

Chapitre 4

Anticipation et capture d'objet

IV. Étude de l'anticipation dans une tâche où l'objectif à atteindre vient vers le sujet : l'attraper

Nous nous sommes intéressés jusqu'à présent à l'étude de l'anticipation dans le cadre de la navigation, c'est-à-dire lorsque le sujet se déplace vers une cible.

Le chapitre que nous allons aborder maintenant, va traiter d'un autre aspect de l'étude de l'anticipation, à savoir l'attraper ou la capture d'objet, c'est-à-dire des tâches où la cible se déplace vers le sujet. On peut évidemment envisager un troisième cas où à la fois le sujet et la cible seraient en mouvement l'un par rapport à l'autre (comme dans certains jeux de balle). Mais, notre cadre d'étude restera centré sur le second cas.

Avant de décrire les résultats de nos expériences de capture d'objet en chute libre. Nous allons passer en revue certains aspects théoriques et d'autres plus spécifiques à l'anticipation concernant le contrôle moteur impliqué dans cette tâche. Nous partirons d'une situation simple en y ajoutant progressivement certaines variables dont nous avons tenu compte dans nos protocoles. Nous verrons ainsi comment l'introduction de conditions initiales différentes est susceptible de nous aider dans notre compréhension des mécanismes de contrôle sous-jacents. Cela nous permettra également de resituer nos protocoles dans le cadre plus général de la capture d'objet en chute libre.

Nous pourrons alors présenter les expériences où les sujets ont attrapé un objet avec ou sans mouvement de la main.

IV.1. Cadres d'étude pour attraper un objet en mouvement

Dans la capture d'objet, le sujet doit résoudre un problème qui peut se résumer en trois mots : « Quoi-Où-Quand ».

Cette triple interrogation permet, en quelque sorte, de dresser une chronologie des phases qui se déroulent généralement lorsque l'on désire attraper un objet de façon successive ou en parallèle : d'abord, nous commençons par détecter son mouvement, puis nous estimons sa vitesse et sa direction, enfin nous évaluons ces caractéristiques dynamiques afin de gérer au mieux l'impact entre cet objet et la main (et la perturbation posturale concomitante) dont on a estimé le moment.

IV.1.1. Quoi-Où-Quand

Le « quoi » concerne l'identification de l'objet et de ses caractéristiques tant extrinsèques (trajectoire, vitesse, etc.) que intrinsèques (masse, quantité de mouvement, etc.). Nous avons vu précédemment que le SNC faisait des hypothèses sur un objet avec lequel il va interagir avant même d'entrer en contact avec lui : il peut estimer son poids à partir des informations visuelles et des souvenirs qu'il a de cet objet (Flanagan *et al.*, 2001; Flanagan & Wing, 1997; Gordon *et al.*, 1991a, 1991b, 1991c, 1992, 1993; Jenmalm & Johansson, 1997; Johansson & Westling, 1988; Witney *et al.*, 2001). En répondant à la question du « quoi », le SNC va pouvoir anticiper les effets liés à la saisie ou à la manipulation de l'objet. Il provoquera par exemple un ajustement de la raideur musculaire du bras et de la force de pression des doigts pour attraper l'objet dans les meilleures conditions (on amortira différemment une boule de pétanque et une balle en mousse) que l'objet tombe directement dans la main ou non (Bennis *et al.*, 1996; Johansson & Westling, 1988; Lacquaniti & Maioli, 1989a).

Le « où » se rapporte à la localisation de l'objet, l'estimation de la distance de celui-ci par rapport à notre corps ou par rapport à un endroit où l'on souhaite l'attraper. Il nécessite une connaissance préalable des dimensions de nos propres segments corporels (fournie par le schéma corporel comme nous l'avons précédemment mentionné) et une capacité à évaluer les distances de façon visuelle. Ces dernières peuvent être données par des informations bi-oculaires (Bennett *et al.*, 1999; Bennett *et al.*, 2000; Coull *et al.*, 2000; Lenoir *et al.*, 1999a; Regan, 1997; Tresilian, 1993; van der Kamp *et al.*, 1999). À partir de ces deux informations, on peut savoir si oui ou non

nous pouvons attraper un objet qui vient vers nous et/ou va passer à proximité de nous. Le problème majeur qui se pose ici est de passer d'une information rétinienne plane (2D) à un mouvement du bras vers l'objet (3D).

À cela s'ajoute les problèmes liés aux mouvements de l'objet. Ces mouvements rendent la tâche plus complexe à réaliser car ils introduisent la dimension temporelle du « quand ». Nous rejoignons ici la problématique exposée plus haut concernant t_c et sur laquelle nous allons revenir plus loin en ce qui concerne le temps dont on dispose pour la réalisation d'un mouvement (fenêtre temporelle).

Des travaux réalisés avec des spécialistes de sport de balle (Bootsma & van Wieringen, 1990; McLeod, 1987; Regan, 1997) ont montré que ces sportifs pouvaient estimer t_c d'une balle en approche en ± 2 à 3 ms et une précision angulaire de ± 0.1 à 0.2 deg. En conséquence, les sujets experts sont capables d'une très grande exactitude dans leur estimation des paramètres extrinsèques de l'objet à attraper.

Chez un non spécialiste, tout ce qui peut faciliter la tâche du SNC est utilisé. Par exemple, le fait d'avoir en permanence une référence extérieure comme la gravité, et la direction verticale qui lui est associée, pourrait aider à détecter la trajectoire d'un objet que l'on nous lance. Les lois du mouvement dans un champ gravitationnel nous apprennent qu'à conditions initiales identiques, la trajectoire sera toujours la même. De même, les paramètres cinématiques des objets en chute libre étant toujours les mêmes quelle que soit leur masse, il est fort probable que le SNC ait assimilé cette constante au cours du développement. Cela pourrait être fait sous la forme d'un modèle interne des effets de la force gravitationnelle et/ou de la direction de ces effets (Freyd *et al.*, 1988; Hubbard, 1990, 1995; Shiffrar & Shepard, 1991). L'omniprésence de cette force d'attraction pourrait donc permettre au SNC de prédire le mouvement d'une balle. Il existe déjà certaines preuves de sa prise en compte dans la planification de nos mouvements segmentaires (Breniere *et al.*, 1981; Breniere & Do, 1986; Papaxanthis *et al.*, 1998a; Papaxanthis *et al.*, 1998b; Papaxanthis *et al.*, 1998c; Papaxanthis & Pozzo, 1996; Pozzo *et al.*, 1998; Savelsbergh & van der Kamp, 1994; Virji-Babul *et al.*, 1994).

Il semble que les premiers stades du traitement des informations visuelles soient influencés par les récepteurs sensibles à la gravité (Lipshits & McIntyre, 1999; Marendaz *et al.*, 1993; McIntyre *et al.*, 2001). Ils peuvent être rapprochés de ceux obtenus par Krauzlis et Adler (2001) qui ont montré que certains facteurs cognitifs, comme le fait de s'attendre à ce qu'un objet se déplace dans telle ou telle direction (ce qui est le cas par exemple dans la chute libre), pouvaient

modifier l'activité des détecteurs visuels du mouvement impliqués tant dans les systèmes oculomoteurs que perceptifs. Cela permettrait une coordination de ces deux systèmes avant que ne commence le mouvement. Mis ensembles, ces résultats suggèrent que le fait de savoir *à l'avance* qu'un objet va se déplacer dans une certaine direction (ou avec une certaine forme de trajectoire) avec une certaine vitesse et une certaine accélération, faciliterait le traitement de ces informations. Concernant ce point, les lois de Newton nous apprennent que les composantes du mouvement d'un objet ne sont pas équivalentes. La composante horizontale se caractérise par un déplacement à vitesse constante (accélération nulle) alors que le déplacement se fait à vitesse croissante/décroissante (accélération/décélération constante) selon la direction du mouvement par rapport à la verticale. Cette action différente de la force de gravité, en fonction de la direction du mouvement de l'objet, pourrait avoir des effets sur la façon de gérer les informations visuelles dans la capture d'objet.

IV.1.2. Contraintes liées au mouvement de l'objet

Considérons la figure suivante où sont illustrées trois situations simples.

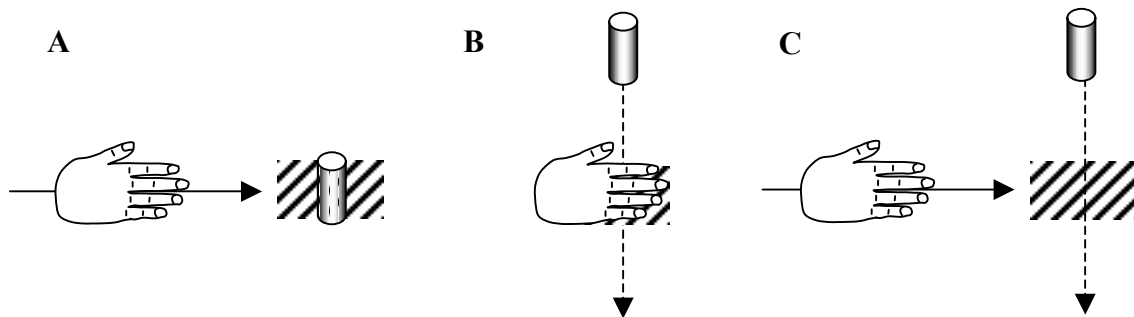


Figure IV-1 : Concept de marge d'erreur dans une tâche d'attraper. Le cylindre représente l'objet à saisir. Le rectangle hachuré représente la zone de capture. La flèche en trait plein le déplacement de la main et la flèche en tirets le déplacement de l'objet.

- En (A), l'objet (un cylindre) étant immobile dans la zone de saisie (zone hachurée), aucune contrainte temporelle ne vient compliquer la tâche. La contrainte est essentiellement spatiale et relève du déplacement de la main sur une certaine distance tout en contrôlant l'orientation de la main dans l'espace et de l'ouverture des doigts par rapport à la position et la forme de l'objet. Le sujet a tout son temps pour transporter et positionner sa main correctement avant de prendre l'objet; la **fenêtre temporelle** pour

réaliser la tâche est **infinie**. Cette première situation a été étudiée de façon approfondie par bons nombres d'auteurs (Jeannerod, 1988) et n'entre pas dans le cadre de notre étude.

- En (B), l'objet est en mouvement vers la zone de saisie mais la main est immobile. Les contraintes sont alors essentiellement temporelles puisqu'il s'agit ici de synchroniser la fermeture de la main avec le moment où l'objet entre en contact avec celle-ci. La **fenêtre temporelle** va être fonction de la **vitesse de l'objet**. La tâche peut être grandement facilitée si la paume de la main est placée perpendiculairement à la trajectoire de l'objet. Ce type de paradigme a été utilisé tant pour le mouvement horizontal à vitesse constante (Savelsbergh *et al.*, 1992, 1993), que pour le mouvement vertical à accélération constante (Lacquaniti & Maioli, 1989a, 1989b).
- En (C), l'objet et la main sont en mouvement vers la zone de saisie connue à l'avance. Les contraintes sont spatiales (une dimension) et temporelles. La fenêtre temporelle est alors fonction à la fois de la **vitesse de la main** et la **vitesse de l'objet**. Le problème ici est de mettre la main au bon endroit et au bon moment. Ce paradigme est une situation mixte mêlant les deux précédentes et utilisée par certains auteurs pour étudier les mouvements d'interception (Bootsma & Oudejans, 1993; Fayt *et al.*, 1997; Montagne *et al.*, 1999; Peper *et al.*, 1994).

Dans les deux dernières situations, la vitesse de l'objet va déterminer le temps passé dans la zone de saisie (fenêtre temporelle) et, par voie de conséquence, la **marge d'erreur** (délai à l'intérieur de la fenêtre temporelle) dont dispose le SNC pour déclencher et/ou synchroniser le mouvement de saisie. Plus elle sera élevée, moins l'on aura de temps pour attraper l'objet. De même, la largeur de la zone de saisie va avoir son importance : plus elle sera petite, plus la fenêtre temporelle et la marge d'erreur diminueront. Par conséquent, si l'objet est accéléré, il sera plus difficile à capturer car le sujet aura moins de temps pour déclencher son mouvement une fois que l'objet sera entré dans la zone de saisie.

IV.1.3. Contraintes liées à la main

Toujours en considérant les deux dernières situations, si l'on se place du point de vue de la main, le principal problème est de fermer la main au bon moment. L'**orientation de la main** va avoir ici un rôle important, d'autant que le mouvement contraint n'est pas équivalent au mouvement non contraint (Desmurget *et al.*, 1997) et implique de la part du SNC l'utilisation de stratégies différentes dans les tâches de préhension.

Par exemple, on peut choisir d'attraper l'objet en mettant la main en supination, paume perpendiculaire à la trajectoire (Bennett *et al.*, 1994; Lacquaniti & Maioli, 1989a, 1989b). On peut tout aussi bien l'attraper entre le pouce et l'index (Johansson & Westling, 1988; Westling & Johansson, 1984), ou entre les deux mains (les paumes se faisant face). On peut encore décider de suivre le mouvement de l'objet ce qui nécessite un mouvement du membre supérieur voire du corps entier selon les conditions initiales.

Dans le premier cas, il faudra synchroniser la fermeture de la main avec le moment de l'impact de l'objet dans la paume. Compte tenu des délais visuo-moteurs, estimés au minimum à 100 ms (Bootsma & van Wieringen, 1990; Carlton, 1981; Lee *et al.*, 1983), le sujet ne peut déclencher la fermeture selon un mode purement réactif, même si l'on considère que ce délai peut être réduit par la préparation du sujet avant que l'objet ne soit mis en mouvement (voir au chapitre II les travaux de Evarts et coll.). Dans ces circonstances, le sujet préfère, anticiper l'impact et initier le mouvement avant le moment du contact afin d'augmenter les chances de réussite. Ainsi, il déclenche une co-contraction des muscles du bras et de l'avant-bras non seulement pour préparer l'attraper, mais aussi pour réduire au maximum la perturbation posturale liée à l'impact. En régulant l'impédance (raideur) du bras en fonction de la vitesse finale, il évite ainsi qu'un rebond ou qu'un choc trop important n'empêche l'attraper (Lacquaniti & Maioli, 1989a).

