorsque ce mouvement est réalisé les yeux fermés ou sans retour visuel. Dans les deux cas, le geste présente des erreurs spatiales significatives. Wing et collaborateurs ont ainsi suggéré qu'en anticipation des erreurs de planification, l'ouverture de la pince digitale est programmée de façon à compenser l'imprécision de la composante de transport (WING *et al.*, 1986).

Enfin, des sources de variabilité additionnelles ont pu être identifiées, lors de l'étape de planification, en prenant en compte par exemple les propriétés fonctionnelles de l'espace d'action (direction et amplitude). Plus spécifiquement, Gordon & Ghez (1994) ont demandé à des sujets de pointer par des mouvements rapides et répétés des cibles dans plusieurs directions de l'espace. Par l'analyse de la distribution spatiale des points terminaux, ils ont alors montré

que les distributions étaient elliptiques et orientées selon la direction des mouvements exécutés. Selon les auteurs, ces résultats seraient liés au fait que les mouvements sont planifiés dans un système de coordonnées dont l'origine se situe au niveau de la position initiale de la main, selon un codage vectoriel du mouvement entre les points d'origine et d'arrivée. Par ailleurs, leurs résultats montrent que les erreurs de pointage dans l'axe du mouvement augmentent avec la distance entre le point d'origine et la cible alors que l'erreur de direction (axe perpendiculaire à l'axe du mouvement) est globalement constante, d'où la forme elliptique de la distribution des points terminaux. Pour ces auteurs, il semblerait alors que la variabilité directionnelle soit indépendante de la variabilité liée à l'amplitude du mouvement ; ces deux éléments seraient alors planifiés séparément (GORDON *et al.*, 1994). En résumé, lors de l'étape de planification, les sources de variabilité vont émerger notamment lors des calculs de transformation de coordonnées entre l'espace visuel (œil-centré), et l'espace articulaire (corps-centré) avec des erreurs liées au codage vectoriel de l'espace (VINDRAS et VIVIANI, 1998). Toutefois, une fois que la sélection des commandes a été effectuée, le « programme moteur » est utilisé pour exécuter l'action. De nouveau, au cours de cette dernière étape d'exécution, d'autres sources de variabilité peuvent aussi intervenir.

1.3. L'exécution

Lors de l'étape d'exécution, les commandes motrices sont envoyées aux muscles de façon à ce que le mouvement soit effectué. La variabilité observée dans le mouvement pourrait ainsi refléter le bruit du signal neuronal reçu par les organes terminaux. Pour tester cette hypothèse, des sujets ont eu pour tâche de répéter un grand nombre de fois les mêmes mouvements de pointage pour qu'après apprentissage, la variabilité liée aux étapes de localisation ou de planification soit minimisée. En augmentant la quantité de répétitions dans un design d'expérience en bloc, Van Beers, Haggard & Wolpert (2004) ont ainsi montré que la variabilité liée à l'exécution n'était pas uniforme dans toutes les directions de l'espace. En effet, la distribution des points terminaux ne se répartissait pas forcément selon l'axe principal entre la position initiale et la position finale contrairement au modèle de codage vectoriel de Gordon et Ghez (1994). Les résultats montrent que la distribution des points terminaux se répartissait selon la *courbure* de la trajectoire suivie par

la main (VAN BEERS *et al.*, 2004). Cette courbure dépendrait à la fois de la vitesse du mouvement et de la distance à parcourir, et son origine pourrait être liée aux propriétés biomécaniques de l'effecteur (muscles et ligaments du bras).

En résumé, les études rapidement décrites ci-dessus ont permis de mettre en évidence les différentes sources de variabilités qui interviennent à chaque étape du contrôle moteur, de la localisation de la cible jusqu'à l'exécution du mouvement. Pour chacune d'entre elles, le système de contrôle moteur humain s'organise de façon à minimiser les effets délétères de cette variabilité. Cependant, la plupart de ces études ont été faites dans un environnement stable et prédictible, avec des contraintes qui sont connues très tôt pendant la phase de planification. Tout un autre groupe de chercheurs se sont posé alors la question de mieux déterminer la part de variabilité motrice qui serait liée à une instabilité de l'environnement et notamment, suite à une modification des propriétés de l'espace d'action dans lequel nous effectuons les mouvements.

1.4. Perturbations mécaniques de l'environnement

Pour manipuler la prédictibilité des interactions entre un acteur et son environnement proche, différents protocoles expérimentaux ont été développés. Par exemple, certains auteurs se sont intéressés à la manière dont les sujets humains étaient capables d'adapter leurs réponses suite à une perturbation mécanique. Dans ces études, les effets d'une perturbation au cours de l'exécution ont été étudiées en mettant les sujets dans une chambre rotative (LACKNER et DIZIO, 1994) ou encore, en utilisant des champs de forces simulés via des manipulandum robotiques (SHADMEHR et MUSSA-IVALDI, 1994 ; WON et HOGAN, 1995). Ces études montrent que les sujets vont compenser les perturbations en modifiant l'impédance musculaire, c'est-à-dire les relations entre la force du muscle et son étirement induit. Shadmehr et collaborateurs ont ainsi montré que l'adaptation comportementale se réalise via la formation d'un modèle interne approprié pour compenser la variabilité qui émerge des interactions successives avec l'environnement. Cette adaptation est particulièrement visible lorsque le champ de force est supprimé soudainement et que les sujets continuent à exécuter les mouvements sans retour visuel de leur effecteur. Les résultats révèlent que les déviations par rapport aux trajectoires sont alors

toujours présentes même après 250 essais sans champ de force. De plus, cette adaptation se transfère d'une direction de l'espace à une autre (SHADMEHR et MUSSA-IVALDI, 1994). Ces résultats sont des arguments solides en faveur d'un modèle interne de planification du mouvement établi préalablement à l'exécution qui peut être modifié par les interactions successives du sujet avec son environnement.

