

Chapitre 5

Discussion générale

V. Discussion générale

« Chaque structure mentale nouvelle, en intégrant les précédentes, parvient tout à la fois à libérer en partie l'individu de son passé et à inaugurer des activités nouvelles qui, au présent niveau, sont elles-mêmes orientées essentiellement vers l'avenir »
Piaget, La psychologie de l'enfant.

Le développement de nouveaux outils informatiques et d'analyse des mouvements en 3D permettent de proposer des tâches beaucoup moins contraignantes d'un point de vue mobilité et d'avoir l'occasion d'explorer ces mouvements dans des conditions plus proches de celles que l'on rencontre dans la vie quotidienne.

Mais, comme le soulignait Marey (1873), le mouvement est ce qui caractérise la vie de façon la plus *apparente*. Or, pour comprendre comment sont contrôlés nos mouvements par le SNC, il nous faut « voir » vers quelque chose que nous ne pouvons observer directement. Le passage de l'observable au non observable est donc un véritable challenge, mais aussi la seule possibilité que l'on ait d'entrer dans l'intimité du fonctionnement du SNC.

En effet, comme dans toute performance, cette partie apparente ne constitue qu'un aspect de ce qui se passe réellement durant les actes moteurs. Le but de l'action (aspect interne) est ce vers quoi la totalité de nos segments corporels vont être mobilisés de concert (aspect externe). Mais, cette mobilisation se fait selon une certaine organisation dont notre système nerveux central est à l'origine.

L'analyse des activités électromyographiques avec l'appui de l'analyse biomécanique lève un voile partiel sur cet aspect interne. Pour aller plus loin, il nous faut utiliser des techniques d'imagerie pour explorer le cerveau lui-même durant son fonctionnement, techniques que nous n'avons pas employé dans le cadre de notre travail.

Notre démarche s'est donc inscrite dans cette logique pour l'analyse de l'anticipation dans les actions motrices, démarche déjà amorcée par bon nombre de chercheurs, et qui vise à « *replacer l'étude des mécanismes physiologiques dans le contexte de l'action naturelle où ils s'insèrent* » (Paillard, *In* Richelle, 1994, p. 931).

Nous souhaitons, dans notre conclusion, aborder trois points qui nous semblent importants pour nos futures recherches ainsi qu'autres voulant étudier les mêmes phénomènes : le premier méthodologique, le second conceptuel, le troisième scientifique.

V.1. Aspect méthodologique

Le problème majeur concernant l'anticipation est l'identification de ce qui *est ou n'est pas anticipé*. Dater un événement de façon la plus juste possible s'avère donc être une priorité au niveau de l'analyse des données.

Dans le cas de l'analyse de la locomotion et dans celui de la seconde expérience d'attraper d'un objet, c'est la *géométrie* ou la *cinématique* du mouvement lui-même qui a permis d'y arriver. Par contre, pour la première expérience d'attraper incluant l'analyse EMG, nous avons eu recours à un accéléromètre placé sur la face dorsale de la main, et donc utilisé un paramètre *dynamique*. La sensibilité des deux méthodes utilisées n'est évidemment pas la même. Elles sont tributaires de la fréquence d'échantillonnage à laquelle fonctionnent les appareils qui permettent le recueil de données.

Par conséquent, les conclusions de nos études sont elles-mêmes influencées par la méthodologie que nous avons employée. Par exemple, prendre comme référence le début du contact de la balle dans la main au lieu du maximum de l'impact peut entraîner des variations dans la quantité d'EMG mesurée durant les 50 ms précédant l'impact et, de ce fait, avoir une incidence sur les résultats de l'expérience quant à l'ajustement de la raideur musculaire par rapport à la quantité de mouvement prévue par le SNC.

D'autre part, les phénomènes anticipés sont directement liés aux circonstances dans lesquelles se déroule l'action et surtout des consignes données aux sujets. Par exemple, donner au sujet pour consigne de se concentrer sur le trajet locomoteur qu'il doit suivre pour atteindre l'objectif désigné par l'expérimentateur, entraîne l'alignement de la direction la tête sur celle de la trajectoire et, par là même, la disparition des changements d'orientation anticipés mis en évidence au niveau du segment céphalique.