Dans le second ou le troisième cas, il va falloir fermer la pince ou les deux paumes de mains l'une contre l'autre au bon moment. La distance entre le pouce et les doigts ou entre les deux mains est un paramètre pouvant influencer la tâche puisqu'il introduit un délai supplémentaire dans le contrôle de la saisie. Plus cette distance est importante, plus la difficulté augmente. La distance entre l'objet et la zone de saisie ainsi que sa vitesse de déplacement sont des facteurs primordiaux car ils déterminent le temps dont va disposer le sujet pour l'attraper.

IV.1.4. Contraintes liées à l'interaction entre l'objet et la main

Compte tenu du nombre de paramètres pouvant co-varier dans les tâches d'attraper, il convient d'envisager d'autres possibilités dont l'objectif principal sera d'optimiser le contrôle du transport de la main en fonction des conditions dans lesquelles se déroule le mouvement de l'objet.

Prenons la situation illustrée par la **Figure IV-1C** en considérant que le mouvement de l'objet est vertical, et examinons deux possibilités : 1°) son déplacement se fait à **vitesse constante**, 2°) son déplacement se fait à **accélération constante** (comme c'est le cas dans la chute libre) (**Figure IV-2**).

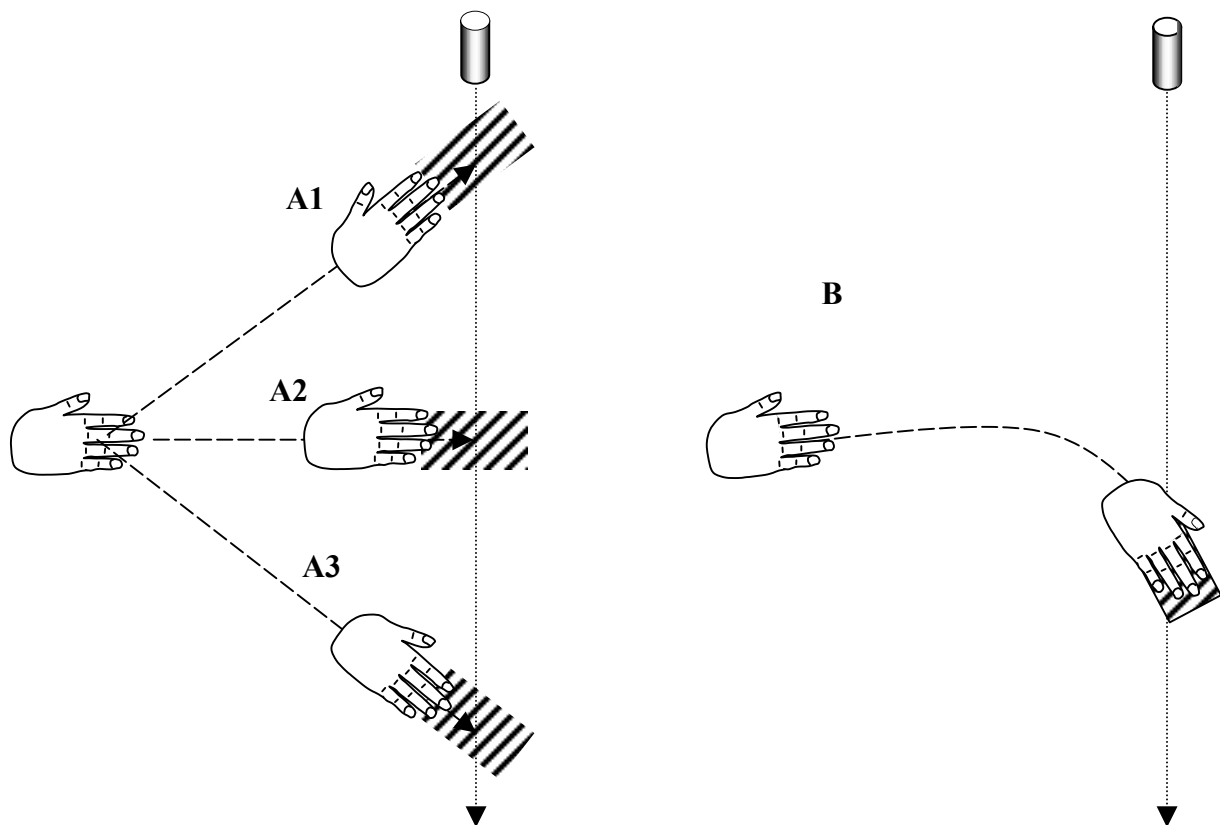


Figure IV-2 : Stratégies possibles dans la capture d'un objet en chute libre en fonction des contraintes cinématiques et dynamiques liées au système main-objet (gestion des mouvements relatifs et gestion de l'impact). **Stratégie A** : mouvement rectiligne de la main vers le haut (A1), l'horizontale (A2) ou vers le bas (A3) selon que le sujet veut attraper l'objet à la vitesse la plus faible, à la plus courte distance par rapport à lui ou disposer d'un temps plus long pour faire son transport de la main vers la zone de saisie (zone hachurée d'une taille correspondant à la largeur de la paume). **Stratégie B** : Le sujet peut faire un mouvement curviligne qui, dans la première partie de la trajectoire, permet de rapprocher la main de la trajectoire, puis, dans la seconde partie, permet d'orienter la main dans le sens déplacement de l'objet afin de diminuer la différence relative entre la vitesse de la main et celle de l'objet.

Lors d'un déplacement à vitesse constante, il est préférable de capturer l'objet au moment où il se trouve le moins loin de la main (i.e. à la perpendiculaire de la trajectoire de l'objet ; position A2 de la **Figure IV-2**). La tâche consiste simplement à mettre la main à cet endroit, soit en synchronisant l'arrivée de la main dans cette zone avec celle de l'objet (Bootsma & Oudejans, 1993; Montagne *et al.*, 1999; Peper *et al.*, 1994), soit en y arrivant un peu avant (situation similaire à celle décrite dans la **Figure IV-2B**). Il s'agit d'un problème impliquant une seule dimension spatiale au niveau du transport de la main, puisque la zone de saisie est connue à l'avance (le sujet n'a à faire qu'un mouvement vers l'avant), et une dimension temporelle relative (*) à la synchronisation de l'arrivée de la main et de l'objet dans cette zone ou, (**) à l'arrivée à l'avance de la main par rapport à l'objet pour gérer « isolément » transport et saisie et augmenter les chances de réussite de la tâche.

Pendant une chute libre, le sujet est confronté à un tout autre problème : plus il attend pour attraper l'objet, plus celui-ci sera accéléré par la gravité, plus la fenêtre temporelle et la marge d'erreur pour une zone de saisie donnée diminueront. En supposant que le sujet déplace sa main en ligne droite, quelles stratégies peut-il utiliser pour attraper l'objet dans les meilleures conditions, en tenant compte des contraintes liées aux déplacements de la main et de l'objet (**cinématiques**), ainsi que celles liées à l'impact au moment de l'attraper (**dynamiques**) ?

IV.1.4.1. Contraintes cinématiques

Le sujet peut privilégier l'aspect cinématique et attraper l'objet après le moment du lâcher, c'est-à-dire à un moment où **sa vitesse est encore faible (Figure IV-2A1)**. Il devra alors déplacer sa main d'autant plus rapidement vers cette position qu'il veut le prendre à une vitesse la plus petite possible. Les limites sont alors morphologiques (longueur de bras par rapport à la hauteur de lâcher) et motrices (vitesse maximale que le sujet peut atteindre lors du transport de sa main en conservant des chances de l'attraper).

Il peut vouloir **minimiser le transport** de la main et attraper l'objet à une distance la plus courte possible. Celle-ci correspond à celle située à la perpendiculaire à la trajectoire de l'objet en direction du sujet, comme illustré dans la **Figure IV-2A2**. La vitesse de l'objet sera alors plus élevée mais le sujet disposera d'un peu plus de temps pour transporter sa main vers la zone de saisie et réalisera son mouvement dans des conditions moins contraignantes au niveau cinématique.

Enfin, il peut enfin donner la priorité au **temps de transport** et diriger la main vers le bas (**Figure IV-2A3**). Cela lui permet de disposer de plus de temps que dans les deux premiers cas pour déplacer sa main à l'endroit de capture mais, en contre partie, l'objet tombe encore plus vite. La synchronisation de la saisie avec le passage de l'objet sera donc (plus) difficile à gérer.

IV.1.4.2. Aspect dynamique

Observons d'abord ce qui se passe au niveau des composantes de vitesse de la main dans ces trois situations. On s'aperçoit que, pendant un transport de la main au-dessus de l'horizontale, la composante verticale de la main est de sens opposé de celle de l'objet, alors que pour un mouvement dirigé vers le bas, elle est de même sens.

Si l'on considère que le mouvement de la main est linéaire, la norme de la vitesse verticale de la main est nulle pour un transport fait à l'horizontale alors qu'elle augmente progressivement à mesure que la direction de la main s'écarte de l'horizontale pour atteindre un maximum si la main suit une trajectoire uniquement verticale (ce qui n'est pas notre cas).

Or, pour diminuer au maximum la force d'impact et la perturbation de l'objet sur la main, l'idéal serait que la vitesse relative soit nulle ($V_{\text{Main}} - V_{\text{Barre}} = 0$). En d'autres termes, il faudrait que les vitesses verticales et/ou tangentielles de la main et de l'objet soient égales. Cela revient alors à faire une saisie similaire à celle que l'on ferait si l'objet était immobile, posé sur une table (**Figure IV-1A**). Ainsi, on supprime toute contrainte temporelle en réduisant le nombre de degrés de liberté à gérer en même temps au cours de la tâche d'attraper.

IV.1.4.3. Un compromis

Une stratégie intermédiaire serait de diminuer les contraintes tant cinétiques que dynamiques en réalisant simultanément 1°) un mouvement en direction d'une position où l'objet à une vitesse faible et 2°) un mouvement permettant de diminuer la vitesse relative et réaliser la saisie dans les meilleures conditions (vitesse relative et impact faibles). La résultante cinématique de ces deux mouvements serait une trajectoire curviligne de la main d'abord dirigée vers le haut puis vers le bas.

IV.2. Matériels et Méthodes

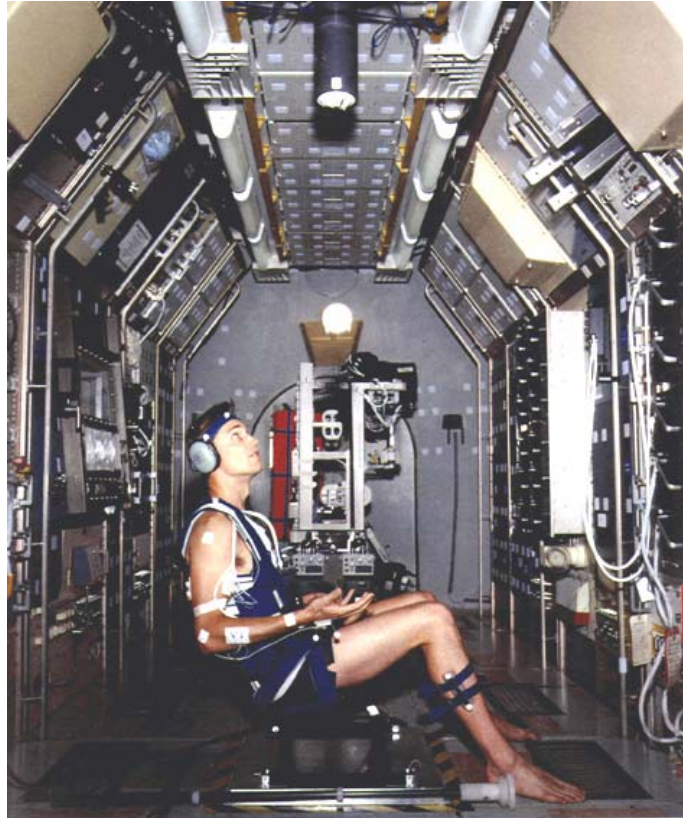
Les expériences qui vont être maintenant présentées, ont été réalisées avec le KINELITE® (**Figure IV-3A**), système de reconstruction du mouvement en 3D élaboré par le Centre National d'Études Spatiales (CNES), en collaboration avec MATRA®, pour la mission NEUROLAB (vol STS 90 de la navette spatiale américaine qui s'est déroulé du 17 avril au 3 mai 1998, entièrement consacré à l'étude du SNC dans l'espace). Les données recueillies devaient servir à compléter celles obtenues en normo-gravité avec les astronautes au cours des sessions pré-vol.

Ce système comprenait 4 caméras laser infrarouge permettant d'enregistrer la position de marqueurs passifs de forme sphérique. La fréquence d'échantillonnage était de 200 Hz. L'enregistrement des données cinématiques était couplé à un système de recueil des activités électromyographiques (EMG) à une fréquence de 800 Hz. Trois des canaux étaient dédiés aux signaux issus d'un accéléromètre fonctionnant à la même fréquence. Ce dernier a été utilisé pour identifier le moment de l'impact avec une grande précision. L'activité EMG a été redressée et numériquement filtrée à l'aide d'un filtre Butterworth de second ordre (fréquence de coupure de 80 Hz) appliqué deux fois afin d'éviter les déphasages temporelles (Wood, 1982). L'enregistrement EMG a été réalisé sur le muscle *biceps brachii* (BICEPS) compte tenu de l'amplitude de ses réponses anticipées.

Une synchronisation de toutes les données était obtenue par un bouton poussoir dont la pression permettait au sujet de libérer le ressort du lanceur qui projetait une balle en Silicon® ($\varnothing = 9\text{cm}$; 400 g). Plusieurs délais aléatoires ont été introduits dans cette procédure pour ne donner aucun indice temporel aux sujets concernant le moment de sortie de la balle.

