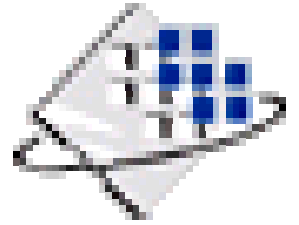


UNIVERSITÉ DE PARIS XI  
Centre Scientifique d'Orsay  
Services des Etudes Doctorales  
Bâtiment 301  
91405 ORSAY Cedex



## RÉSUMÉ DE LA THÈSE DE DOCTORAT

MATHEMATIQUES \* INFORMATIQUE \* CHIMIE \* CHIMIE PHYSIQUE \*  
SCIENCE DE LA TERRE \* SCIENCE DE LAVIE \* PHYSIQUE

**Présentée par Monsieur :**

**NOM :** PREVOST

**Prénom :** PASCAL

**☎ :** 0144271298

**Thèse préparée au :**

Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action (Collège de France, Paris, 05)

**Sous la direction de M.** Alain BERTHOZ **son directeur de recherches.**

**SOUTENANCE DE THÈSE AYANT POUR JURY :**

BARDY Benoît (Président)  
BERTHOZ Alain (Directeur)  
CHERON Guy (Rapporteur)  
LESTIENNE Francis (Examineur)  
McINTYRE Joe (Examineur)  
POZZO Thierry (Rapporteur)

**Sujet :**

STRATEGIES D'ANTICIPATION ET ROLE DU CONTEXTE DANS LES  
TÂCHES VISUO-MOTRICES

**Date et lieu de soutenance sur Orsay :** 10 décembre 2002 à 10h30

Notre travail de recherche s'inscrit dans une démarche relativement récente consistant à aborder les problèmes complexes de l'interaction entre l'homme en mouvement et son environnement. Cette approche implique que l'on utilise des méthodes d'exploration plus « naturelles » pour mettre en évidence la façon dont notre cerveau contrôle les mouvements. Elle nécessite notamment de mettre le sujet dans une situation aussi proche que possible de celles qu'il peut rencontrer dans la vie quotidienne et/ou d'utiliser des protocoles imposant un minimum de contraintes aux mouvements lors de l'exécution d'une tâche donnée. Les progrès dans le matériel d'analyse du mouvement en 3D, très souvent couplé à un système d'enregistrement de l'activité électrique des muscles, ont permis cette évolution.

Nous nous sommes intéressés à deux tâches visuo-motrices : la navigation et la capture d'objets en chute libre. Ces deux tâches, comme la plupart de nos mouvements, sont orientées de façon implicite ou explicite vers un objectif. Or, le but à atteindre est un élément central de toutes nos actions motrices. Il est à l'origine 1°) des choix que l'on peut faire compte tenu des circonstances dans lesquelles se déroulent l'action et 2°) de la planification de nos mouvements de telle ou telle façon.

Pour choisir et planifier, le cerveau doit prendre en compte les conditions initiales dans lesquelles vont se faire les actions. Ces conditions concernent tant l'environnement (relations environnement-objet-corps) que la configuration de notre corps (relations intersegmentaires). C'est à ce niveau qu'interviennent les informations sensorielles. La proprioception donne une information relative à l'état dans lequel se trouve le système moteur avant et pendant l'action. Le système vestibulaire fournit des informations absolues permettant de lever l'ambiguïté entre nos mouvements propres et ceux des objets ou de l'environnement. La vision constitue un canal sensoriel privilégié en ce sens qu'il permet d'explorer notre environnement et ainsi de prévoir ce qui peut se passer, donc d'anticiper. La mémoire spatiale présente la particularité de permettre la fusion des informations précédentes lorsque la vision est absente. Mais ces informations ne le renseignent que sur « ce qui est » et non sur « ce qui peut être fait ». De plus, elles ne sont accessibles qu'après un certain délai. C'est pourquoi d'autres facteurs vont avoir leur importance, notamment la capacité de notre cerveau à prendre en compte les informations déjà disponibles (informations *a priori*) pour prédire ce qui peut se passer, simuler des événements et trouver ainsi une solution au problème qui lui est posé.

Dans ce contexte théorique, nous considérons l'anticipation comme la possibilité d'optimiser nos actions (gain de temps) à partir de l'extrapolation de ce qui peut être fait. C'est une façon séduisante de faire face aux délais des informations sensorielles.