Nous pensons, par conséquent, que toute étude de l'anticipation doit répondre à deux exigences :

- La première est de s'assurer que la datation du début du mouvement observable sera correctement réalisée, afin de dissocier sans conteste les phénomènes anticipés des autres éléments de l'action ; à cela s'ajoute la nécessité d'utiliser une fréquence d'échantillonnage suffisamment élevée ;
- La seconde est que l'on ait bien réfléchi aux consignes à donner aux sujets pour ne pas créer une situation dans laquelle il ne serait pas possible de mettre en évidence le phénomène étudié.

V.2. Aspect conceptuel

Le présent travail a permis de démontrer l'existence de plusieurs stratégies d'anticipation utilisées par le cerveau, grâce à deux groupes de tâches très différents, mais tout aussi intéressants. Dans le premier, l'objectif à atteindre était fixe alors que dans le second il était mobile.

Malgré ces différences, nous avons pu démontrer que le SNC va toujours faire en sorte de prévoir ce qui va se passer pour mieux organiser les mouvements par rapport à l'objectif visé ; c'est cet aspect que nous voulions mettre en avant en citant Piaget au début de cette dernière partie.

V.2.1. Le simulateur et l'utilisation des stratégies

Considérer le cerveau comme un **simulateur** ayant la capacité de prédire ce qui **peut ou va se passer** en puisant dans sa mémoire et en faisant des hypothèses sur ce qu'il peut faire le moment présent, s'avère alors une approche très enrichissante au niveau de l'interprétation des comportements observables. Elle l'est non seulement par l'attrait que représente l'introduction du concept de **modèle interne** dans le contrôle moteur, mais aussi par la notion de **stratégie** qui permet d'orienter le choix des synergies motrices à la base de nos mouvements (voir notamment Berthoz, 1997, pp.167-195 ; Massion, 1997).

Ces stratégies sont directement influencées par le but de l'action. Nous l'avons montré au cours de nos expériences grâce à l'utilisation de divers paradigmes expérimentaux. Ceux-ci ont permis de mettre le sujet face à des conditions initiales très différentes et d'en analyser l'influence sur les réponses motrices produites par les sujets.

V.2.2. La flèche du temps dans l'action

Coupler les informations sensorielles à des modèles internes de différents types est une stratégie des plus efficaces pour pallier les imprévus et ne pas se retrouver dans une situation difficile à gérer.



N.A. Bernstein

C'est volontairement que nous avons utilisé plus haut l'expression « peut ou va se passer ». Elle renvoie à l'interaction entre les notions de « **modèle du futur** » et « **modèle passé-présent** » introduite par Bernstein (voir chapitre II, p. 10), mais aussi à celle de « **dialogues sensori-moteurs** » introduite par Paillard (*In* : Richelle et coll. 1994, p. 930), pour insister sur l'intérêt de disposer d'une multitude d'entrées sensorielles grâce auxquelles le SNC va pouvoir trouver la meilleure stratégie face à un problème moteur donné.

Par ailleurs, la similitude que Bernstein propose de l'action d'une information au niveau du contrôle moteur avec celle d'une enzyme au niveau du contrôle biochimique (voir chapitre II.1.1, p. 12) est, selon nous, la meilleure des métaphores que l'on puisse trouver pour illustrer cet aspect essentiel du fonctionnement de notre SNC. En effet, les processus nerveux sont basés eux-mêmes sur des processus biochimiques qui sont fondamentalement dépendants du temps. Quelle que soit la réaction chimique que l'on étudie, celle-ci prendra toujours plus de temps pour aboutir aux produits finaux responsables des effets observables s'il n'y a pas un (des) enzyme(s) pour accélérer le processus..

Or ,ce dernier est fonction de l'environnement dans lequel se produit la réaction (température, acidité, etc.), des concentrations relatives en substrats (constante d'équilibre) et de l'affinité de l'enzyme avec le substrat : en d'autres termes, il est dépendant des conditions initiales, tout comme les stratégies que nous avons démontrées dans nos expériences.