Une autre approche, beaucoup moins développée, a été de manipuler la stabilité *terminale* de l'environnement, i.e., des propriétés de l'espace d'action dans lequel se place l'objectif moteur. Dans le cas d'une manipulation d'objet, la question de la stabilité du réceptacle sur lequel un objet est posé a été développée dans une étude menée par Klatzky et collaborateurs (1995). Les sujets avaient pour tâche de prendre des objets qui étaient sur une plateforme glissante ou non-glissante. Les résultats ont montré que la durée des mouvements pour atteindre l'objet était beaucoup plus grande lorsque ce dernier était placé sur un réceptacle glissant. Les auteurs suggèrent alors que la stabilité de la main au contact de l'objet est prise en compte lors de la planification en tant que contrainte supplémentaire (KLATZKY *et al.*, 1995).

Toutefois, aucune étude à ce jour n'a posé la question de l'instabilité de l'environnement, non pas au contact de l'objet mais lors du contact de cet objet sur la surface sur lequel on va le poser, c'est-à-dire à la fin d'une séquence de deux sous-éléments moteurs. Dans une tâche de saisie, quelle serait alors l'influence de l'instabilité du réceptacle sur la préparation et la production de la séquence d'action ? Dans la présente étude, nous proposons de tester ces effets dans une situation de capture de mouvement interactive au cours de laquelle les sujets avaient pour instruction de saisir puis de déplacer un objet d'une plateforme stable à une plateforme instable. De plus, nous avons réalisé une situation interactive au cours de laquelle les sujets recevaient des renforcements en temps réel sur leurs propres performances. Ainsi cela nous a permis d'intensifier leur implication dans la réalisation des mouvements rapides et précis. Dans la présente étude, nous posons l'hypothèse selon laquelle le modèle interne de planification motrice serait modifié préalablement à l'initiation de la séquence pour tenir compte de la variabilité terminale de la plateforme de réception. Ainsi, dans une séquence de plusieurs mouvements, le phénomène de *planification couplée* sera mis en évidence et révélera une modification de la cinématique dès le premier sous-élément moteur (la saisie). De plus, cette planification couplée se traduira par une augmentation significative du lien entre les caractéristiques des sous-éléments d'une même

séquence (i.e. une corrélation accrue, par exemple, entre les pics vitesse des éléments 1 : saisie et 2 : déplacement). Enfin, le caractère prédictible de l'instabilité induite au cours de l'expérience devrait avoir un effet sur la qualité de la planification. Ainsi, nous testerons l'hypothèse selon laquelle dans un environnement instable, le couplage sera d'autant plus important (lien plus marqué) si la variabilité de l'environnement est prédictible.

2. Méthodologie

Neuf sujets sains droitiers qui ne présentent aucune altération de la vision ou de la motricité ont participé à cette expérience. Les enregistrements ont été réalisés à l'aide de 4 caméras de capture de mouvement 3D (Qualisys). Quatre capteurs réfléchissants ont été fixés sur l'effecteur de saisie : l'ongle du pouce, l'ongle de l'index, et deux marqueurs sur le poignet de chaque participant.

Pendant la session expérimentale, le sujet était debout face à une table sur laquelle est disposée un réceptacle de départ (15cm de diamètre). Ce réceptacle était placé à 35 cm de la position de départ de la main du sujet. A droite de ce réceptacle de départ, un réceptacle d'arrivée de diamètre 9cm pouvait se déplacer sur un rail de 38 cm incliné à 45° (voir figure 1). La tâche du sujet était de saisir un objet cylindrique (diamètre de 6 cm) entre le pouce et l'index, de le soulever du réceptacle de départ pour le déposer précisément sur le réceptacle d'arrivée.

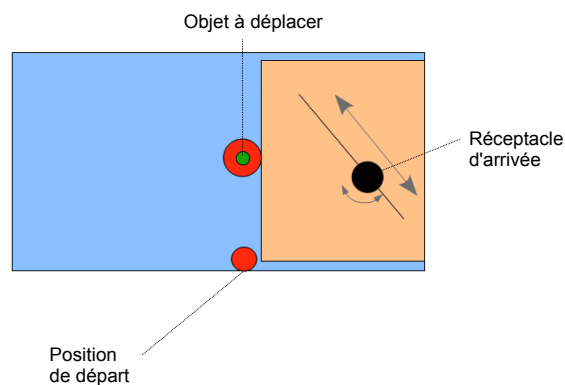


Figure 1 : Schéma du dispositif expérimental.

Deux types de contraintes ont été manipulées. Pour la contrainte vitesse, les sujets devaient réaliser la tâche à vitesse rapide (pic de vitesse du premier mouvement > 1200mm.s⁻¹) ou à vitesse

préférée. Pour la contrainte de variabilité terminale, le réceptacle d'arrivée pouvait être immobile (condition *Contrôle*) en *Translation* ou en *Rotation*. Pour la translation et la rotation, les déplacements du réceptacle pouvaient être soit prédictibles soit aléatoires. Dans la situation prédictible, la translation consistait en un déplacement le long du rail en aller-retour avec un changement de direction toutes les secondes et une vitesse moyenne de 50 mm.s^{-1} ; la rotation consistait en un déplacement de la partie supérieure du réceptacle selon une direction comprise entre 0 et 180° toutes les secondes. Dans les deux cas, les conditions aléatoires consistaient en des changements non prédictibles, selon un intervalle temporel compris entre 500 et 1500 ms.