La **Figure IV-3B** récapitule l'ensemble des événements du protocole utilisé avec le KINELITE®, et permet d'identifier les différents délais aléatoires introduits durant la séquence d'enregistrement ainsi que les phases d'attente durant lesquelles la balle est chargée dans le lanceur puis éjectée vers la main du sujet.

A)



B)

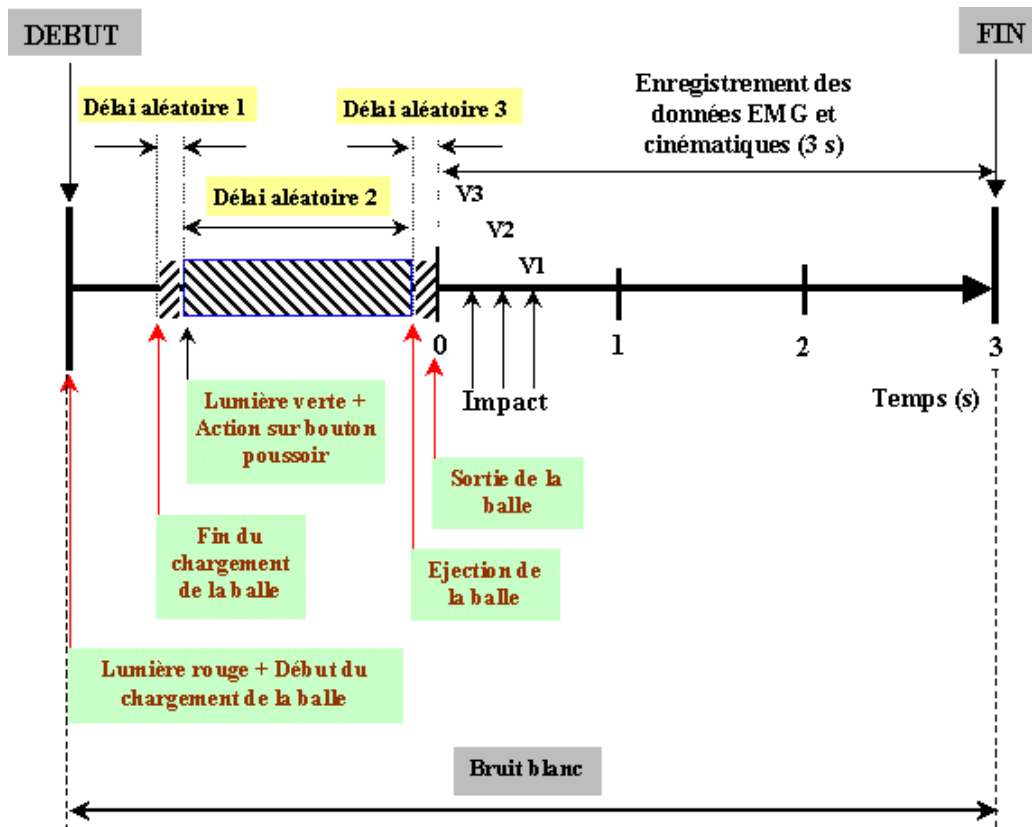


Figure IV-3 : Série des événements constituant le protocole expérimental utilisant le système d'acquisition de données électromyographiques et cinématiques, KINELITE®.

Les délais aléatoires (zone hachurée) étaient variables. Le premier faisait entre 0 et 100 ms ; le second entre 100 et 900 ms ; le troisième variait en fonction de la vitesse initiale (plus celle-ci est élevée, plus ce délai était court). Après le moment de l'éjection, la balle frappait la main à un instant d'autant plus tôt que la vitesse est élevée (V_3, V_2 et V_1 sur l'axe horizontal). La durée de l'enregistrement était la même pour tous les essais (3 s). Le KINELITE® générait un bruit blanc pendant toute la durée de l'essai, et l'interrompait entre chaque essai.

Pour les différents tests statistiques utilisés, une valeur de p inférieure à 0.05 était considérée comme significative.

IV.3. Expérience 4 : Attraper d'un objet en chute libre sans déplacement de la main

Nous avons commencé par étudier l'attraper dans une situation similaire à celle de la **Figure IV-4**. Elle correspond au protocole utilisé par Lacquaniti et Maioli (1989a). Ils ont demandé aux sujets d'attraper une balle lâchée à différentes hauteurs que le sujet pouvait voir avant chaque lancer. La main, en position de supination, était placée paume perpendiculaire à la trajectoire de chute. Les essais étaient réalisés en bloc.

Les deux résultats principaux (**Figure IV-4**) étaient que : 1°) les sujets activaient systématiquement les muscles fléchisseurs du coude (principalement le biceps) environ 100 ms avant l'impact ; et 2°) l'activité musculaire du biceps (mesurée 50 ms avant l'impact) était proportionnelle (relation linéaire) à la quantité de mouvement de la balle au moment de l'impact.

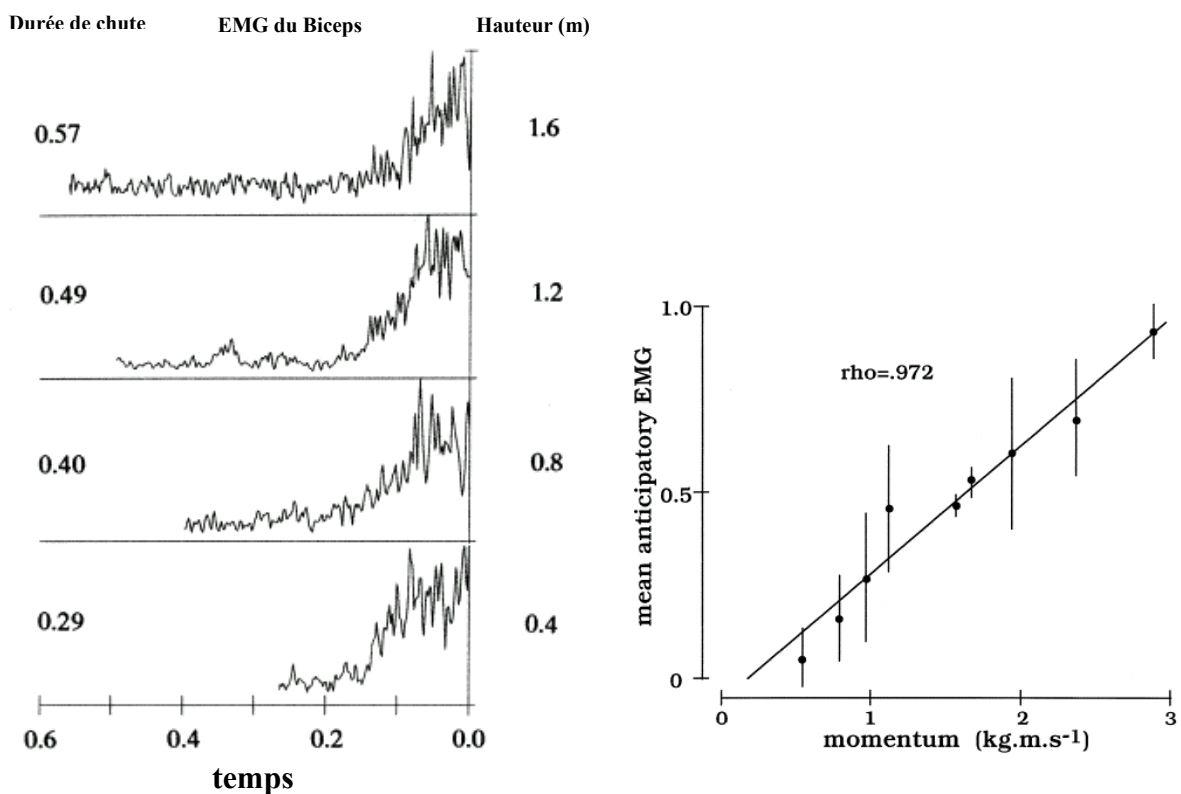


Figure IV-4. Données recueillies par Lacquaniti et Maioli (1989a) dans l'attraper de balle en chute libre. A gauche l'enregistrement EMG du *biceps brachii*. A droite la relation entre quantité d'EMG moyenne mesurée sur les 50 ms précédant l'impact.

Comme nous l'avons déjà rapporté dans le chapitre II, les réponses motrices pouvaient être synchronisées sur une estimation précise du t_c réel, à partir de l'estimation directe de la hauteur du lâcher. Celle-ci correspond à l'estimation de la distance entre la position de la balle et la main du sujet. Mais le sujet pouvait aussi utiliser une forme de chronométrie mentale pour déclencher l'activation musculaire puisque les essais ont été réalisés en bloc. Enfin, le sujet pouvait tout aussi bien faire appel à des informations cognitives pour réaliser cette tâche puisque l'on sait par expérience que plus un objet tombe de haut (connaissance *a priori* de la hauteur de lâcher), plus sa vitesse finale (et la force d'impact) est importante (connaissance *a priori* des effets de la gravité sur les objets en chute libre).

Nous nous sommes inspirés du protocole de Lacquaniti et Maioli pour construire notre protocole avec le KINELITE® et voir quel était l'effet de la suppression de certaines informations disponibles avant le lâcher (hauteur initiale de la balle) tout en conservant trois quantités de mouvement distinctes (en modulant les vitesses initiales).

IV.3.1. Présentation de la première expérience

IV.3.1.1. Protocole

Six étudiants en STAPS¹⁵ naïfs (4 hommes et 2 femmes ; 24 ± 3 ans ; sans problèmes visuels ou neurologiques) ont participé à l'expérience. Ils devaient attraper la balle lancée par le lanceur du KINELITE® vers la paume de leur main droite tournée vers le haut, et placée sur la trajectoire de la chute, coude fléchi à 90° environ.

Chaque sujet a fait 2 sessions : la première avec présentation des vitesses aléatoirement (ALEA) et la seconde avec présentation des vitesses en bloc (BLOC), avec 10 essais (ESSAI) par vitesse (soit 30 essais par sessions). Les trois premières vitesses pour ALEA correspondaient à V1, V2 et V3 présentées au hasard. Le plan expérimental était : $S6 * [C2 * V3]$. Les trois vitesses finales étaient : 5.6, 5.9 et 6.3 m/s (respectivement V1, V2 et V3, correspondant à des vitesses initiales de 0.7, 1.7 et 2.7 m/s). Les temps de chute correspondant étaient respectivement de 500, 430 et 370 ms.

L'utilisation du système KINELITE® a permis d'éliminer l'effet lié à la hauteur de lâcher puisque le lanceur est placé à une hauteur fixe par rapport au sol (élimination de l'estimation de

¹⁵ Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives

la force d'impact en fonction de la hauteur de chute). Il a aussi permis et de s'affranchir d'un effet de présentation en bloc (temps de chute identique d'un essai à l'autre) grâce à une présentation des 3 vitesses de façon aléatoire (pas de chronométrie possible). De plus, des délais (eux-mêmes aléatoires) étant introduits à différents niveaux du protocole, les sujets ne pouvaient utiliser d'informations sur le moment du lâcher (signal de déclenchement des activités). Seules les informations visuelles relatives à la cinématique de la balle étaient disponibles.

IV.3.1.2. Analyse des données

L'analyse s'est déroulée en deux phases. Nous avons d'abord fait les statistiques pour mesurer l'effet ESSAI et quantifier la rapidité d'adaptation du SNC dans les différentes conditions et les différentes vitesses. Ensuite, suivant ainsi la méthodologie employée par Lacquaniti et Maioli, nous avons supprimé les 3 premiers essais de chaque vitesse, condition et muscle.

Dans les deux phases, les données ont été centrées et moyennées par rapport au moment de l'impact afin d'analyser les différentes réponses musculaires. La méthode utilisée pour dépouiller les données EMG était similaire à celle de Lacquaniti et Maioli concernant les activités EMG anticipées tardives : celles-ci commencent au moment où, partant à rebours du moment de l'impact jusqu'au début de l'enregistrement, l'activité EMG passe pour la première fois (et 4 fois consécutives) en-dessous de 25% de la valeur maximale atteinte avant l'impact. L'amplitude des réponses anticipées a été calculée à partir de la moyenne des 50 ms précédents l'impact (EMG50), et mise en correspondance avec les vitesses finales. Puisque la masse de la balle est constante, ces vitesses finales sont proportionnelles aux quantités de mouvement ($p = mv$). En effet, seules les variations de vitesse peuvent modifier ces quantités. Enfin, pour chaque sujet, les données ont été normalisées sur le maximum des valeurs EMG50, toute condition et vitesse confondues.

Un exemple de tracé de l'activité MEG du *biceps brachii* est donné par la **Figure IV-5**.