L'objectif de notre thèse est d'étudier la façon dont l'ensemble des opérations coordonnées et menées pour atteindre un but (stratégie) est influencé par ce dernier et, parallèlement, de comprendre comment l'ensemble des éléments ou circonstances présents au moment de l'action (contexte) peuvent moduler ou non cette stratégie.

## **ANTICIPATION ET NAVIGATION**

### ***L'anticipation de la tête se fait quelle que soit la direction du virage et la vitesse de locomotion :***

Dans un premier groupe d'expérience, nous avons proposé à nos sujets de parcourir un trajet entre une position A à une position B tout en contournant un obstacle (trajectoire à 90°). Nous avons observé que, dans le plan horizontal, le changement de direction de la tête anticipait systématiquement celui de la trajectoire du corps : elle tournait avant que le point du virage ne soit atteint, c'est-à-dire avant d'arriver à la position correspondant au maximum de courbure de la trajectoire (au point moyen entre les deux segments rectilignes du trajet global). Cette anticipation était présente quelles que soient les conditions de virage (gauche, droite) et de vitesse de locomotion (lente, normale, rapide).

Sur les deux portions rectilignes du trajet, la tête est stabilisée dans l'espace afin de faciliter l'interprétation des informations recueillies (visuelles, vestibulaires, proprioceptives). Pour gagner du temps sur le changement de direction de notre corps au cours d'un virage, la tête change de direction de façon anticipée afin de pouvoir stabiliser à nouveau le référentiel dans la seconde partie (rectiligne) du trajet locomoteur. Cette anticipation se manifestait par une orientation de la tête dans la partie interne de la courbure de la trajectoire. La tête n'était donc pas orientée vers l'objectif final mais vers une position future que le corps allait occuper quelques secondes ou milli-secondes plus tard.

Nous avons alors émis l'hypothèse que ce comportement devait être le reflet des mouvements du regard puisque ce dernier correspond à la somme des mouvements céphaliques et oculaires. Nous en avons déduit que le contrôle anticipé du regard constituait un élément clé des tâches de navigation en ce qu'il participait à la construction des trajectoires futures en tenant compte de la configuration de l'environnement. Mais, ce comportement pourrait tout aussi bien être lié à l'utilisation du flux optique comme cela est proposé par les théories dites écologiques.

### ***L'anticipation du regard ne semble pas liée au flux optique puisqu'elle est présente même en vision occultée***

Nous avons alors demandé aux sujets de réaliser la même tâche en vision occultée et en vision normale en mesurant à la fois les mouvements de la tête et des yeux dans le plan horizontal afin d'obtenir la direction du regard. Si l'anticipation est effectivement pilotée par les informations issues de la vision comme le flux optique, elle ne devrait plus être présente en l'absence de vision.

Tel n'a pas été le cas. La tête anticipait les changements de direction quelles que soient les conditions de vision. Le fait que les sujets étaient capables de se rendre à la position d'arrivée en vision occultée pourrait s'expliquer par l'utilisation des informations contenues dans la mémoire spatiale. Une fois l'objectif locomoteur mémorisé, le sujet réussissait ainsi à avancer vers lui les yeux fermés ; sa position pouvant être réactualisée par l'utilisation des informations proprioceptives et vestibulaires. Une autre hypothèse serait que cette anticipation de la tête n'en est pas une. Elle serait

simplement liée à la dynamique de la locomotion qui trouverait son origine dans les différences d'inertie intersegmentaires (la tête étant plus légère que le tronc, elle tournerait vers la partie interne de la courbure de la trajectoire avant le reste du corps).

***L'anticipation de la tête ne semble pas liée à la dynamique de la locomotion puisqu'elle apparaît également durant la marche à reculons.***

Pour tester cette hypothèse, nous avons demandé aux sujets de marcher à reculons de la position d'arrivée à la position de départ avec les yeux ouverts puis les yeux fermés, le tout pendant un trajet comportant un virage à droite.

Nous avons observé que la tête anticipait les changements de la trajectoire en avant comme en arrière, les yeux ouverts comme les yeux fermés. Les synergies mises en évidence lors de la marche en avant n'étaient pas simplement inversées en marche arrière, comme si l'on avait passé un film à l'envers. Au contraire, le patron de mouvement ressemblait plutôt à ce que l'on aurait obtenu si l'on avait demandé aux sujets de marcher en avant de la position d'arrivée à la position de départ, en faisant un virage à gauche. De nouveau, le regard s'orientait vers la trajectoire future. Par contre, lors de la marche arrière les yeux fermés, la tête était quasiment fixe sur le tronc et n'anticipait pas les changements de trajectoire. Nous avons fait l'hypothèse qu'elle devait refléter le besoin de préparer un référentiel de navigation stable, centré sur l'acteur.