Cette même dépendance au temps se retrouve dans l'analyse du problème de la coordination inter-segmentaire dans les mouvements répétitifs que Bernstein avait publiés en 1935. Les mouvements qui composent les actions motrices sont des unités d'actions qui ne peuvent être répétées parfaitement. Ceci sous-entend qu'ils sont, à chaque répétition, reconstruits depuis le début sur la base d'un programme moteur et qu'ils peuvent être corrigés si besoin est.



Ilya Prigogine

En insistant sur l'importance du lien temporel reliant le modèle passé-présent au modèle du futur et sur la répétition imparfaite de nos mouvements, Bernstein a, sans le savoir, précédé le physicien prix Nobel de physique Ilya Prigogine^{1,2} dans son analyse de la métamorphose des sciences publiée en 1979. En effet, ce dernier a introduit la notion de « *flèche du temps* » et d'« *irréversibilité* » du temps biologique par opposition à la réversibilité mécanique des mouvements issue de l'utilisation des lois newtoniennes. Tout événement est par essence imprévisible puisque tout est possible.

Par conséquent, comme l'avait pressenti Bernstein, le cerveau tente de lutter contre cette « *flèche du temps* », synonyme d'imprévisibilité, en utilisant un fonctionnement de type probabiliste qui évalue les possibles et en modifie l'équiprobabilité, ceci afin d'augmenter la justesse de ses prédictions. Dans son choix des possibles qui s'offrent à lui, son *expérience antérieure* et de l'*état* dans lequel se trouve le système au moment de l'action, jouent un rôle important quant à la distinction entre l'information pertinente et celle qui l'est moins, mais aussi au niveau de sa rapidité d'analyse. C'est une façon d'appréhender les différences que l'on peut observer entre les sujets experts et les sujets novices.

La « *flèche du temps* » joue donc un rôle constructif essentiel et se trouve à l'origine des mécanismes de l'anticipation utilisée par notre cerveau.

¹ Prigogine & Stengers, 1979

² Prigogine, 1982

V.3. Anticipation et action visuo-motrice

V.3.1. Au cours de la locomotion

Considérée comme outil de navigation, la stratégie d'anticipation se caractérise par une synergie mettant en jeu les composantes du regard, à savoir les mouvements des yeux et de la tête. Le SNC pilote ces deux entités de façon à ce qu'il puisse orienter le trajet locomoteur en tenant compte des obstacles qui pourraient se trouver sur ce trajet. L'orientation anticipée du regard vers l'objectif sert alors d'entrée pour la régulation du mouvement des membres inférieurs, sur laquelle on sait que l'intentionnalité a une influence directe (Bonnard & Pailhous, 1993; Capaday *et al.*, 1999). Par contre, lorsque la vision est occultée, ce sont les entrées vestibulaires qui sont utilisées pour gérer les trajectoires locomotrices (Glasauer et coll., 2002).

Lorsque nous sommes distrait(e)s (mauvaise prise d'information), il nous arrive de nous cogner le pied dans la bordure du trottoir. Cet événement non prévu entraîne notre déséquilibre, voire notre chute. Alors que si nous avons pris suffisamment tôt l'information, nous aurions ajusté la longueur de notre pas et/ou la hauteur du lever du pied. Ceci illustre de façon très simple cet aspect du contrôle de nos mouvements lorsque certains événements surviennent brutalement : **l'imprévu est synonyme de réaction alors que le prévu est synonyme d'anticipation**. Une stratégie de déviation anticipée de la tête par rapport à un repère spatial permet de pallier en partie cet imprévu. Elle permet également de construire un référentiel mobile dans la direction future du trajet locomoteur car le SNC a besoin d'une certaine stabilité du champ visuel pour pouvoir interpréter les informations émanant de notre environnement. Si celle-ci peut se faire à l'avance, le gain de temps au niveau des éventuelles modifications à prévoir sur la trajectoire et/ou les coordinations musculaires responsables de la modulation des mouvements de nos segments, n'en sera que plus bénéfique.