Les sujets réalisaient la tâche de manipulation en situation d'interaction augmentée, i.e., sans intervention verbale de l'expérimentateur (pour une meilleure validité expérimentale). Trois petites diodes de couleur étaient placées sur la table face aux sujets pour leur indiquer le début et la fin de chaque essai. Lorsque la lumière était jaune, les sujets devaient se placer en position de départ. Après un délai aléatoire de 1 à 3 secondes, la lumière jaune s'éteignait et simultanément la lumière verte s'allumait. Lorsque la lumière verte était allumée, les sujets réalisaient l'action de prendre le cylindre et de le placer sur son réceptacle. Après 4 secondes, la lumière verte s'éteignait et la lumière rouge s'allumait. Ceci indiquait la durée inter essai au cours de laquelle les sujets devaient repositionner l'objet face à eux et pouvaient ensuite se reposer. Au bout de 4 secondes, la lumière jaune réapparaissait et les sujets recommençaient une nouvelle fois la procédure. A la fin de chaque essai, un signal auditif était émis pour indiquer au sujet si l'objet avait été correctement positionné sur le réceptacle. Les sujets réalisaient un total de 15 essais pour chacune des conditions. Pour des raisons de fatigabilité des sujets, nous avons réalisé cette expérience en deux sessions contrebalancées avec une session en vitesse rapide et une session en vitesse préférée.

L'erreur terminale a été calculée à partir des matrices de covariances des positions terminales en deux dimensions. Celles-ci étaient visualisées sous forme d'ellipses caractérisées par deux vecteurs représentant les composantes principales en longueur et en largeur. L'erreur terminale reportée ici est l'amplitude du plus grand des deux vecteurs. Pour des raisons techniques, cette erreur terminale n'a pu être calculée que lorsque le réceptacle était en condition *Contrôle* et *Rotation*. Les données cinématiques ont été enregistrées (fréquence d'échantillonnage de 200 Hz) et analysées de

façon à extraire les paramètres moteurs pour chacune des deux phases de la séquence (P1 : phase d'atteinte et saisie; P2 : phase de déplacement et pose). Ainsi, l'erreur terminale, le temps de réaction, la durée des mouvements, et la vitesse maximale ont été soumis à deux ANOVA à mesures répétées dont le facteur principal était **Stabilité** (Contrôle ; Translation_{Prédictible} ; Translation_{Aléatoire} ; Rotation_{Prédictible} ; Rotation_{Aléatoire}). Les données issues des sessions en vitesse rapide et préférée ont été traitées séparément. Le seuil de significativité a été placé à 0,05. Dans une seconde analyse, les paramètres cinématiques de pics de vitesse et de durée de mouvements ont été soumis à une série d'analyses de corrélations. Pour chaque sujet, le paramètre cinématique de la phase 1 a été corrélé avec le même paramètre de la phase 2, sur un même essai. Les coefficients de corrélation R et de détermination R² ont été calculés pour chaque condition et par sujet.

3. Résultats

3.1. Variables globales (Temps de Réaction et Erreur terminale)

En vitesse rapide, nos résultats montrent que le temps de réaction n'est pas affecté par la variabilité terminale du réceptacle que ce soit en Translation, $F(2,6)=2.386$; $p=.173$, ou en Rotation $F(2,6)=1.403$; $p=.316$. Le temps de réaction moyen est de 217 ± 21 ms en condition Contrôle, 228 ± 22 ms en Translation Prédictible, 195 ± 20 ms en Translation Aléatoire, 241 ± 26 ms en Rotation Prédictible et 216 ± 32 ms en Rotation Aléatoire. L'erreur terminale n'est pas non plus affectée par la stabilité terminale du réceptacle, $F(2,6)=2.8185$, $p=.137$. Elle est de 6.3 ± 0.5 mm en condition Contrôle, 7.0 ± 0.5 mm en Rotation Prédictible et 7.7 ± 0.6 mm en Rotation Aléatoire. En vitesse préférée, des résultats similaires ont été obtenus. Il n'y a pas d'effet de la stabilité terminale du réceptacle sur le temps de réaction, ni en Translation $F(2,16)=0.579$; $p=.572$, ni en Rotation $F(2,16)=0.579$; $p=.572$. Le temps de réaction moyen est de 247 ± 20 ms en condition Contrôle, 262 ± 19 ms en Translation Prédictible, 282 ± 24 ms en Translation Aléatoire, 281 ± 22 ms en Rotation Prédictible et 268 ± 20 ms en Rotation Aléatoire. L'erreur terminale n'est pas non plus affectée par la stabilité terminale du réceptacle, $F(2,16)=0.769$, $p=.480$. Elle est

de 5.3 ± 0.5 mm en condition Contrôle, 5.3 ± 0.6 mm en Rotation Prédicible et 5.5 ± 0.6 mm en Rotation Aléatoire.