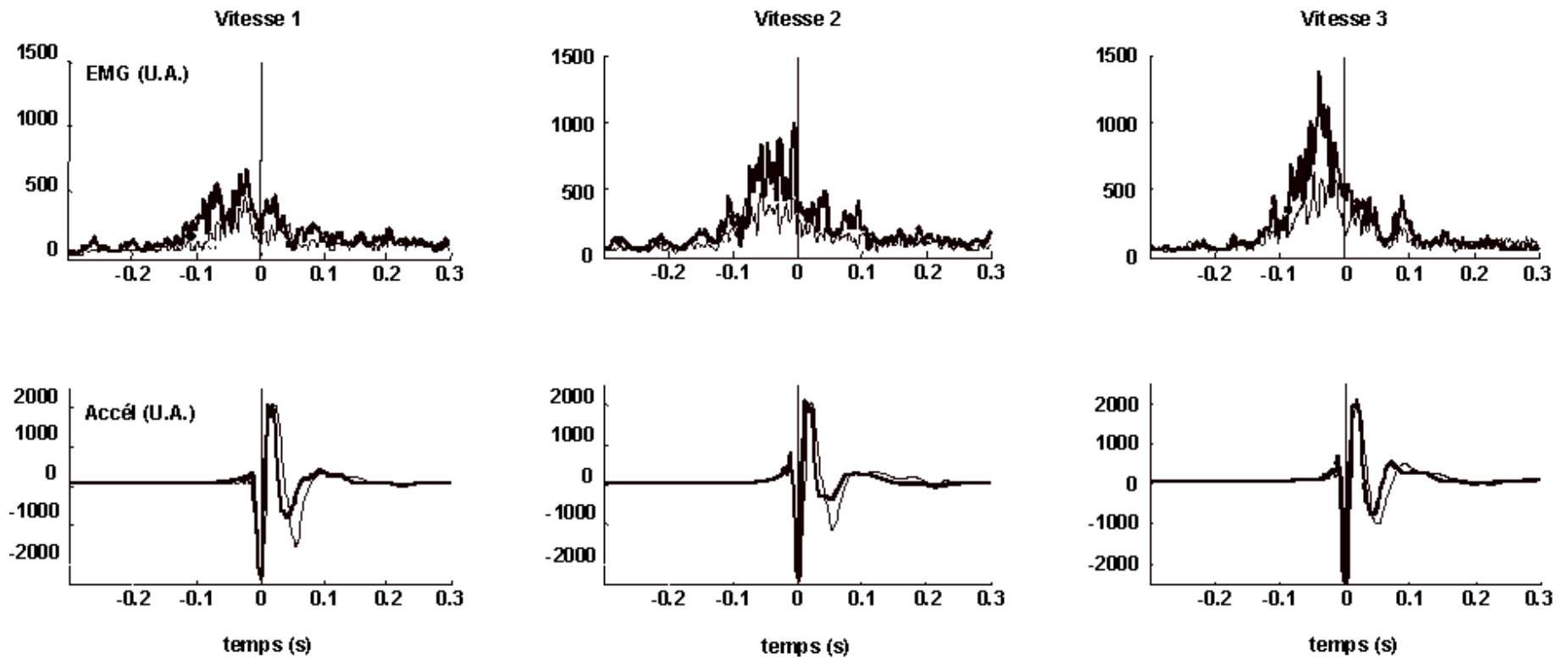


Figure IV-5 : Exemple de tracés de l'activité EMG brute. L'activité du muscle *biceps brachii* (ligne du haut) est donnée pour chacune des trois vitesses initiales (Vitesse la plus faible à la plus élevée respectivement de gauche à droite). Le tracé de l'accéléromètre (ligne du bas) permet de dater de façon précise le moment de l'impact de la balle dans la main. Le trait épais correspond à la condition [ALEA] et le trait fin à la condition [BLOC]. (U.A. = unités arbitraires)

IV.3.2. Résultats et discussion

Les effets significatifs de l'AVOVA (avec mesures répétées) réalisée sur les données du BICEPS sont résumés dans le **Tableau IV-1**.

Tableau IV-1 : Récapitulatif de tous les effets significatifs mesurés pour le biceps

<i>EFFETS</i>	<i>DDL</i>	<i>Valeur de F</i>	<i>Valeur de p</i>	<i>Niveau de p</i>
Session (S)	F(1,5)	20.05	p < 0.01	**
Vitesse (V)	F(2,10)	206.92	p < 0.001	***
Essai (E)	F(9,45)	7.29	p < 0.001	***
S x E	F(2,10)	4.59	p = 0.04	*

(* = p<0.05 ; ** = p < 0.01 ; *** = p< 0.001)

IV.3.2.1. Analyse des influences de conditions et de vitesses

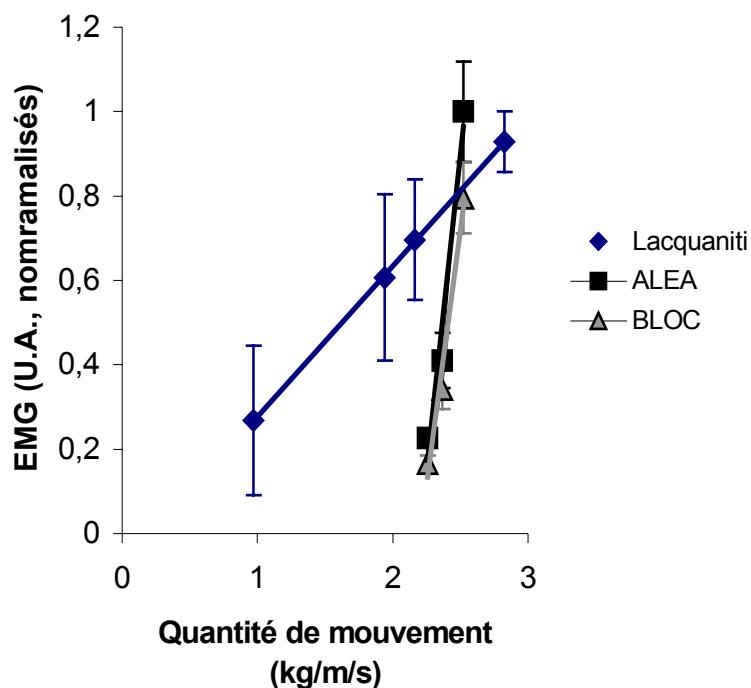


Figure IV-6 : Relation linéaire entre quantité de mouvement et EMG moyen (7 essais) mesurés sur les 50 ms précédant l'impact pour le *biceps brachii* ; les losanges correspondent aux valeurs obtenues par Lacquaniti et Maioli (1989) ; les carrés et triangles, nos propres données.

EMG50 est plus faible dans la condition BLOC que dans la condition ALEA (-30% en moyenne), mais cet effet est principalement dû aux différences d'intensité entre ces deux conditions pour la vitesse V3 (test post-hoc Newman-Keuls : $p < 0.05$). EMG50 augmente de façon linéaire avec la quantité de mouvement finale (V1 et V2 représentaient respectivement 21 et 41 % du maximum obtenu à V3) comme le montre la **Figure IV-6**. On notera la différence de pente entre nos données et celles recueillies par Lacquaniti et Maioli. Nous pensons qu'elle est imputable à l'absence de l'information *a priori* concernant la hauteur de lâcher de la balle. De même, il existait une différence entre les deux expériences au niveau de l'ajustement de l'intensité de l'EMG par rapport à la perturbation liée à l'impact (mesurée par la quantité de mouvement). En considérant que la droite en trait discontinu de la **Figure IV-6** correspond à l'intensité optimale de l'EMG par rapport à la perturbation liée à l'impact, nous pouvons considérer que nos sujets ont sous- ou surestimé cette perturbation même s'ils ont parfaitement réussi la tâche.

IV.3.2.2. Analyse de la rapidité d'adaptation du SNC aux différentes contraintes

En supprimant les essais (3 pour ALEA et 1 pour BLOC) correspond à la première présentation de chacune des trois vitesses de notre protocole, seuls les effets SESSION ($F_{1,5}=25.12$, $p=0.004$), VITESSE ($F_{2,10}=147.11$; $p < 0.001$) et leur interaction ($F_{2,10}=6.21$, $p=0.012$) persistent au niveau de EMG50 (**Figure IV-7**). L'essai où le sujet est soumis la première fois à une vitesse donnée, pour une condition donnée, était significativement différent des suivants (Test post-hoc Newman-Keuls ; $p < 0.001$).

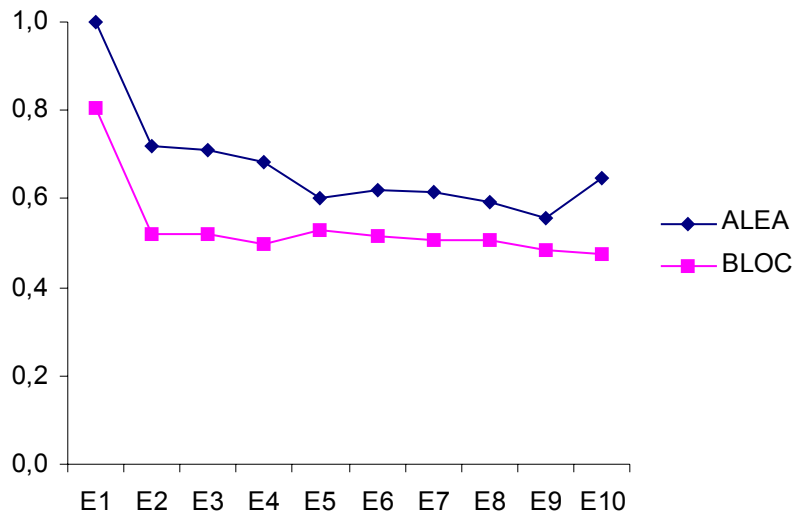


Figure IV-7 : Effet du paramètre ESSAI sur l'activité EMG anticipée. En moyenne, un essai suffit pour ajuster l'intensité de l'activité musculaire à la perturbation liée à l'impact de la balle dans la main. On notera la différence entre les intensités d'EMG entre les deux conditions : BLOC est en moyenne 30% inférieur à ALEA.

Une analyse plus fine permet de voir que l'effet ESSAI diffère en fonction de la condition et de la vitesse finale. La diminution d'activité EMG après la première présentation d'une vitesse donnée est plus marquée pour BLOC que pour ALEA (**Figure IV-8**). Elle prend entre 1 et 3 essais (ALEA-V2) suivant le type de session.

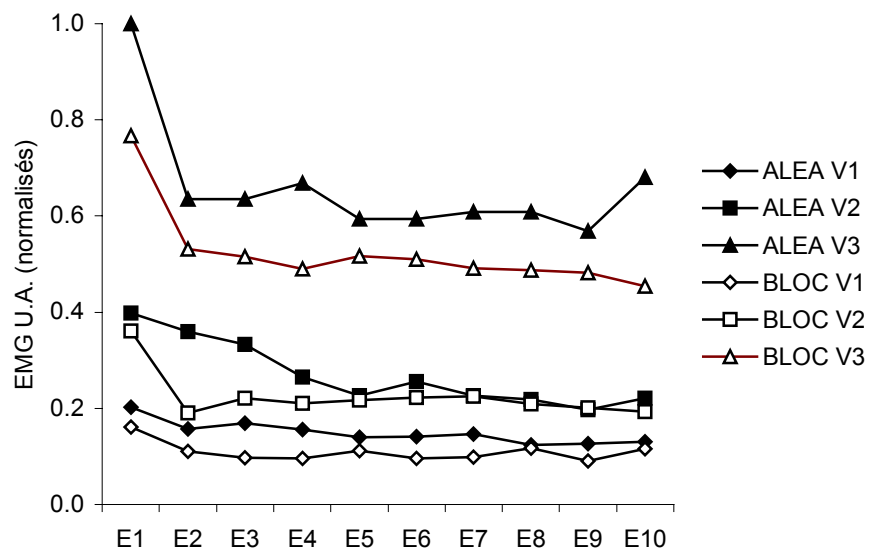


Figure IV-8 : Décomposition de l'effet ESSAI suivant les 3 vitesses initiales et les deux séquences de présentation des essais. L'activité EMG de ALEA est supérieure à celle BLOC. La diminution relative de l'EMG est plus marquée dès le second essai pour BLOC-V2, BLOC-V3 et ALEA-V3 que pour les autres conditions. Les activités EMG

de chaque sujet ont été normalisées par rapport au maximum d'activité EMG enregistré (V3).

IV.3.2.3. Analyse des délais d'initiation de l'activité EMG

Les délais d'anticipation des activités EMG sont comparables à ceux rapportés par Lacquaniti et Maioli comme le montre le tableau récapitulatif ci-dessous. Aucune différence significative n'a été trouvée (**Tableau IV-2**). **L'initiation de l'activité musculaire est donc indépendante de la hauteur (ou de la vitesse) de lâcher.**

Tableau IV-2. Délai d'initiation de l'activité EMG par rapport à l'impact.
Une valeur négative correspond à une activation avant l'impact.

	ALEA	BLOC
5.6	-102±12	-95±7
5.9	-97±10	-101±8
6.3	-96±8	-92±10

IV.3.2.4. Discussion

Ces différents résultats montrent que le SNC est capable de s'adapter très rapidement à la tâche proposée puisqu'un **maximum de trois essais** suffit à « calibrer » l'activité EMG. Le mouvement se faisant en chute libre, cette observation pourrait être le résultat de l'utilisation concomitante d'informations *a priori* des effets de la gravité sur la chute des corps (modèle interne de la force gravitationnelle), et d'informations obtenues directement pendant la réalisation de la tâche (vitesse initiale d'éjection). Une fois les trois vitesses identifiées (un essai suffit au SNC pour calibrer l'activité EMG — Lacquaniti, communication personnelle), le SNC utiliserait comme paramètre d'entrée la vitesse initiale pour avoir, grâce à son modèle interne, une estimation instantanée de la vitesse finale (ou de la quantité de mouvement) et donc de la

force d'impact à absorber (contrôle de la raideur musculaire). Rappelons que l'utilisation de la vitesse initiale seule entraînerait une sous-estimation de la vitesse finale puisque la balle subit une accélération.

Le SNC peut ainsi déclencher l'activité musculaire par anticipation (puisque le mode réactif s'avèrerait inefficace pour fermer les doigts sur la balle), et ce, quelle que soit la façon dont sont présentées les essais (ALEA vs. BLOC).

Nous avons trouvé une relation linéaire entre la quantité de mouvement et l'intensité de l'activité EMG moyennée sur les 50 ms précédant l'impact. Cependant, cette relation ne passe pas par l'origine. La suppression de l'information concernant la hauteur de lâcher pourrait être à l'origine de la différence entre les pentes des droites de régression de nos données (condition ALEA-BLOC) et de celle de Lacquaniti et Maioli.

Il est intéressant de noter que la présentation des vitesses en BLOC a entraîné une diminution de l'activité musculaire montrant, par là même, que le SNC peut optimiser le contrôle de l'activité EMG lorsque les informations relatives à la tâche sont plus **prévisibles** (apparition d'une régularité).