***L'anticipation de la tête est contrôlée à partir d'informations spatiales et non temporelles.***

Dans une dernière analyse, nous avons pu mettre en évidence que le déclenchement de cette anticipation de la tête se faisait à une distance fixe par rapport au point du virage quelle que soit la vitesse de locomotion. Ce résultat est conforme à ce que nos collègues ont montré au cours d'une expérience de navigation en réalité virtuelle.

***L'anticipation de la tête est une stratégie présente chez les enfants mais qui n'est utilisée systématiquement qu'à partir de 7 ans***

Nous avons enfin demandé à deux groupes d'enfants, d'âge inférieur à 7 ans et supérieur à 7 ans, de réaliser la même tâche que les adultes.

Nous avons observé que la stratégie d'anticipation de la tête était présente chez les plus jeunes enfants (3.5 ans). Elle était systématiquement utilisée chez les enfants âgés de plus de 7 ans tout en étant moins précoce que chez les adultes.

Cette présence précoce mais immature corrobore ce qui a pu être démontré dans d'autres tâches où l'anticipation est présente (contrôle postural, initiation de la marche).

***Conclusion***

Nous avons montré que la stratégie d'anticipation du mouvement de la tête (du regard) fait partie intégrante du patron moteur de la locomotion curvilinéaire. D'une façon plus générale, elle constitue un invariant des tâches de navigation. Cette stratégie permet de stabiliser la tête plus rapidement vers la seconde partie de la trajectoire.

Les entrées permettant de piloter cette stratégie anticipée d'orientation pourraient être multiples : égocentriques (angle entre l'orientation du tronc et l'orientation de la position finale), proprioceptives (direction de la tête par rapport au reste du corps), visuelles et exocentriques (mémoire de la position finale). Ainsi, même les yeux fermés, cette stratégie est encore utilisée. Nous pensons qu'elle participe à la construction de la trajectoire locomotrice. Mais, il nous semble que le rôle principal de cette stratégie soit de préparer un référentiel stable pour la navigation, centré sur le point de vue du sujet, afin de faciliter l'interprétation des informations dans la nouvelle direction locomotrice une fois passé le virage.

Cette invariance présente la caractéristique d'être déclenchée à une distance relative fixe par rapport au point du virage quelles que soient la vitesse de marche. Ce dernier aspect de nos résultats est en désaccord avec des théories plus populaires (modèle utilisant le flux optique) concernant le rôle de la vision dans le guidage de la direction locomotrice. Ce résultat met en évidence le rôle des repères et/ou de la direction égocentrique dans cette stratégie d'orientation anticipée. Ces données corroborent également la stratégie « aller-là-où-l'on-regarde » proposée par notre laboratoire.

Enfin, cette stratégie est sujette à un processus de maturation très certainement lié à celui du contrôle de l'équilibre dynamique durant la locomotion. Elle devient similaire à celle de l'adulte à partir de 7 ans environ. C'est également à cet âge que les enfants possèdent les mêmes caractéristiques biomécaniques que les adultes au niveau locomotion.

**ANTICIPATION ET CAPTURE D'OBJET EN CHUTE LIBRE**

Prédire la position future d'un objet en mouvement est un comportement mettant en jeu des mécanismes d'anticipation tels que ceux déjà mis en évidence dans la poursuite oculaire. Dès qu'un signal dans notre environnement est prédictible, le système nerveux en tire profit pour éviter un surcoût de calculs. La capture d'objet nous offre la possibilité d'explorer ces mécanismes.

Dans ce second groupe d'expériences, nous avons voulu savoir quels types d'informations le cerveau utilisait pour estimer le temps restant avant le contact ( $T_C$ ) de l'objet dans la main. Cette estimation est importante pour synchroniser les actions motrices en vue d'atteindre l'objectif : positionner la main au bon endroit et au bon moment. Les paradigmes expérimentaux et les modèles théoriques généralement utilisés pour décrire ce genre de tâches privilégient les informations continues en vue d'estimer le temps avant contact ( $T_C$ ) de l'objet et la main. Pour que ces modèles fonctionnent, il faut que l'objet soit en déplacement à vitesse constante. Mais ce n'est qu'un cas particulier. On peut être confronté à des situations plus générales comme celles que l'on rencontre en sport. Lors de son vol, la balle n'a une vitesse constante qu'au niveau de sa composante horizontale puisque aucune force n'agit sur elle (principe d'inertie).