V.3.2. Au cours de la capture d'objet

Dans ce genre de tâche, il est préférable de savoir, voire de prévoir, vers où l'objet se dirige et à quelle vitesse afin de pouvoir l'attraper dans les meilleures conditions, tant cinématique que dynamique. Les vitesses de nos segments peuvent ainsi rester dans des limites où la contrôlabilité est la meilleure et les contractions musculaires, permettant d'augmenter la raideur d'un membre, peuvent être dosées de façon optimale.

Le SNC se trouve alors confronté à un problème essentiel : le temps nécessaire à la prise d'information, car ce délai ne peut être annulé. Cela oblige ainsi notre cerveau à anticiper certains aspects des événements auxquels il doit faire face. Pour y parvenir, il peut prendre des informations avant d'exécuter la tâche et/ou construire des modèles internes de l'environnement et des objets qui l'entoure pour faciliter, voire d'accélérer l'analyse de l'information sensorielle pour prendre la meilleure décision.

Nous avons vu l'influence de la présence ou de l'absence de certaines informations sur l'attraper et la capture de balle. Le fait de disposer d'informations *a priori* (comme par exemple à quelle hauteur l'objet est lâché, à quelle vitesse il tombe, si la vitesse change d'un essai à l'autre, etc.) change de façon significative la régulation des synergies qui sous-tendent la stratégie utilisée par le SNC, tant de l'anticipation de l'impact de la balle dans la main que de la cinématique de la main dans la capture de la barre. De même, la connaissance *a priori* de la masse de l'objet permet de s'assurer que le contrôle de la raideur sera optimal et permettra de garder la balle dans la main au moment du contact par l'ajustement de l'activité musculaire : trop de raideur et la balle rebondit dans la main sans qu'on ait le temps de la saisir, trop de compliance et la balle entraîne la main vers le bas qui la laissera certainement échapper.

Le SNC est capable d'une rapidité d'adaptation étonnante puisque, au mieux, un seul essai lui suffit pour ajuster l'ensemble des synergies musculaires liées au contrôle de l'impédance du bras dans la capture de la balle en chute libre. Cette performance est liée vraisemblablement à l'utilisation d'un modèle interne de l'influence de la gravité sur la chute des objets. Ce modèle fonctionnerait à partir de plusieurs entrées (notamment hauteur de lâcher, temps e/ou vitesse de chute), chacune d'elle ayant un poids différent qui influence la **qualité des prévisions** faites par le SNC pour **pallier, entre autre, les délais visuo-moteurs**.

Cette orientation de nos conclusions vers une théorie du contrôle moteur basée sur l'utilisation de modèles internes et d'informations *a priori*, plutôt qu'une théorie basée sur une fonction utilisant une variable de type τ , pour interpréter nos résultats vient du fait qu'ils ont été corroborés par ceux de l'expérience de capture de balle réalisée avec le KINELITE® (**Figure V-1**) en microgravité (McIntyre *et al.*, 2001). L'hypothèse de l'utilisation d'un modèle interne de la gravité (modèle de 2nd ordre incluant vitesse et accélération) pour l'estimation de t_c (**Figure V-2**) prévoit les résultat observés en 0g (**Figure V-3**).