L'introduction d'une régularité permettrait un ajustement des paramètres d'entrée comme l'atteste la diminution des EMG de la condition BLOC. Ce résultat est très proche de celui rapporté par de Lussanet et coll. (2001). Ils ont montré que la vitesse de l'essai précédent avait une influence sur l'estimation de celle à venir ; les sujets faisaient une prédiction à partir de cette information stockée temporairement (information *a priori*), ce qui influençait les paramètres cinématiques du mouvement du sujet ainsi que ces performances au niveau précision dans leur tâche d'interception.

Les limites du KINELITE® ne nous ont pas permis d'explorer une aussi grande variation de quantité de mouvement que ne l'ont fait Lacquaniti et Maioli avec leur protocole ; les valeurs de vitesse finale que nous avons retenu ne concernent que la partie supérieure de la relation qu'ils ont mis en évidence. Néanmoins, la relation linéaire existant dans les deux expériences, nous pouvons confirmer que le SNC fait une estimation (plus ou moins juste) de la force d'impact à laquelle il doit faire face en utilisant soit la **quantité de mouvement**, soit la **vitesse finale** puisque la masse de la balle reste inchangée et que l'accélération de la gravité est, elle aussi, constante.

IV.3.3. Présentation de la seconde expérience

Afin de vérifier certaines de nos hypothèses concernant l'effet des conditions initiales sur le contrôle des activités EMG anticipées pour absorber la force d'impact de la balle dans la main, nous avons réalisé une seconde expérience dans laquelle les sujets attrapaient une balle de même masse dans deux conditions : avec ou sans vision de la partie initiale de la trajectoire.

Nous avons réalisé un montage comportant un tube amovible, fixé sur la structure du KINELITE® permettant de masquer ou non la première partie de la trajectoire. La base du tube était à la même hauteur que celle du lanceur afin d'avoir un point commun avec notre précédente expérience.

Six sujets naïfs (6 hommes ; 26 ± 3 ans) ont participé à cette nouvelle session. Ils devaient attraper une balle (3 hauteurs) suspendue à un fil passant par deux poulies à roulement à billes (permettant respectivement de placer l'expérimentateur derrière un rideau noir et de réduire au maximum les frottements). Ce dispositif a permis d'explorer l'effet de la connaissance *a priori* de la hauteur de lâcher sur la performance des sujets. La **Figure IV-9** résume les différences entre l'expérience réalisée avec le lanceur (LANCEUR) et la présente expérience (TUBE).

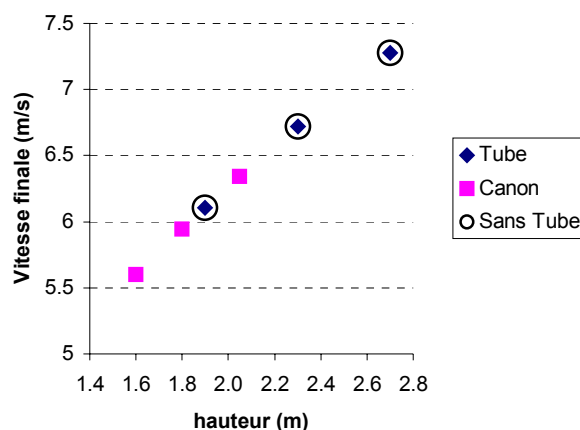


Figure IV-9 : Comparaison des conditions d'attraper entre l'expérience LANCEUR et l'expérience TUBE.

Les conditions d'enregistrement et le traitement des données EMG du *biceps brachii* étaient similaires à l'expérience LANCEUR. Les sujets devaient attraper la balle lâchée **aléatoirement** à des hauteurs (effet HAUT) de 1.9, 2.3 et 2.7 m (pour des vitesses finales

respectives de 6.3, 6.9 et 7.3 m/s) d'abord **avec le tube**, puis **sans le tube** (effet COND). Chaque sujet a réalisé 10 essais pour chacune des hauteurs.

IV.3.4. Résultats et discussion

Ces nouvelles conditions n'ont eu aucun effet significatif sur les délais d'initiation de l'activité anticipée du *biceps brachii*. L'initiation de l'activité musculaire est donc indépendante du fait que la hauteur de lâcher soit connue à l'avance ou non ($p > 0.05$).

Par contre, les effets COND, HAUT et leur interaction étaient significatifs (respectivement $F_{1,5}=72.02$, $p < 0.001$; $F_{2,10}=11.68$, $p=0.002$; $F_{2,10}=4.22$, $p=0.047$).

Cette nouvelle expérience a permis de montrer l'effet couplé de la connaissance a priori à la fois de la hauteur de lâcher et de la vitesse initiale sur le contrôle de l'activité EMG anticipée précédant l'impact. Cette double information semble beaucoup plus précise que la vitesse initiale seule pour une hauteur fixe, comme nous l'avons démontré avec l'expérience LANCEUR. Nous pourrions donc avancer l'hypothèse que l'utilisation conjointe de ces informations **cognitives** (informations *a priori* concernant la hauteur de lâcher et le fait que la direction du mouvement se fait dans le même sens que celui de l'effet de la gravité) **et visuelles** (vitesse mesurée par le système visuel) permet d'optimiser l'activité EMG précédant l'impact **de façon plus efficace** que par l'utilisation des seules informations visuelles (sans changement de hauteur initiale) issues du déplacement de l'objet en chute libre, grâce une estimation plus fine du t_c .

Compte tenu des résultats exposés ci-dessus, nous pouvons exprimer quelques réserves concernant l'affirmation de Savelsbergh et coll. (1992). Selon eux, puisque aucune évidence n'a été trouvée pour suggérer un possible processus cognitif de calcul du temps avant impact et un déclenchement d'activité musculaire anticipée à une distance constante entre la balle et la main ou un temps constant après que la balle ait quitté le lanceur, **seul un modèle basé sur une variable de type τ permet d'arriver à un tel niveau de contrôle de l'activité EMG précédant l'impact**. Leur conclusion s'appuie sur des résultats ayant été obtenus avec un matériel expérimental permettant de faire suivre à la balle une trajectoire horizontale quasi linéaire en fin de chute, sur la ligne de visée à vitesse constante ; la main étant positionnée en avant sur cette même ligne de visée. Il n'est donc pas étonnant que leurs données soient compatibles avec une régulation de l'activité EMG par rapport à τ puisqu'ils se sont mis dans des conditions idéales pour le montrer.

Nos résultats (ainsi que ceux de Lacquaniti et Maioli) ont été réalisés dans des conditions où 1°) la balle se déplace avec une vitesse non constante et 2°) la balle n'arrive pas sur la ligne de visée (elle passe en avant du sujet ; comme cela est souvent le cas dans les tâches d'attraper) ce qui peut représenter un certain avantage au niveau de l'estimation de t_c (Schiff & Oldak, 1990). Nous ne pouvons donc pas arriver aux mêmes conclusions concernant la primauté d'un mécanisme d'anticipation fondé sur une variable de type τ .

Avec les résultats collectés dans les expériences LANCEUR et TUBE, nous avons réuni certaines preuves permettant d'avancer que le SNC utilise des *informations a priori en plus des informations visuelles* pour réguler l'activité EMG précédant le moment de l'impact dans une tâche de capture de balle. Dans les conditions expérimentales qui sont les nôtres, nous pouvons émettre l'hypothèse que la vision serait principalement utilisée pour estimer la direction et la vitesse de la balle. Ces paramètres serviraient d'entrées à un modèle interne intégrant les effets de la force gravitationnelle (trajectoire parabolique, accélération vers le bas, etc.) sur les objets dont la fonction serait de donner ensuite une estimation **en temps réel** du vrai t_c et de la quantité de mouvement (donc de la vitesse finale) de l'objet au moment de l'impact.

L'idée que ce modèle interne possède plusieurs entrées vient du fait que la connaissance *a priori* de la hauteur de lâcher améliore les performances des sujets quant à cette estimation (la droite de régression quantité de mouvement vs. EMG possède une pente plus faible lorsque le sujet connaît l'avance la hauteur de lâcher ; ceci se manifeste par une meilleure optimisation de l'activité EMG par rapport à la force d'impact de la balle dans la main ; **Figure IV-10**).

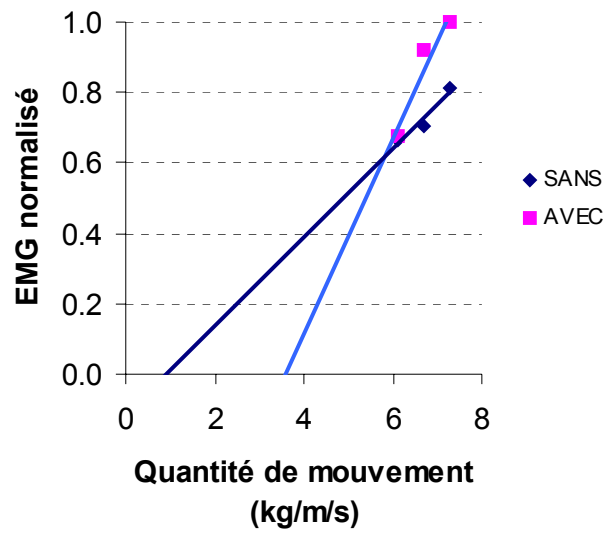


Figure IV-10 : Relation entre quantité de mouvement et EMG du biceps (6 sujets, 9 essais, 3 hauteurs) moyenné et normalisé sur 50 ms précédant l'impact. Les carrés correspondent à la condition avec tube et les losanges sans tube.

IV.4. Expérience 5 : Attraper d'un objet en chute libre avec déplacement de la main

Le problème récurrent dans ce genre de tâche est de savoir comment mettre sa main au bon endroit et au bon moment pour saisir l'objet. Pour résoudre ce problème, plusieurs approches sont possibles. Nous en présentons quelques-unes issues d'expériences menées chez l'homme et d'autres issues de la robotique.

IV.4.1. Données recueillies chez l'homme

De nombreuses expériences ont analysé la capture de balle chez l'homme. Pour l'heure, aucune théorie de contrôle visuo-moteur ne semble prévaloir sur les autres mais quelques propositions ont été faites..

Le sujet pourrait ajuster en continu la vitesse de la main à partir de la mesure de la distance instantanée entre l'objet et la main ainsi que la vitesse instantanée de cet objet. Ces mesures sont obtenues visuellement par des paramètres utilisant τ ; elles sont ensuite reliées entre elles selon une relation temporelle de premier ordre, c'est-à-dire ne prenant pas en compte les changements de vitesse de l'objet (Bootsma, 1991, 1992, 1993 ; Montagne *et al.*, 1999; Peper *et al.*, 1994).

Il pourrait encore déplacer la main en utilisant un angle d'approche constant, c'est-à-dire moduler sa vitesse à partir d'informations relatives à l'angle visuel mesuré entre la direction du mouvement de l'objet et celle de sa propre direction de mouvement. Il fait ainsi l'économie du choix d'un point d'interception à l'avance (Chapman, 1968; Lenoir *et al.*, 1999b; McBeath *et al.*, 1995, 1996a; Michaels & Oudejans, 1992; Oudejans *et al.*, 1996, 1997).

IV.4.2. Solutions proposées par les roboticiens

De leur côté, les roboticiens ont essayé de résoudre ce problème dynamique en proposant une approche un peu différente puisqu'elle se fonde sur l'utilisation de la connaissance a priori de la trajectoire de l'objet pour limiter au maximum le temps de calcul.

En effet, une fois lancée, celle-ci est toujours la même quelque soit la masse de l'objet. Seuls des paramètres aérodynamiques liés à la nature de l'objet peuvent entrer en ligne de compte (balle en mousse par rapport à boule de pétanque). Cette connaissance *a priori* va

considérablement réduire la lourdeur de l'analyse en temps réel de l'image par les caméras couplées au robot.

Leurs algorithmes peuvent donner quelques orientations de recherche sur la façon dont l'homme pourrait s'y prendre pour attraper un objet en chute libre. Ils ont, la plupart du temps, utilisé des tâches comme le jonglage, le ping-pong ou l'attraper d'objet lancer en direction du robot (Aboaf & Atkeson, 1989 ; Andersson, 1987, 1989; Hong, 1995 ; Hove & Slotine , 1991; Riley *et al.*, 2000 ; Rizzi & Koditschek, 1992 ; Sakaguchi *et al.*, 1991).

La plupart des méthodes utilisées par les roboticiens dans l'attraper d'objets repose sur une succession de phases communes : 1°) la détection de la balle, 2°) la détermination du moment où elle est en vol, 3°) le suivi et la prédiction de sa trajectoire, 4°) la planification et l'exécution d'un mouvement d'interception. La prédiction des trajectoires de balle dans un environnement contrôlé (pas de vent, pas d'effets de balle) se fonde sur la connaissance *a priori* des caractéristiques de ce type de déplacement et sur le recueil d'informations sur le déplacement de la balle en temps réel avant de commencer de faire une prédiction sur la trajectoire suivie par l'objet.

Deux solutions ont été proposées. Elles diffèrent principalement au niveau des phases 3 et 4.

La première (Hong, 1995; Hove & Slotine, 1991) consiste à prédire la trajectoire de la balle dont le mouvement principal se faisait **horizontalement** (à partir d'une technique d'ajustement de moindres de carré récurrente¹⁶, basée sur un modèle parabolique de la trajectoire). Ensuite, un **point** et un **moment d'interception** sont choisis sur la trajectoire prédite¹⁷. Ce choix se fait à partir des contraintes spatiales (volume dans lequel le bras manipulateur peut attraper la balle) et mécanique (limite de la vitesse de déplacement) du bras manipulateur. Ce point et ce moment d'attraper sont réactualisés à mesure que la balle progresse. Une fois l'endroit d'attraper identifié et le temps restant pour s'y rendre estimé, une trajectoire d'interception du bras est générée pour mobiliser rapidement le bras vers ce point, en prenant en compte tant les coordonnées de la position actuelle de la balle que celles de l'effecteur du robot. Une fois la commande de fermeture de la pince initiée (durant le déplacement du bras), le délai

¹⁶ Ce type d'algorithme présente l'avantage de pouvoir faire les calculs sur chaque nouveau point de la trajectoire indépendamment du nombre de points déjà collectés.