3.2. Effet de la stabilité terminale sur la cinématique du 1er mouvement.

En vitesse rapide, un effet significatif de la stabilité terminale du réceptacle a été obtenu sur la cinématique du premier mouvement. Les séquences motrices étaient caractérisées par un pic de vitesse plus élevé pour un objet à placer sur un réceptacle immobile que sur un réceptacle en mouvement. Ces résultats ont été obtenus pour la Translation $F(2,6)=31,089$; $p < .001$, $\eta^2_p = .91$ et également, pour la Rotation, $F(2,6)=15,427$; $p = .005$, $\eta^2_p = .72$. Pour la Translation, l'analyse post-hoc a révélé une différence significative entre la condition Contrôle et les deux types d'instabilité (Contrôle = 1835 ± 59 mm.s⁻¹ vs Prédicible = 1543 ± 65 mm.s⁻¹, $p < .001$; Contrôle vs Aléatoire = 1544 ± 81 mm.s⁻¹, $p < .001$). En revanche, les deux types d'instabilité ne sont pas différentes entre elles (Prédicible vs Aléatoire, $p = .999$). Pour la Rotation, une différence significative est observée entre la condition Contrôle et les deux conditions variables (Contrôle = 1835 ± 59 mm.s⁻¹ vs Prédicible = 1451 ± 39 mm.s⁻¹, $p = .009$; Contrôle vs Aléatoire = 1482 ± 55 mm.s⁻¹, $p = .013$) mais pas de différence entre les deux types d'instabilité (Prédicible vs Aléatoire, $p = .932$).

De façon similaire, les résultats ont montré que la durée du premier mouvement était réduite lorsque les sujets devaient prendre l'objet à poser sur un réceptacle immobile plutôt que sur un réceptacle en mouvement, de Translation $F(2,6)=20,309$; $p = .002$, $\eta^2_p = .87$ et également, en mouvement de Rotation, $F(2,6)=13,885$; $p = .005$, $\eta^2_p = .82$. L'analyse post-hoc a indiqué qu'en condition Contrôle, la durée du premier mouvement était réduite par rapport à toutes les autres conditions d'instabilité, (1) en Translation (Contrôle = 362 ± 8 ms vs Translation Prédicible = 439 ± 13 ms, $p = .002$; Contrôle vs Translation Aléatoire = 403 ± 7 ms, $p = .043$), et (2) en Rotation (Contrôle vs Rotation Prédicible = 441 ± 17 ms, $p = .016$; Contrôle vs Rotation Aléatoire = 451 ± 11 ms, $p = .009$). De même, il n'y a pas de différence entre les deux types d'instabilité sur la durée du premier mouvement, entre les conditions Prédicible et Aléatoire pour la condition de Translation, $p = .062$ et également pour la condition de Rotation, $p = .851$.

En vitesse préférée, nos résultats ont révélé des effets similaires avec un effet de l'instabilité terminale sur le pic de vitesse du premier mouvement. Lorsque les sujets devaient prendre un objet pour le placer sur un réceptacle immobile, les mouvements étaient plus rapides que pour des mouvements vers un réceptacle instable en Translation, $F(2,16)=11,903$; $p<.001$, $\eta^2_p=.60$ et en Rotation, $F(2,16)=13,542$; $p<.001$, $\eta^2_p=.63$. L'analyse post-hoc a révélé de plus une différence entre la condition contrôle et les deux types d'instabilité à la fois pour (1) la Translation (Contrôle= $1276\pm 14\text{mm.s}^{-1}$ vs Translation Prédicible= $1103\pm 34\text{mm.s}^{-1}$, $p<.001$; Contrôle vs Translation Aléatoire= $1152\pm 39\text{mm.s}^{-1}$; $p=.014$) et pour (2) la Rotation (Contrôle= $1276\pm 14\text{mm.s}^{-1}$ vs Rotation Prédicible= $1098\pm 34\text{mm.s}^{-1}$, $p<.001$; Contrôle vs Aléatoire= $1128\pm 39\text{mm.s}^{-1}$, $p=.004$). Les résultats n'ont pas montré de différence entre la condition Prédicible ou Aléatoire ni en Translation, $p=.409$, ni en Rotation, $p=.720$.

Pour la durée du mouvement d'atteinte vers l'objet, les résultats montrent des différences moins marquées qu'en vitesse rapide, mais qui vont dans le même sens. La durée du premier mouvement est réduite en condition Contrôle, par rapport aux conditions de Translation $F(2,16)=3,698$; $p=.048$, $\eta^2_p=.32$, et de Rotation, $F(2,16)=3,555$; $p=.053$, $\eta^2_p=.31$. L'analyse post-hoc révèle que la condition Contrôle est différente des deux autres conditions d'instabilité, pour la Translation (Contrôle= $604\pm 17\text{ms}$ vs Translation Prédicible= $668\pm 25\text{ms}$, $p=.044$; Contrôle vs Translation Aléatoire= $678\pm 22\text{ms}$; $p=.024$) et pour la Rotation (Contrôle vs Rotation Prédicible= $676\pm 28\text{ms}$, $p=.029$; Contrôle vs Rotation Aléatoire= $670\pm 26\text{ms}$; $p=.043$). La figure 2 présente les profils moyennés de vitesse, pour les 15 essais de chaque condition pour un sujet type. La figure 3 présente les moyennes de groupe pour le pic de vitesse du premier mouvement.