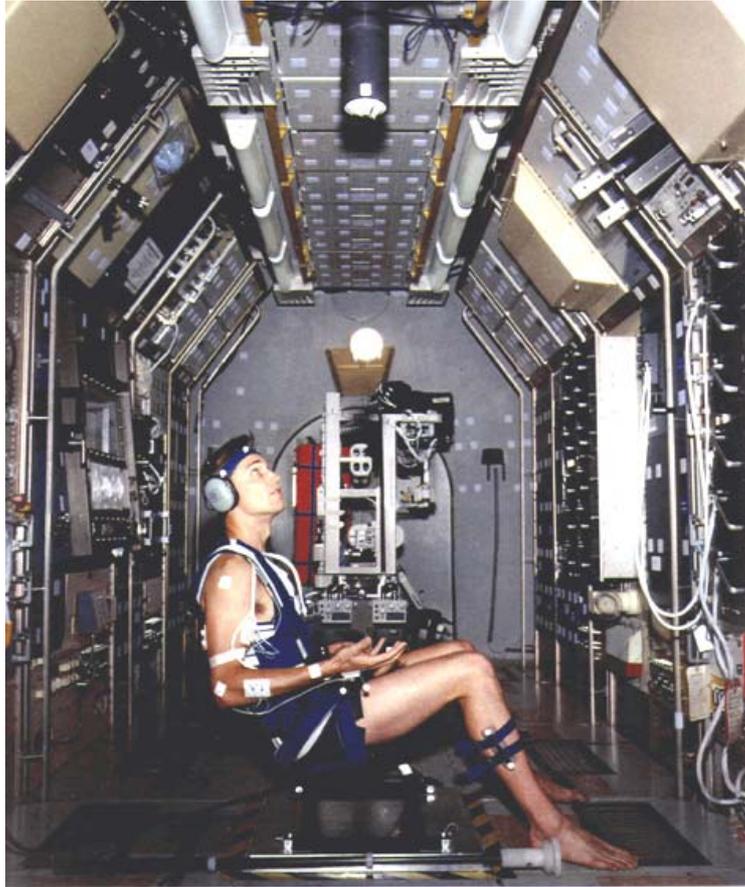


Figure V-1. Le système KINELITE® utilisé pour les expériences d'attraper de balles.

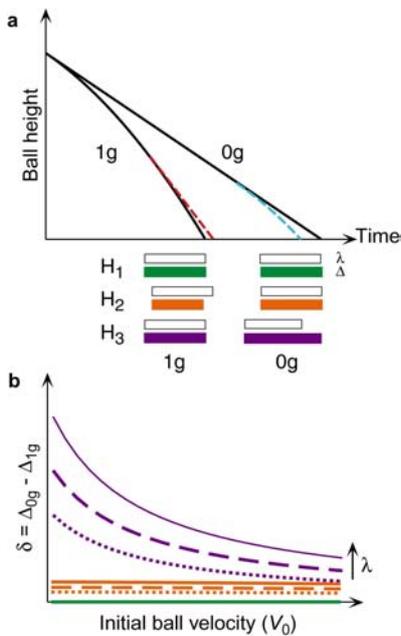


Figure V-2. Test de l'estimation de t_c durant l'attraper de balle en 0g. (a) Hauteur de balle par rapport au temps en 0g et 1g. Lignes en tiret : temps d'impact attendu pour une estimation de t_c de 1^{er} ordre appliquée en 1g (rouge) et un modèle de interne 1g de 2nd ordre appliqué en 0g (bleu). Barres blanches : seuil fixe de t_c (λ) aligné par rapport à l'impact. Barres colorées : délai de réponse (Δ) par rapport à l'impact actuel pour trois hypothèses différentes. H₁, estimation exacte de t_c basée sur une mesure en temps réel de l'accélération ; les réponses sont toujours déclenchées au même moment par rapport à l'impact ($\Delta_{1g} = \Delta_{0g} = \lambda$). H₂, estimation de 1^{er} ordre de t_c ; la balle arrive plus tôt que prévu en 1g ($\Delta_{1g} < \lambda$). H₃, modèle interne de la gravité de 2nd ordre ; la balle arrive plus tard que prévu en 0g ($\Delta_{0g} > \lambda$). Décalages temporels prévus (δ) en 0g vs. 1g pour différentes valeurs de λ . H₁ prédit aucune différence ($\delta=0$). H₂ et H₃ prédisent des réponses précoces par rapport à l'impact en 0g ($\delta>0$) ; l'augmentation de λ entraîne celle de δ . Les décalages prévus par H₃ sont plus importants pour un λ donné, et augmentent plus rapidement quand V_0 tend vers 0, comparé à H₂ (In McIntyre et al., 2001).