¹⁷ Cela était fait en commençant de façon prospective par un point de cette trajectoire situé au plus près de la base de support du robot et non du point effecteur (ce qui laisse plus d'espace pour accélérer le bras)

d'arrivée de la main au point d'interception est maintenu constante par rapport au point d'arrivée de la balle à ce même point, pour que l'arrivée de la pince soit synchronisée avec celle de l'objet. Afin d'augmenter les probabilités de réussite de l'attraper avant la décélération de la pince du robot, cette partie distale calque sa trajectoire (même direction et même vitesse de déplacement) sur celle de l'objet durant une très courte période, de telle sorte que la trajectoire du bras coïncide avec celle de la trajectoire prédite de la balle (cela revient à réduire le nombre de degré de liberté à gérer). Le bras est ensuite ralenti de façon harmonieuse le long de cette même trajectoire. Cette décélération le long de la trajectoire de la balle permet d'introduire une **plus grande tolérance aux erreurs de synchronisation de la pince que l'objet à attraper** (inférieure à 0,005 secondes). L'orientation de la fermeture de la pince est perpendiculaire à la trajectoire de la balle afin de **limiter l'impact de la balle** et d'**augmenter les chances d'attraper** l'objet (**Figure IV-11**).

La seconde (Riley *et al.*, 2000) concerne le jonglage et part du principe que le mouvement est principalement dirigé vers le bas. Elle consiste une nouvelle fois à considérer que la trajectoire de l'objet est parabolique et d'implémenter les paramètres de ce type de trajectoire dans le module d'analyse des images vidéo pour prédire rapidement la trajectoire de la balle. Riley et Atkeson ont choisi d'**estimer le moment d'attraper à partir de la parabole calculée pour une hauteur d'attraper pré-déterminée**. Une fois ce délai connu, ils ont généré le mouvement du bras du robot vers la cible en considérant que ce mouvement était similaire à un **déplacement point à point** (position initiale de la main et position de l'impact balle-main prédit), dont les caractéristiques cinématiques correspondent à celle observées chez l'homme (notamment le profil de vitesse de forme gaussienne). Ce mouvement possède donc une vitesse et une accélération nulles eu début et en fin de déplacement. La balle interceptée tombant en premier vers le bas, ces auteurs n'ont pas cherché à ajuster la vitesse de la main à celle de la balle au moment de l'attraper. Aucune démarche n'a été entreprise pour gérer l'impact au moment de la saisie. L'utilisation de la cinématique inverse permet ensuite de planifier la trajectoire de la main à partir des coordonnées cartésiennes de la balle.



Figure IV-11 : Capture d'une balle par un bras-manipulateur couplé à deux caméras (d'après Hong et Slotine, 1995 ; la lecture se fait de haut en bas et de gauche à droite).

Nous proposons ici d'explorer ce qui se passe dans une situation similaire à celle illustrée par la Figure IV-2, c'est-à-dire une tâche dans laquelle le déplacement de la main n'est pas contraint dans l'attraper d'un objet en chute libre. Cette situation apporte un degré de complexité supplémentaire par rapport aux expériences réalisées par Boostma et ses collaborateurs où le mouvement de la main était contraint (elle se déplaçait en étant guidée selon un axe prédéterminé par l'utilisation d'un rail). Cette situation constitue également un cas plus général que celui exposé dans nos précédentes expériences réalisées avec le KINELITE® car nous avons rarement la main sur la trajectoire de l'objet au moment où il tombe. D'autre part, nous introduisons un nouveau paramètre qui est le changement continu de la vitesse de l'objet (i.e. relation temporelle de second ordre intégrant par conséquent vitesse et accélération).

IV.4.3. Présentation de l'expérience

Six sujets (4 hommes et 2 femmes âgés de 26 ± 2 ans) ayant une vision normale ou corrigée ont participé à l'expérience (DROP). Ils devaient attraper une barre en inox (15 cm) lâchée à hauteur d'épaule [N], soit par eux-mêmes [S], soit par l'expérimentateur [E], avec la main droite [D] puis la main gauche [G].

Une première expérience a été réalisé en combinant ces paramètres de la façon suivante :

- SDN et SGN : lâcher de la barre par le sujet lui-même en la positionnant à hauteur d'épaule, et attraper avec la main droite puis la main gauche ;
- EDN et EGN : lâcher de la barre par l'expérimentateur 30 cm au-dessus de l'épaule, et attraper avec la main droite puis la main gauche.

Dans une seconde expérience, la barre a été lâchée par l'expérimentateur à une hauteur de 2,5 m du sol [H] et attraper par les sujets uniquement avec la main droite (condition EDH).

Il leur était demandé de se maintenir debout, face à la verticale de la trajectoire de la barre, leur coude à 90° environ contre le tronc.

La reconstruction des données cinématiques dans le plan sagittal nous a permis d'identifier plusieurs moments clés : début de la chute de la barre (TBmin), début du mouvement de la main (THmin), moment de l'attraper (TBmax) obtenu à partir de la composante verticale de la vitesse de la barre, la vitesse tangentielle de la main (V_{TG}) ainsi que ses composantes (V_{XH} et V_{YH}) et de la main (V_{YB}), la vitesse maximale de la main (V_{Hmax}), moment où la vitesse tangentielle de

la main est maximale (TH_{max}), la hauteur d'attraper et l'angle d'attraper (θ) mesuré en degré par rapport à la verticale (**Figure IV-12**).

Nous avons de plus analysé les données cinématiques et temporelles suivantes :

- Latence entre l'initiation du mouvement de la main et celle de la barre, soit $DÉLAI = TB_{min} - TH_{min}$. ; une valeur positive dénote un retard de l'initiation de la main par rapport au début de la chute de la barre ;
- Durée de mouvement de la main, $MT_H = TB_{max} - TH_{min}$.

IV.4.4. Résultats

La **Figure IV-12** montre un exemple de tracés cinématiques instantanés de la barre et de la main pour chacune des conditions expérimentales où le sujet attrape la barre avec la main droite.

- Dans la *condition SDN* (première ligne), c'est le sujet lui-même qui lâche la barre. On voit que la vitesse tangentielle de la main suit approximativement celle de la barre (c'est-à-dire sa vitesse verticale puisque la composante horizontale est quasi inexistante).
- Dans la *condition EDN* (deuxième ligne), les tracés sont différents. Le sujet met un certain temps à bouger sa main, ce qui se traduit par une vitesse tangentielle qui ne varie pas alors que la vitesse de la barre augmente (seconde colonne). Cette latence est due au délai visuo-moteur : ne sachant pas à quel moment la barre va tomber, le sujet ne peut se fier qu'aux informations visuelles pour initier son mouvement.
- Dans la *condition EDH* (troisième ligne), les tracés changent à nouveau. Il n'y a plus de chevauchement ou de ressemblance entre les deux tracés. Les composantes horizontale et verticale sont très différentes tant au niveau de leur magnitude qu'au niveau de leur déroulement temporel. Pour des raisons techniques (champ d'observation des caméras), seule la partie finale du mouvement de la barre est visible.

Dans la mesure où les analyses statistiques n'ont révélé aucune différence significative entre les deux mains, quelles que soient les conditions expérimentales, nous ne rapporterons que les données relatives à la main droite afin de rendre notre discours plus lisible. Nous présenterons d'abord les résultats concernant la comparaison des lâchers exécutés à hauteur normale (condition **LÂCHER**) puis nous comparerons ceux relatifs aux deux hauteurs (normale et élevée ; condition **HAUTEUR**).

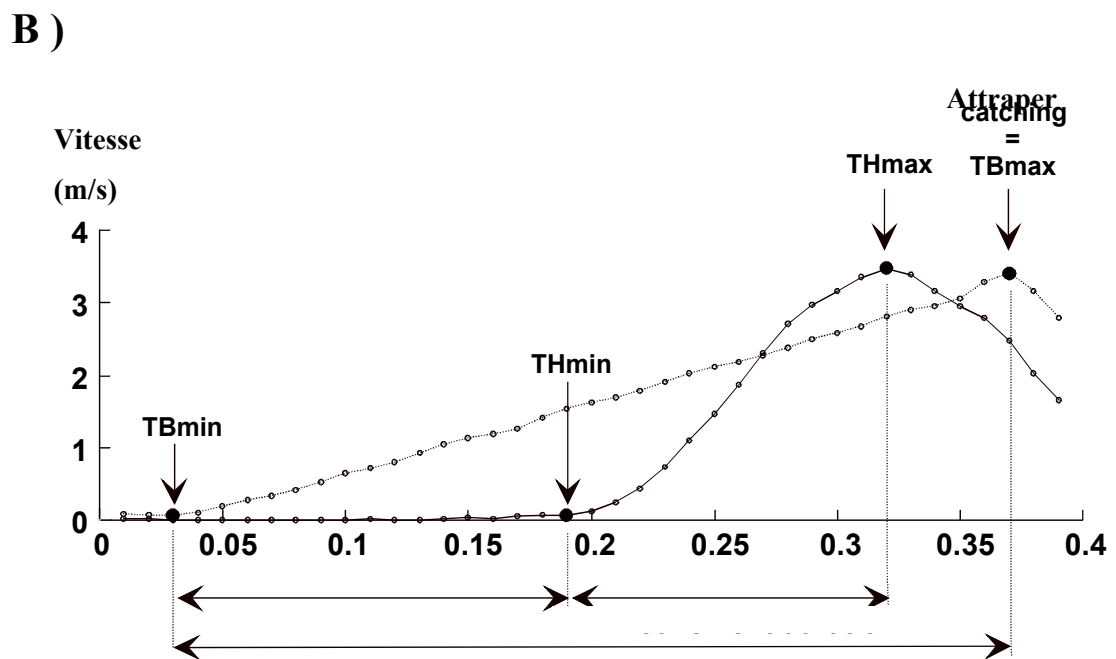
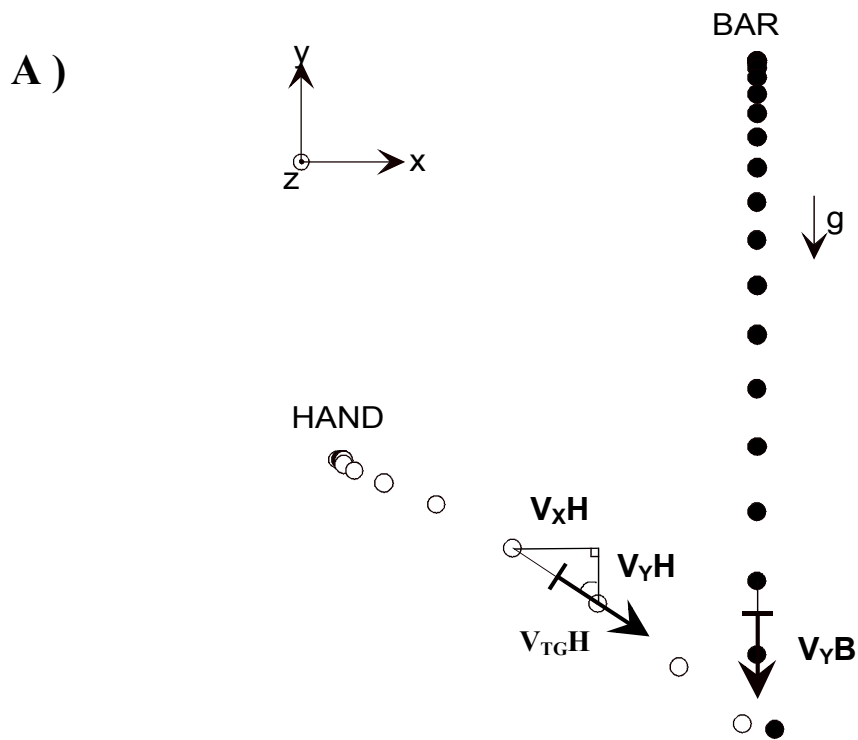


Figure IV-12. Identification des paramètres cinématiques (A) et temporels (B) de l'expérience DROP pour le calcul des variables.