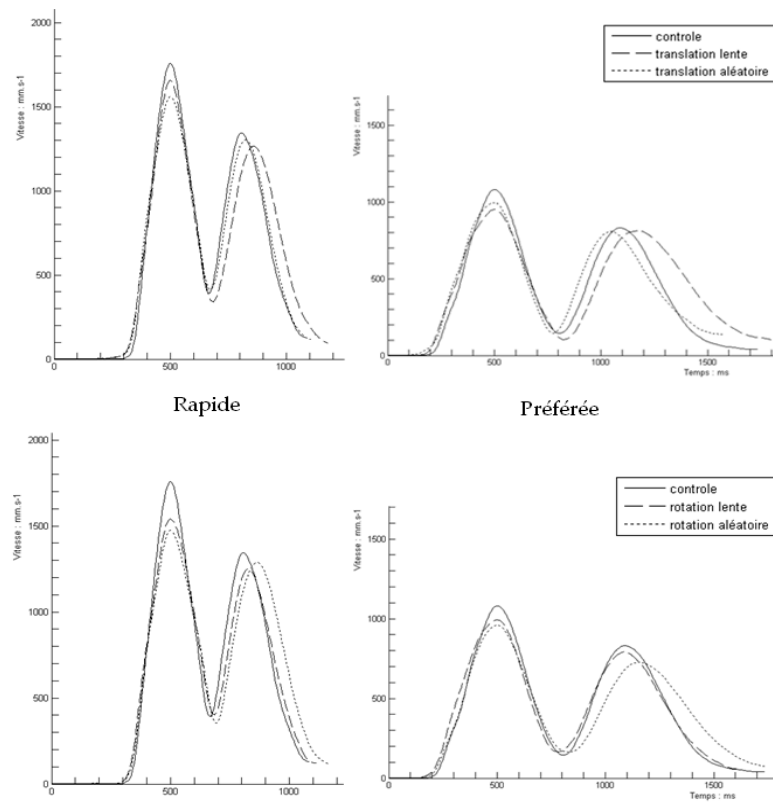


Figure 2 : Les profils cinématiques présentent la vitesse d'exécution des deux mouvements (prendre puis déposer l'objet) au cours du temps. Chacun des deux mouvements se présente sous la forme d'une courbe en cloche (phase d'accélération et de décélération). Ici la séquence des deux mouvements successifs est présentée selon les différentes conditions expérimentales.

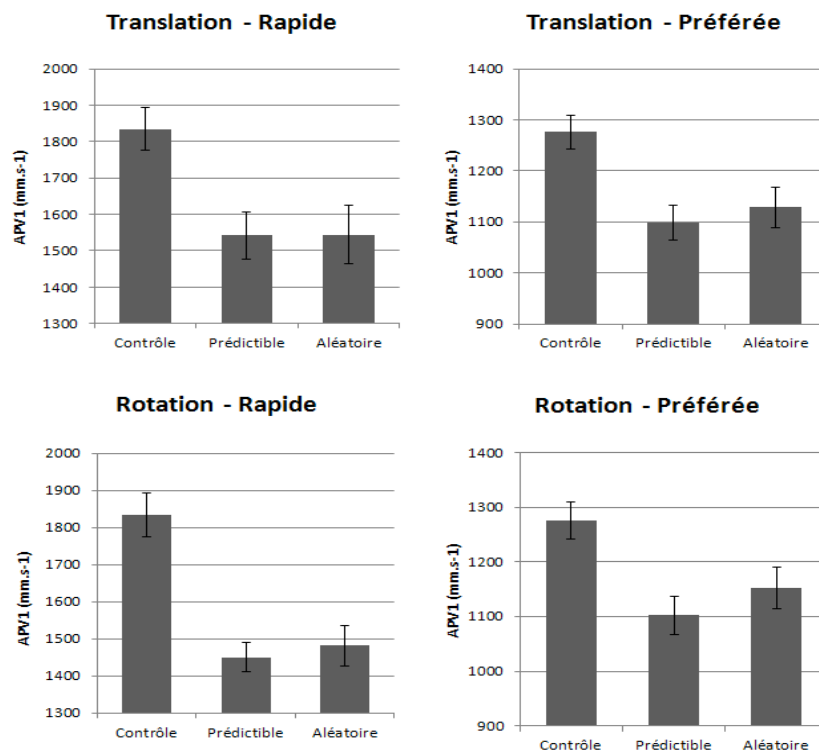


Figure 3 : Effet de la stabilité terminale sur le pic de vitesse du premier mouvement (APV1)

3.3. Effet de la variabilité sur la corrélation entre les deux mouvements.

Dans une deuxième analyse, nous avons réalisé une analyse par corrélations pour révéler les liens possibles entre les paramètres cinématiques des deux sous-éléments d'une même séquence. Plus spécifiquement, pour les pics de vitesse en condition Contrôle seulement 2 sujets sur 9 ($R=.34\pm.06$) présentent des régressions significatives ($R>.50$, $p<.05$), contre 5 sur 9 en Translation Prédicible ($R=.62\pm.08$), 3 sur 9 en Translation Aléatoire ($R=.42\pm.09$), 6 sur 9 en Rotation Prédicible ($R=.52\pm.09$) et 1 sur 9 en Rotation Aléatoire ($R=.31\pm.05$). Pour les durées de mouvement, en condition Contrôle, aucun sujet ne révèle de régression significative ($R=.28\pm.04$), contre 4 sur 9 en Translation Prédicible ($R=.42\pm.08$), 1 sur 9 en Translation Aléatoire ($R=.28\pm.07$), 5 sur 9 en Rotation Prédicible ($R=.55\pm.08$) et 2 sur 9 en Rotation Aléatoire ($R=.35\pm.08$).