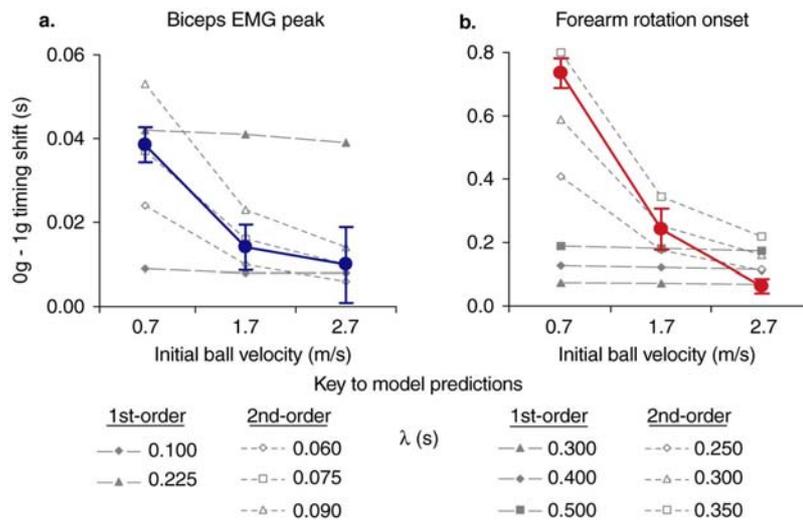


Figure V-3. Le déclenchement des rotations de l'avant-bras et de l'activité EMG du biceps comparés aux prédictions des modèles de premier et second ordre pour différents seuils de t_c (λ). Chaque point représente l'avance de la synchronisation (δ) en 0g pour (a) le pic d'EMG du biceps et (b) les mouvements anticipés de l'avant-bras, moyennés sur tous les sujets et les sessions (± 1 s.e.m.) (In McIntyre et al., 2001).

Le t_c serait donc estimé à l'aide de multiples informations dont le poids diffère en fonction du contexte (Heuer, 1993). Le SNC peut alors choisir l'information la plus appropriée pour estimer ce temps à l'impact et déclencher au moment adéquat les actions musculaires désirées. Dans le cadre de la chute libre, il s'agit plutôt d'un modèle interne de notre environnement physique dans lequel les mouvements vers le bas sont accélérés.

V.4. Projection dans le futur

A l'évidence, les expériences menées en microgravité (temporaire avec les vols paraboliques ou permanente avec les vols orbitaux) peuvent nous apporter des éclairages intéressants, voire décisifs d'un point de vue théorie du contrôle moteur, sur la façon dont le cerveau utilise les informations *a priori* en les combinant à ses modèles internes, pour les intégrer (*) dans l'élaboration, la programmation et l'exécution de nos mouvements, (**) l'anticipation les effets de nos actions motrices ou (***) l'initiation du mouvement (Papaxanthis *et al.*, 1998; Pozzo *et al.*, 1998).

Après l'attraper de balle bras « immobile », il pourrait être envisagé de faire une expérience de type « lâcher de barre » en 0 g afin de recueillir un supplément d'information concernant le contrôle de la cinématique de la main lors de l'attraper d'un objet en mouvement vertical. La comparaison de celle-ci pour des « chutes » réalisées à des vitesses différentes qui se feraient avec à une « vraie » vitesse constante (chose que l'on ne peut avoir lors d'un lancer en 1 g puisque la gravité fait toujours courber les trajectoires des objets et introduit de ce fait une composante verticale qui vient compliquer l'analyse).

Enfin, nous voudrions terminer en insistant sur l'éclairage mutuel que des différentes disciplines (dont les centres d'intérêts diffèrent de prime abord) peuvent apporter à la compréhension des mécanismes qui sous-tendent l'élaboration des stratégies d'anticipation. Cette collaboration peut s'avérer très riche à l'instar de celle que nous avons eue dans le cadre de notre dernière expérience et dont l'objectif était de voir si les humains attrapaient les objets comme les roboticiens l'avaient « appris » à leurs robots. Les algorithmes qu'ils créent peuvent fournir des idées intéressantes pour étayer nos réflexions en vue d'une compréhension plus poussée des mécanismes qui régissent les actions que nous entreprenons.

La possibilité de choisir de façon anticipée la meilleure des stratégies, en fonction du contexte dans lequel se déroule l'action motrice, est à l'évidence le gage d'une adaptabilité et d'une souplesse permanentes, qui est à l'origine de bon nombre de performances humaines, notamment dans le sport. Gageons que les collaborations avec le milieu sportif pourront nous offrir d'autres occasions d'explorer plus avant ces stratégies d'anticipation pour enrichir nos connaissances sur cette capacité étonnante du cerveau..