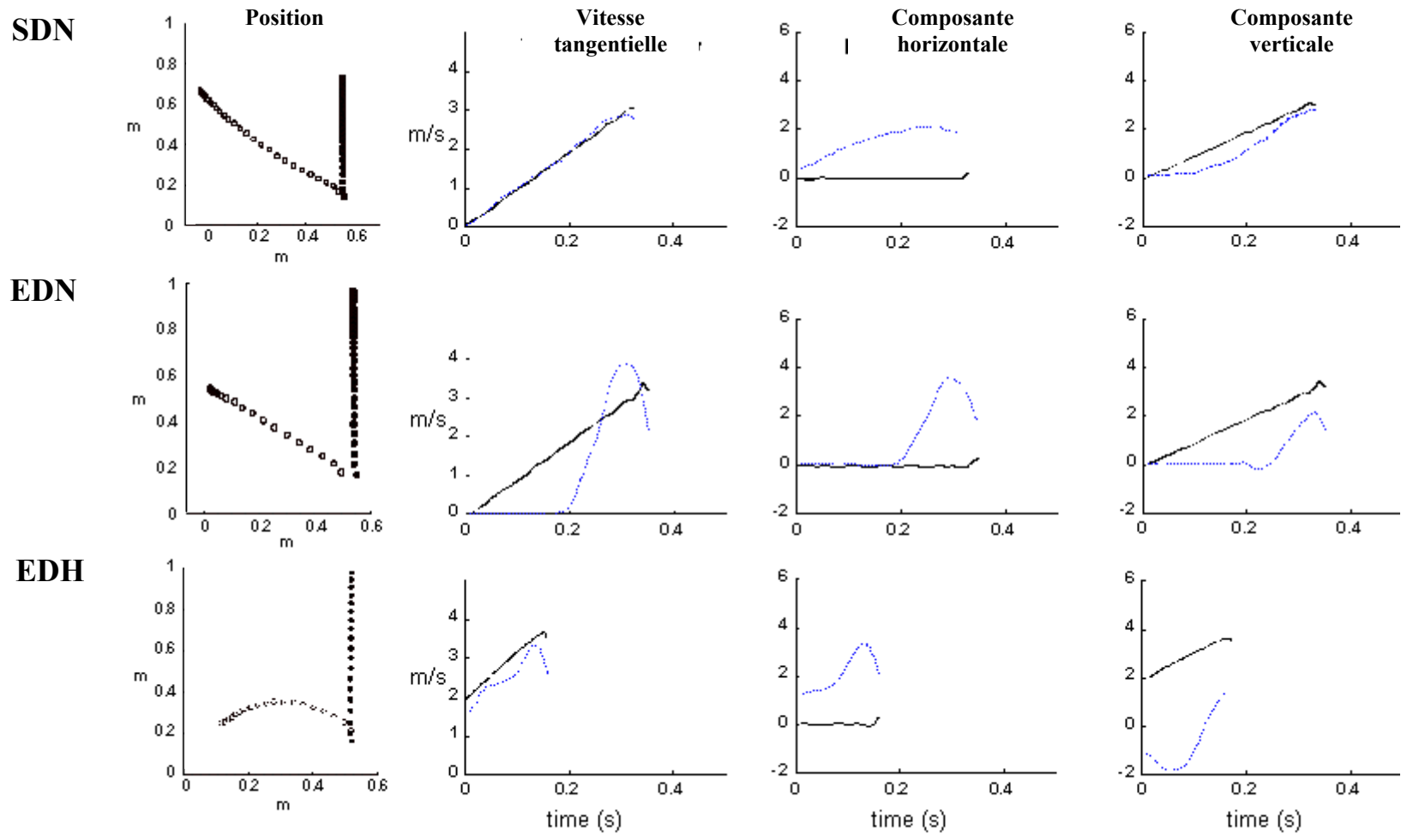


Figure IV-13. Exemples de trajectoires obtenus avec un sujet dans les trois conditions expérimentales. La première colonne représente les tracés du déplacement de la main (cercle plein) et de la barre (cercle vide). La seconde colonne correspond aux décours temporels de la vitesse tangentielle de la main (trait pointillé) et le de la barre (trait épais). La troisième et la quatrième colonnes présentent les composantes horizontale et verticale de la vitesse tangentielle (respectivement X et Y). Celles de la barre sont représentées par le trait fin et celles de la main par un trait pointillé.

Condition LÂCHER (Sujet vs Expérimentateur) à hauteur normale

□ Initiation du mouvement

L'analyse de l'effet de la condition de LÂCHER sur la latence (Figure IV-14) a permis de montrer : 1°) les sujets avaient tendance à initier le mouvement de leur main au moment même où ils lâchaient la barre (-0.03 ± 0.04 s) ; 2°) lorsque l'expérimentateur lâchait la barre, les sujets mettaient un certain temps à bouger la main. Ils leur fallait en moyenne 150 ± 0.03 ms avant d'initier le mouvement de leur main. L'effet de la condition LÂCHER sur la latence était significatif ($F_{1,5}=204.67$; $p<0.001$).

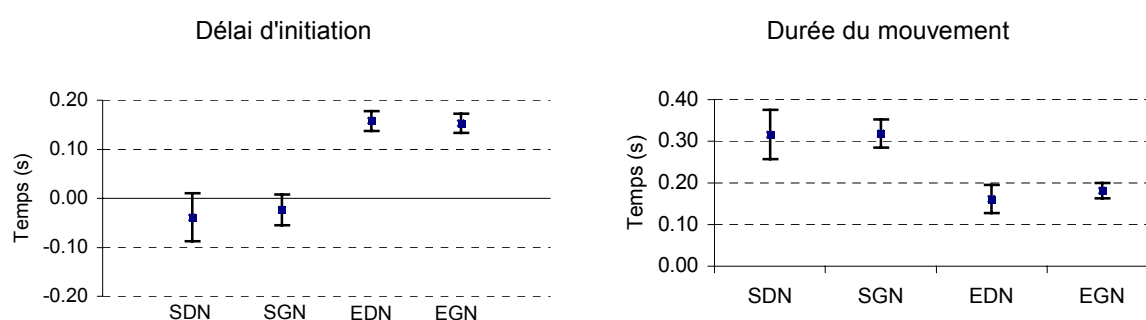


Figure IV-14. Paramètres temporels relatifs à la main. En (A), la latence de l'initiation du mouvement de la main par rapport au début de la chute de la barre. En (B), la durée du mouvement de la main.

□ Durée de mouvement

La condition LÂCHER avait également un effet significatif sur MT_H à hauteur normale ($F_{1,5}=145.82$; $p<0.001$). Les durées de mouvement de la main étaient plus courtes pour le lâcher [E] (170 ± 5 ms) que pour le lâcher [S] (320 ± 5 ms). Il est intéressant de noter que la somme de DÉLAI et de MT_H de la condition [E] n'était pas significativement différente de celle de la condition [S] où il n'y a pas de délai entre l'initiation du mouvement de la main et celui de la barre. Ceci pourrait être dû au fait que les sujets essayaient de rattraper le retard lié au délai visuo-moteur ou qu'ils attrapaient la barre à la même hauteur relative.

□ **Hauteur de lâcher**

En effet, la condition LÂCHER n'a pas d'influence (condition SDN vs EDN, $p=NS$) sur H_{CATCH} . (Figure IV-14).

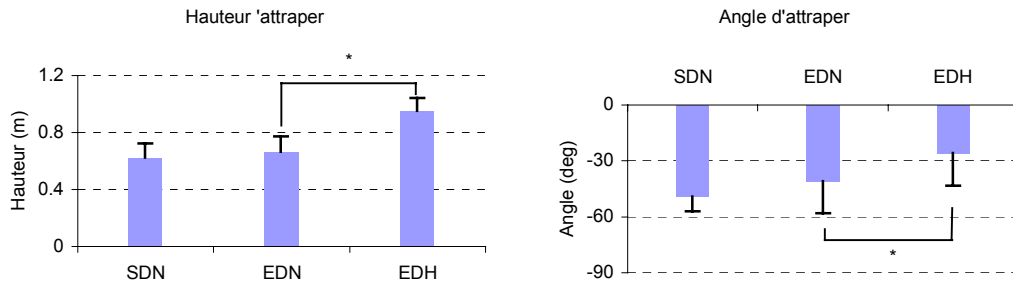


Figure IV-15. Angle et hauteur d'attraper dans les trois conditions expérimentales.

□ **Angle d'attraper**

La condition LÂCHER ([S] ou [E]) n'a pas eu d'influence sur l'angle θ ($F(1,5)=2.86$; $p=NS$). Dans les deux cas, la main se dirige comme précédemment dans le même sens que la barre (Figure IV-14).

□ **Vitesse à l'attraper**

Nous avons comparé la vitesse de la main (V_{TGH} et V_{YH}) à celle de la barre (V_{YB}) dans chacune des conditions réalisées à hauteur normale, dont les valeurs ont été reportées dans le **Tableau IV-3** (la vitesse horizontale de la main a été reportée à titre d'information).

Tableau IV-3 : Vitesses de la barre et de la main à l'attraper. V_{YB} et V_{YH} sont respectivement les composantes verticales de la vitesse de la barre et de la main ; V_{XH} est la composante horizontale de la vitesse de la main ; V_{TGH} est la vitesse tangentielle de la main ($M \pm SEM$)

	SDN	EDN	EDH
V_{YB}	2.7±0.2	3.1±0.1	3.8±0.1
V_{XH}	1.6±0.2	2.1±0.2	1.9±0.2
V_{YH}	2.2±0.2	2.4±0.5	1.5±0.4
V_{TGH}	2.9±0.2	3.4±0.4	2.6±0.2

L'analyse des vitesses d'attraper a révélé un effet de l'interaction Vitesse vs Hauteur, tant pour les vitesses tangentielles ($F_{2,10}=18.31$; $p<0.001$) que sur les composantes verticales de ces vitesses ($F_{2,10}=37.33$; $p<0.001$).

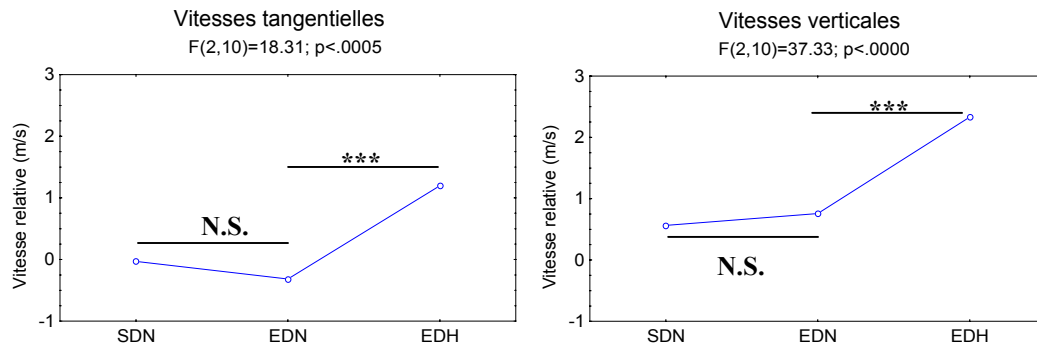


Figure IV-16. Comparaison des vitesses relatives tangentielle et verticale dans chacune des conditions expérimentales. La vitesse relative correspond à la différence entre la vitesse de la barre et celle de la main. Plus cette différence est importante, moins la vitesse de la main calque celle de la barre.

Les T-test appariés (N=30 dans chaque condition) ont montré que :

1°) les vitesses tangentielles de la main et de la barre n'étaient pas significativement différentes dans la condition SDN ($p=NS$) alors qu'elles l'étaient pour la condition EDN ($t=-2.15$ et $p=0.039$).

2°) les composantes verticales de la vitesse de la main et de la barre étaient significativement différentes dans les deux conditions ($t=5.43$ et $t=3.98$ respectivement pour SDN, EDN avec $p<0.001$).

Puis, nous avons comparé la vitesse relative entre la main et la barre (V_{REL}) dans chacune des conditions, afin de savoir si l'ajustement entre les vitesses était meilleur dans une condition expérimentale plutôt qu'une autre. Pour les conditions SDN et EDN, quelle que soit la vitesse prise pour le calcul (tangentielle ou verticale), il n'y avait pas de différences significatives (respectivement $F_{1,5}=6.00$ et $F_{1,5}=0.42$; $p=NS$).

Condition HAUTEUR (normale vs élevée)

□ Hauteur de lâcher

La condition HAUTEUR a eu un effet significatif sur la hauteur d'attraper H_{CATCH} (EDN vs EDH ; $F_{1,5}=92.614$; $p<0.001$). Les sujets ont attrapé la barre plus haut lorsque celle-ci était lâchée à 2,5 m du sol (EDN= 0.66 ± 0.11 m ; EDH= 0.95 ± 0.09 m) (voir **Figure IV-16**, EDN vs EDH).

□ Angle d'attraper

De la même façon, la hauteur du lâcher agissait de façon significative sur θ (EDN= $-41\pm 17^\circ$ vs. EDH= $-26\pm 18^\circ$; $F_{1,5}=12.95$; $p<0.05$) (voir **Figure IV-16**, EDN vs EDH). Dans les deux cas, la main se dirigeait à nouveau dans le même sens que la barre.

□ Vitesse à l'attraper

Concernant les vitesses d'attraper pour la condition EDH, la différence entre les vitesses tangentielles était significative ($t=11.15$ et $p<0.001$). Les résultats étaient similaires pour la vitesse verticale ($t=16.05$, $p<0.001$). L'analyse des vitesses relatives ont montré la V_{REL} de la condition EDH était significativement différente de celle de la condition EDH (voir **Figure IV-17**, EDN vs EDH).

Pour les deux conditions

Les corrélations entre ces différentes vitesses (**Figure IV-17**) ont montré qu'elles n'étaient significativement différentes de zéro que pour la vitesse verticale dans les conditions EDN et EDH (respectivement $R=0.39$, $p=0.035$ et $R=0.58$, $p=0.001$). Nous avons ensuite regroupé toutes les données sur un même graphe afin d'essayer de mettre en évidence une correspondance linéaire entre la vitesse finale de la barre et celle de la main à l'attraper. Les résultats significatifs rapportés pour les conditions prises séparément n'ont pas été retrouvés (**Figure IV-18**). Ceci suggère qu'au moment de l'attraper, la vitesse de la main ne correspondait pas parfaitement à celle de la barre mais son mouvement se faisait néanmoins dans le même sens que celui de la barre peut de temps avant l'attraper.