Ainsi, les résultats de l'analyse de corrélation suggèrent un effet de l'instabilité du réceptacle sur la corrélation des pics de vitesse. Dans le cas d'une Translation, les pics de vitesse sont mieux corrélés dans le cas d'une translation Prédicible ($R^2=.44\pm.10$) par rapport à la condition Contrôle ($R^2=.15\pm.04$), $p=.015$, $F(2,16)=5,751$; $p=.013$, $\eta^2_p=.41$. En revanche, une Translation Aléatoire, n'a entraîné qu'une faible augmentation de la corrélation ($R^2=.25\pm.08$), et cette différence n'est pas significative par rapport au Contrôle, $p=.558$. Pour la Rotation, la corrélation entre la durée des mouvements est améliorée pour une Rotation Prédicible ($R^2=.35\pm.08$) par rapport au Contrôle ($R^2=.09\pm.02$), $p=.035$, $F(2,16)=4,272$; $p=.033$, $\eta^2_p=.35$. En revanche, une Rotation Aléatoire n'a entraîné qu'une faible augmentation de la corrélation ($R^2=.18\pm.07$) qui n'est pas significativement différente du Contrôle, $p=.606$. En conclusion, nos résultats ont révélé une corrélation positive et significative entre les sous-éléments d'une même séquence, avec un effet amplifié (un lien plus fort) lorsque l'instabilité est prédictible. Un exemple de résultats pour un sujet type est présenté en figure 4.

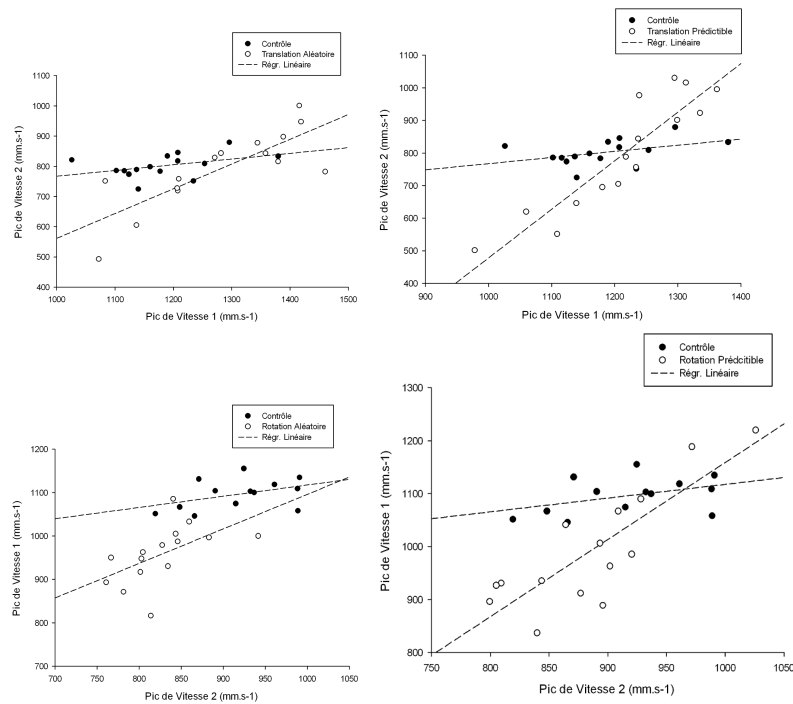


Figure 4 : Effet de la variabilité terminale sur la corrélation entre le pic de vitesse de la phase 1 et 2. En haut : corrélations en *Translation* pour le sujet JJ. A gauche : situation Contrôle en noir ($R^2=.18$, $p=.119$) vs Translation Aléatoire en blanc ($R^2=.64$, $p<.001$), à droite : Contrôle en noir vs Translation Prédicible en blanc ($R^2=.83$, $p<.001$). En bas : Corrélations en *Rotation* pour le sujet AR. A gauche : Contrôle en noir ($R^2=.17$, $p=.121$) vs Translation Aléatoire en blanc ($R^2=.30$, $p=.033$), à droite : Contrôle en noir vs Translation Prédicible en blanc ($R^2=.68$, $p<.001$).

4. Discussion

Dans notre vie quotidienne, nous sommes amenés à réaliser des mouvements qui font généralement partie d'une séquence de plusieurs mouvements comme par exemple prendre une cuillère pour l'amener à la bouche ou la ranger dans un tiroir. Dans la littérature du contrôle moteur, des études ont montré qu'il est tout à fait possible de planifier une séquence d'actions selon une stratégie étape-par-étape dans l'ordre de leur exécution, mais avec une efficacité et une fluidité limitée. Ainsi, une meilleure stratégie semble être de réaliser une planification globale de la séquence motrice qui

intègre non seulement l'objectif final mais également les contraintes de variabilités dont les sources sont multiples (ANSUINI *et al.*, 2006 ; COHEN et ROSENBAUM, 2004).

Les résultats de notre étude ont permis de mettre en évidence deux phénomènes importants dans la planification d'une tâche de manipulation séquentielle impliquant deux sous-éléments. D'une part, nous avons montré que la cinématique du premier mouvement est affectée par l'instabilité terminale du réceptacle: les mouvements d'atteinte et de saisie présentent un pic de vitesse plus réduit et la durée des mouvements est augmentée si la position terminale du réceptacle est variable. Ces résultats suggèrent que l'instabilité terminale liée à l'environnement est rétro-propagée sur le premier sous-élément de la séquence afin de produire un mouvement compatible avec l'objectif moteur, i.e., placer correctement l'objet sur le réceptacle. Ces résultats sont en accord avec la littérature et confirment ceux obtenus par Rand et collaborateurs (1997) dans une tâche de pointage séquentiel montrant que les contraintes de précision terminale affectent la planification globale et l'organisation entière de la séquence (RAND *et al.*, 1997). D'autre part, nous avons en plus démontré que l'importance de cette planification globale était d'autant plus grande que la variabilité terminale était prédictible. Ainsi, les liens de corrélation étaient significativement plus intenses entre les différents sous-éléments d'une même séquence pour des conditions de variabilité prédictible que pour des conditions de variabilité aléatoire.

Sur le plan théorique, nos résultats ne confirment pas le modèle de planification hiérarchique (ROSENBAUM *et al.*, 1987) qui suggère que les mouvements sont planifiés dans l'ordre de leur exécution. Au contraire, ils sont en faveur du modèle de planification anticipée du mouvement (FISCHER *et al.*, 1997 ; HERBORT et BUTZ, 2007) qui pose l'hypothèse selon laquelle les contraintes du second mouvement sont traités précocement et pris en compte dès la phase de planification du premier mouvement. Par ailleurs, nos résultats semblent indiquer que les effets de variabilité liée à l'environnement sont aussi pris en compte par le système de contrôle moteur humain au même titre que les effets liés à une variabilité de localisation, de planification ou d'exécution. Dans la présente étude, nous avons proposé de manipuler la stabilité terminale de l'objectif moteur en introduisant une variabilité en translation ou en rotation. Nos résultats ont montré que dans le cas d'une translation, la variabilité *spatiale* du réceptacle est prise en compte lors de l'étape de

18

localisation de la cible. Dans le cas de la rotation, nous avons manipulé la variabilité *temporelle* de l'instabilité du réceptacle. Dans les deux cas, les sujets ont été capables de le prendre en compte en se servant d'un mode global de planification leur permettant de réaliser la tâche sous les contraintes de rapidité et de précision imposées. Cependant, une différence significative a été mise en évidence en fonction de la prédictibilité de la variabilité. En effet, dans le cas d'une instabilité non-prédictible, nous avons montré que les sujets agissent en *réaction* face aux modifications de l'environnement et de ce fait, ne présentent pas de corrélation entre les deux sous-éléments de la séquence. En revanche, lorsque l'instabilité est prédictible, les sujets *prédisent* les conséquences de leur propre action dans l'environnement et peuvent ainsi générer très précocement des séquences motrices adaptées dans leur forme cinématique (trajectoire, vitesse, accélération). De plus, les caractéristiques cinématiques des sous-éléments sont liées entre elles pour compenser l'accumulation des sources d'instabilité et optimiser l'atteinte de l'objectif moteur.

Il est intéressant de noter que les autres études utilisant des protocoles de manipulation d'objet n'ont pas réussi à mettre en évidence une programmation couplée (e.g., JOHNSON-FREY *et al.*, 2004 ; MASON, 2007). La précision terminale de la séquence a été manipulée et les résultats n'ont révélé aucun effet précoce sur la cinématique du premier mouvement. Ainsi, il est possible que dans ces études, les contraintes liées à l'environnement aient été insuffisantes pour engendrer une modification précoce au sein de la planification motrice. En effet, dans les études de pointage (e.g., RAND *et al.* 1997), la tâche des sujets est souvent de réaliser des mouvements rapides avec une précision terminale bien contrôlée via ordinateur. Dans les études de manipulation d'objet (e.g., MASON, 2007), des instructions verbales sont utilisées, les essais sont réalisés en vitesse préférée et peu de contrôle est mis en place pour estimer la précision terminale réelle. Dans la présente étude, nous avons choisi d'utiliser un paradigme d'enregistrement, interactif pour le sujet. Un programme (Matlab) d'analyse cinématique en temps réel a permis par exemple, de moduler le retour auditif en fin d'essai en fonction de la performance du sujet. Grâce à ce système d'interaction, nous avons pu améliorer l'agrément de la passation expérimentale et ainsi augmenter le niveau d'implication des sujets. De façon plus importante, le système de mesure en temps réel, nous a aussi permis de vérifier la vitesse d'exécution des mouvements au même titre que les contraintes terminales pour induire une vraie situation

d'exécution rapide. Dans une étude précédente, nous avons pu montrer que les contraintes de précision terminales étaient rétro-propagées uniquement en condition d'exécution rapide avec une absence de rétro propagation en vitesse préférée (LEWKOWICZ et DELEVOYE-TURRELL, soumis). Nous avons alors suggéré qu'en vitesse préférée, les sujets n'utilisaient pas de stratégie globale pour planifier leurs mouvements et que l'absence de contrainte de vitesse leur permettait de planifier chaque geste séparément selon une stratégie pas à pas – qui serait probablement moins couteuse en ressources attentionnelles. Dans la présente étude, nos résultats suggèrent que, même en vitesse préférée, il est possible de faire émerger un phénomène de planification couplée sur une séquence de manipulation d'objet si les contraintes terminales sont fortement modifiées par une variabilité spatiale et/ou temporelle du réceptacle cible. En particulier, lors d'une instabilité prédictible, les sujets vont ralentir leurs actions de manière coordonnée pour minimiser la variabilité d'exécution de leur séquence et ainsi optimiser la probabilité d'atteindre précisément le réceptacle en mouvement.