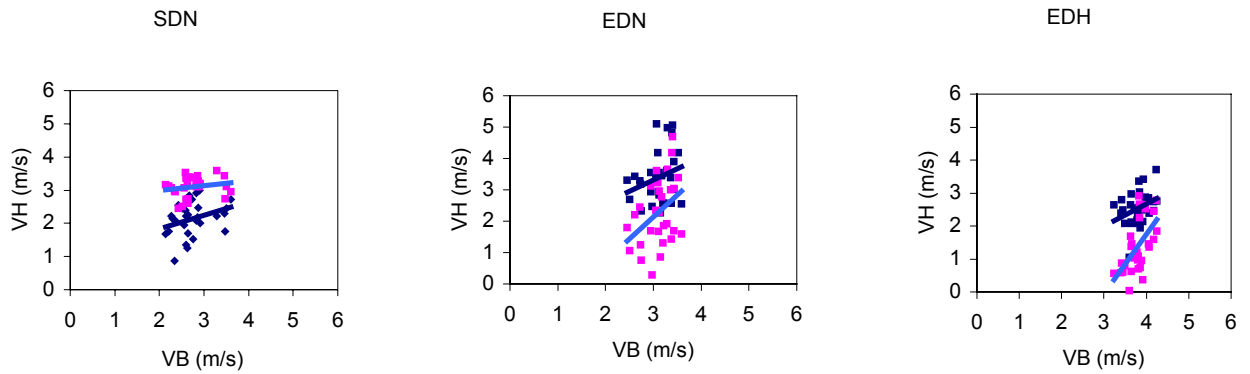


Figure IV-17. Tracés des correspondances entre vitesse de la barre et vitesse de la main (tangentielle : points foncés ; verticale : points clairs)

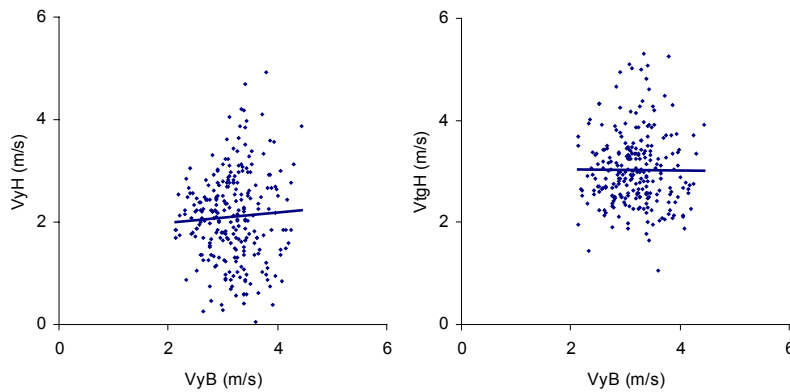


Figure IV-18. Relation entre vitesse verticale de la barre et vitesses de la main (verticale à gauche et tangentielle à droite).

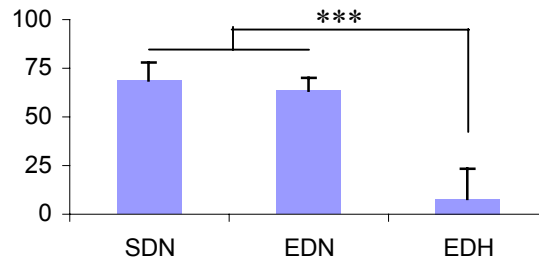


Figure IV-19. Index de linéarité du mouvement de la main. Les valeurs sont exprimées en pourcentage de déviation par rapport à la ligne droite reliant la position initiale et la position finale de la main.

Nous avons analysé l'index de linéarité du mouvement de la main. Il permet de mesurer la déviation de la trajectoire de la main par rapport son déplacement en ligne droite entre sa position initiale et sa position finale (Atkeson & Hollerbach, 1985). Selon Toni et coll. (1996), « la courbure de la trajectoire est un index de confiance sur le choix de la direction du mouvement. Quand la direction du mouvement est spécifiée dès le départ, les modifications à

appliquer au mouvement de la main sont moindres ». L'ANOVA sur les trois conditions (SDN, EDN et EDH) était significative ($F_{2,10}=34.16$; $p<0.001$). Le test post-hoc a révélé que la condition EDH était significativement différente des deux autres conditions ($p<0.001$ dans les deux cas), comme le montre la **Figure IV-19**. Ce qui signifie que la trajectoire de la main était beaucoup plus courbe dans la condition EDH et que, par conséquent, cette trajectoire était plus sujette à des changements de direction. Cela signifie également que la main a parcouru un plus grand trajet.

IV.4.5. Discussion

L'absence de différence entre les deux mains au niveau des paramètres mesurés pourrait être attribuée au fait que les paramètres de contrôle ne sont pas gérés à la périphérie mais bien au niveau central. La cinématique des deux mains est donc très similaire. Nos résultats rejoignent en cela les données récentes rapportées par Boessenkool et coll. (1998) concernant les comparaisons de trajectoire des deux mains dans une tâche de pointage. Ils ont montré que la cinématique des deux mains ne changeait pas significativement pendant les tâches de pointage. Ils ont interprété ces résultats comme la manifestation d'un contrôle indifférencié du mouvement des mains.

La synchronisation entre l'initiation du mouvement de la barre et celle de la main dans la condition SDN est proche de ce que d'autres auteurs ont observé dans des tâches bi-manuelle de délestage du bras (Bennis *et al.*, 1996; Dufossé *et al.*, 1985; Hugon *et al.*, 1982; Paulignan *et al.*, 1989; Viallet *et al.*, 1987), et l'influence de la connaissance *a priori* de l'effet du déclenchement d'une action.

L'expérience DROP a permis également de montrer que les paramètres cinématiques du déplacement de la main sont directement influencés par les contraintes spatio-temporelles de la tâche. La plus contraignante de nos conditions semble être la condition EDN. Les sujets ont mis en moyenne 150 ms pour déclencher leur mouvement et environ autant pour l'exécuter et sans pour autant que cela affecte de façon significative leur réussite (la durée totale du mouvement est donc d'environ 300 ms), alors que dans la conditions SDN, ils ont mis environ 300 ms (durée totale du mouvement) pour attraper la barre (absence de délai visuo-moteur). Tout ce passe donc comme si les sujets avaient voulu rattraper le retard dû à l'introduction d'un délai non anticipé. Dans les deux cas, l'initiation des mouvements de la main se faisait toujours vers le bas. Les sujets ne disposant que de peu de temps pour attraper la barre, ils dirigeaient leur main en

direction d'une zone de saisie plus ou moins fixe sur la trajectoire de chute, et située environ 30-40 cm en-dessous du niveau initial de lâcher.

Par contre, dans la condition EDH, les sujets avaient suffisamment de temps pour déclencher leur mouvement et déplacer leur main en direction d'une position future de la barre (composante verticale) tout en continuant à déplacer leur main en direction de la trajectoire de chute (composante horizontale). Aussi, les deux composantes du mouvement de la main (horizontale et verticale) sont gérées de façon indépendante tout en étant tributaire des paramètres cinématiques de la barre (déplacement et vitesse).

Nos données pourraient être en partie expliquées par l'utilisation d'une stratégie de **contrôle de l'angle d'approche** (Lenoir et coll. 1999) initialement développée par Chapman (1968). Dès que le transport de la main commence, la vitesse de la main se fait de telle sorte que l'angle d'approche par rapport la trajectoire de la barre (c'est-à-dire la direction de la gravité puisque c'est une chute libre) varie très peu (**Figure IV-20**), tout du moins jusqu'à une certaine distance de la barre car la main change d'orientation au moment de l'attraper. Néanmoins celle-ci ne semble pas satisfaisante car elle ne marche que pour des hauteurs faibles.

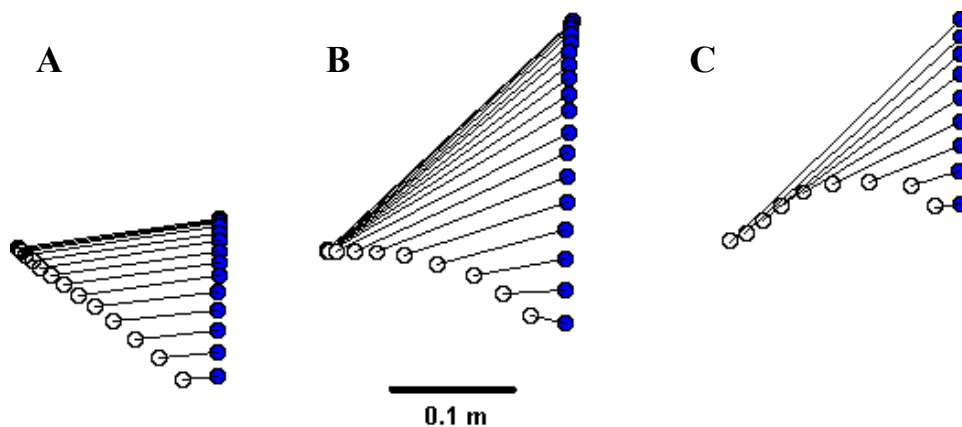


Figure IV-20. Variation de l'angle d'approche dans les trois conditions de lâcher : a) SDN, b) EDN et c) EDH.

Une première façon d'interpréter nos données serait de dire que les sujets ont adopté **deux stratégies** différentes selon les contraintes spatio-temporelles imposées par les conditions initiales : une **stratégie d'interception** et une **stratégie de poursuite**. La première serait utilisée lorsque les contraintes temporelles sont telles que le sujet ne dispose que de très peu de temps

pour programmer son mouvement et l'exécuter. La seconde apparaîtrait dès que la hauteur est suffisante et que le sujet peut ajuster le transport de la main au niveau de ces deux composantes.

Une seconde interprétation de ces données serait que les sujets n'utilisent qu'une seule et même stratégie : le « suivi » (ou « tracking »), et que la cinématique de la main n'est pas seulement liée au temps dont dispose le sujet pour attraper l'objet mais aussi, et surtout, à sa position de départ. Plusieurs résultats vont dans le sens de cette hypothèse.

D'abord, le fait que le déplacement de la main s'oriente systématiquement vers une position qui n'est pas la position actuelle de la barre, mais plutôt une position qu'elle occupera plus tard, va dans le sens de cette interprétation. Nos résultats constituent donc une généralisation de ceux obtenus par Smeets et Brenner (1995) et Brenner et coll. (1998) concernant le contrôle de l'accélération de la main par rapport à une cible se déplaçant à vitesse constante. Même lorsque l'objet est accéléré, 1°) la main est dirigée non pas vers la position actuelle de la barre mais une position qu'elle va occuper plus tard ; 2°) l'accélération de la main est régulée en continue non seulement en fonction des contraintes temporelles imposées par la vitesse de l'objet, mais aussi par rapport aux contraintes spatiales puisque les vitesses de la main diffèrent en fonction de la hauteur de lâcher (elles sont d'autant plus faibles que la hauteur de lâcher est élevée). Concernant ce second point, Laurent et coll. (1994) sont arrivés aussi à ces conclusions pour les lancers de balle en direction du sujet (trajectoire parabolique, donc avec une vitesse d'approche constante).

Ensuite, les sujets semblent choisir un point d'attraper et ajuster ensuite la vitesse du mouvement de leur main de façon à ce qu'elle arrive à ce point au bon moment malgré l'addition de délai lorsque la barre est lâchée par l'expérimentateur. Il est probable que les sujets utilisent une stratégie prenant en compte l'accélération de la gravité puisque la durée de chute est proportionnelle à la hauteur de lâcher quelle que soit la masse de l'objet. Nos résultats sont en opposition avec le modèle développé Bootsma et coll. (Bootsma et al., 1997 ; Peper et al., 1994) qui stipule que le point d'attraper n'a pas besoin d'être choisi à l'avance, puisque la hauteur d'attraper de l'objet est liée non pas à sa position et sa vitesse instantanées par rapport à la main (paramètres relatifs), mais plutôt à sa hauteur de départ (paramètre absolu).

Un autre aspect intéressant de ces résultats est que les sujets orientent systématiquement leur main vers le bas juste avant de l'attraper, c'est-à-dire dans le même sens que le déplacement de la barre. Ils se mettent ainsi dans une position plus « confortable » pour attraper l'objet car la direction de leur main est systématiquement alignée sur celle de la trajectoire de la barre. Une

fois la position de l'attraper choisie, elle aurait deux objectifs principaux : augmenter les chances de saisie en **augmentant de façon active la marge d'erreur de l'attraper** (diminution de la vitesse relative entre la main et la barre) mais aussi de **diminuer la force d'impact de l'objet dans l'effecteur** afin de diminuer les effets de rebond qui pourraient entraîner un échec de la tâche. Néanmoins, cette stratégie d'alignement n'est pas qu'*approximative* puisque la vitesse relative entre la main et la barre au moment de l'attraper est toujours supérieure à zéro et varie avec la hauteur de lâcher.

Le fait que la hauteur d'attraper semble définie par rapport à la hauteur initiale de la barre et que la main soit systématiquement dirigée vers le bas au moment de l'attraper nous amène à la conclusion que les sujets utilisent une stratégie proche de celle imaginée par les roboticiens pour résoudre le problème de la saisie d'un objet en mouvement.

IV.5. Résumé et conclusion

L'analyse des EMG du *biceps brachii* durant l'attraper d'une balle en chute libre a démontré que le SNC était capable d'estimer avec précision le t_c quelle que soit les conditions de présentation des essais. Néanmoins, selon que le sujet voyait la hauteur de lâcher (vitesse initiale nulle) ou ne pouvait avoir accès qu'à la vitesse initiale (hauteur fixe), les modalités d'ajustement de l'intensité des EMG pour faire face à la perturbation liée à l'impact de la balle dans la main changeaient. Il semble que ce soit l'**utilisation conjointe d'informations recueillies en temps réel et des informations *a priori*** qui soit la meilleure combinaison pour que le sujet puisse faire une estimation la plus fine possible de t_c et ajuster de façon optimale l'intensité des muscles qui vont contre-carrer la perturbation à venir.

L'étude de la capture d'une barre en chute libre sans contrainte sur l'effecteur nous a de nouveau permis de mettre en évidence un lien entre les conditions initiales de la tâche et la stratégie utilisée par le SNC pour répondre au problème qui lui est posé. Selon les contraintes temporelles et spatiales de la tâche à réaliser, il va moduler la cinématique de la main. De plus, il existe des similitudes entre la cinématique de l'attraper de la barre et les algorithmes développés par les chercheurs pour apprendre aux robots à attraper un objet en vol. Plutôt que d'intercepter la barre en suivant une trajectoire perpendiculaire à celle de la barre, la main du sujet se déplaçait dans le même sens qu'elle avant le moment de la capture. Nous avons noté également des tentatives de minimisation de la vitesse relative, seulement visibles sous certaines conditions. Ces deux résultats montrent que les sujets ont adopté une stratégie qui leur permettait de **minimiser la force d'impact de la barre avec la main et de faciliter sa capture en diminuant le nombre de degrés de liberté à gérer au moment de l'attraper** (en l'occurrence limitation des rotations de la main selon plusieurs axes par rapport au poignet).