En conclusion, grâce à l'utilisation d'un paradigme interactif et en temps réel, nous avons pu montrer qu'afin de minimiser les conséquences délétères d'une instabilité de l'environnement sur l'exécution des actions, le système de contrôle moteur humain peut intégrer les modifications environnementales lors de l'étape de planification motrice, préalablement à l'exécution. Ainsi les conséquences de cette adaptation interne sont visibles dès les premières étapes de la séquence motrice en particulier lorsque qu'une prédiction de cette instabilité est possible. Le *couplage* entre les sous-éléments d'une même séquence aurait alors deux conséquences importantes. D'une part, pour l'agent, cela lui permet de mieux anticiper les conséquences de ses propres actions au cours de leur exécution et de pouvoir s'adapter à une modification imprévisible de l'environnement via une correction entre le but prédit par sa propre exécution et le but à atteindre. D'autre part, pour autrui, cela pourrait permettre à un observateur de lire l'objectif final de la séquence motrice à partir des premières étapes de son exécution et ainsi, anticiper et interagir avec la personne qui réalise les mouvements. Ces deux capacités sont cruciales pour permettre à deux personnes d'interagir ensemble. Dans le domaine de la recherche, une meilleure compréhension de ce mécanisme de planification couplée permettra le développement de robots humanoïdes qui aurait la capacité d'interagir ou de travailler conjointement avec des personnes. Il sera possible notamment

d'implanter aux robots, e.g., les capacités de reconnaître les mouvements humains et d'anticiper sur leurs actions à partir d'indices cinématiques externes non verbaux et précoces ou encore de produire des séquences de mouvements biologiques qui pourront être reconnues et lues par des observateurs humains.

Financements

Cette recherche a été subventionnée par une allocation de recherche attribuée au premier auteur par la Région Nord Pas de Calais (50%), et l'ANR (50%). Cette étude s'inscrit dans un projet de collaboration interdisciplinaire entre les sciences cognitives, les sciences robotiques et des partenaires privés, soutenu et financé par l'ANR - INTERACT ANR_09-CORD-014 et la MESHS-USR 3185.

Bibliographie

- ANSUINI C., SANTELLO M., MASSACCESI S., et CASTIELLO U., 2006, « Effects of end-goal on hand shaping », *Journal of neurophysiology*, Vol. 95, n°4, p. 2456–2465.
- VAN BEERS R. J., HAGGARD P., et WOLPERT D. M., 2004, « The role of execution noise in movement variability », *Journal of Neurophysiology*, Vol. 91, n°2, p. 1050–1063.
- VAN BEERS R. J., SITTIG A. C., et DENIER VAN DER GON J. J., 1998, « The precision of proprioceptive position sense », *Experimental Brain Research*, Vol. 122, n°4, p. 367–377.
- COHEN R. G., et ROSENBAUM D. A., 2004, « Where grasps are made reveals how grasps are planned: generation and recall of motor plans », *Experimental Brain Research*, Vol. 157, n°4, p. 486–495.
- FISCHER M. H., ROSENBAUM D. A., et VAUGHAN J., 1997, « Speed and sequential effects in reaching », *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 23, n°2, p. 404–428.
- GORDON J., GHILARDI M. F., et GHEZ C., 1994, « Accuracy of planar reaching movements. I. Independence of direction and extend variability », *Experimental Brain Research*, Vol. 99, n°1, p. 97–111.
- HARRIS C. M., et WOLPERT D. M., 1998, « Signal-dependent noise determines motor planning », *Nature*, Vol. 394, n°6695, p. 780–784.
- HERBORT O., et BUTZ M. V., 2007, « Encoding Complete Body Models Enables Task Dependent Optimal Behavior », dans *International Joint Conference on Neural Networks, 2007. IJCNN 2007*, IEEE, 2007. p. 1639–1644.
- JEANNEROD M., 1984, « The timing of natural prehension movements », *J Mot Behav*, Vol. 16, n°3, p. 235–254.
- KAWATO M., 1999, « Internal models for motor control and trajectory planning », *Current opinion in neurobiology*, Vol. 9, n°6,

- p. 718–727.
- KLATZKY R. L., FIKES T. G., et PELLEGRINO J. W., 1995, « Planning for hand shape and arm transport when reaching for objects », *Acta Psychologica*, Vol. 88, n°3, p. 209-232.
 - LACKNER J. R., et DIZIO P., 1994, « Rapid adaptation to Coriolis force perturbations of arm trajectory », *Journal of neurophysiology*, Vol. 72, n°1, p. 299–313.
 - MCINTYRE J., STRATTA F., et LACQUANITI F., 1997, « Viewer-Centered Frame of Reference for Pointing to Memorized Targets in Three-Dimensional Space », *J Neurophysiol*, Vol. 78, n°3, p. 1601-1618.
 - RAND M. K., ALBERTS J., STELMACH G. E., et BLOEDEL J., 1997, « The influence of movement segment difficulty on movements with two-stroke sequence », *Experimental brain research*, Vol. 115, n°1, p. 137–146.
 - ROSENBAUM D. A., HINDORFF V., et MUNRO E. M., 1987, « Scheduling and programming of rapid finger sequences: Tests and elaborations of the hierarchical editor model. », *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 13, n°2, p. 193.
 - ROSSETTI Y., STELMACH G., DESMURGET M., PRABLANC C., et JEANNEROD M., 1994, « The effect of viewing the static hand prior to movement onset on pointing kinematics and variability », *Experimental Brain Research*, Vol. 101, n°2, p. 323-330.
 - SHADMEHR R., et MUSSA-IVALDI F. A., 1994, « Adaptive representation of dynamics during learning of a motor task », *The Journal of Neuroscience*, Vol. 14, n°5, p. 3208–3224.
 - VINDRAS P., et VIVIANI P., 1998, « Frames of reference and control parameters in visuomanual pointing », *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, Vol. 24, n°2, p. 569-591.
 - WING A. M., TURTON A., et FRASER C., 1986, « Grasp size and accuracy of approach in reaching », *J Mot Behav*, Vol. 18, n°3, p. 245-260.
 - WON J., et HOGAN N., 1995, « Stability properties of human reaching movements », *Experimental Brain Research*, Vol. 107, n°1, p. 125-136.