Par contre, la composante verticale n'est jamais constante puisqu'elle est soumise à l'influence de la force de gravité. Elle est donc constamment accélérée durant sa chute. Dans ce cas, les théories utilisant la variable optique  $\tau$  (Lee, 1980) prédisent que plus la balle tombera de haut et plus la synchronisation des actions de capture débutera tôt.

Pourtant, dans une étude réalisée en 1988, Lacquaniti et Maioli ont montré que l'activité musculaire commençait toujours au même moment par rapport à l'impact (environ 100 ms). Elle était donc ajustée sur le vrai  $T_C$ . Un autre aspect intéressant de leurs résultats était que la quantité d'EMG moyen 50 ms avant l'impact était proportionnelle à la quantité de mouvement (QDM) théorique au moment du contact. Ils en ont déduit que cette réponse anticipée était contrôlée non pas par la variable optique  $\tau$  mais plutôt sur une estimation instantanée du vrai  $T_C$ . Or, cette estimation (que l'on obtient à partir de la formule :  $T_C = d - v(t) / g$ ) nécessite d'avoir accès à la fois à la vitesse instantanée de l'objet mais aussi à l'accélération de la gravité. La constante  $g$  est un paramètre que l'on côtoie dans notre vie quotidienne et que certains capteurs sont à même de mesurer. Ainsi, les informations visuelles pourraient être utilisées conjointement à des représentations internes à la fois des propriétés de l'objet sur lequel on agit et de l'environnement (trajectoires, lois de mouvement) dans lequel se déroule l'action. En poussant plus loin l'analyse de leurs données, nous pourrions également inclure une part d'apprentissage dans cette anticipation puisque les essais étaient proposés en bloc.

Nous sommes partis de ces constatations et avons utilisé un nouveau matériel (Kinelite®) développé pour réaliser des expériences d'attraper de balle en microgravité en vue de tester si la gravité est utilisée dans ce genre de tâches. Il permet de projeter une balle vers le bas (grâce à un canon renfermant un ressort) à différentes vitesses (fonction de la compression donnée au ressort) tout en ayant la même hauteur initiale. Par conséquent, nous avons, à l'inverse du protocole de Lacquaniti et Miaoli (5 hauteurs ; vitesse initiale nulle), une même hauteur de lâcher pour différentes vitesses initiales. De plus, il était possible de présenter les essais de façon aléatoire (ALEA) ou en bloc (BLOC) afin de vérifier l'effet de l'apprentissage. Nous avons analysé les activités électriques du muscle *biceps brachii* (*premium movens* de la flexion du coude) en nous focalisant 1° sur le moment de leur initiation (mesuré avec la même méthodologie que Lacquaniti et Maioli) et 2° sur leur intensité moyenne 50 ms avant l'impact.

### ***Le calibrage temporel de l'activité EMG anticipée se fait à partir d'informations mesurées en temps réel***

En analysant les EMG du muscle *biceps brachii*, Nous avons d'abord constaté que l'initiation des EMG se faisait toujours de façon anticipée (en moyenne 100 ms avant l'impact). La vitesse de la balle était donc mesurée en temps réel, que les essais soient présentés aléatoirement ou en bloc.

### ***Le calibrage dynamique de l'activité EMG anticipée est fonction de la QDM théorique à l'impact***

Nous avons trouvé une relation linéaire entre la QDM théorique et la quantité d'EMG moyen 50 ms avant l'impact. La pente de cette relation était plus importante que celle calculée par Lacquaniti et Maioli et ne passait donc pas par zéro. Il existe une différence qualitative dans la finesse de l'ajustement de des activités EMG anticipées qui semble influencée par les conditions initiales.

### ***L'activité EMG anticipée fait intervenir une part d'apprentissage***

Nous n'avons pas trouvé de différences entre les sessions ALEA et BLOC, tant pour les anticipations. Par contre, nous avons noté que l'intensité moyenne des EMG BLOC était inférieure à celle des EMG ALEA. De plus, une nette diminution de l'activité EMG survient après 1 à 3 essais selon les vitesses de chute. Ainsi, une mémoire dynamique serait à l'œuvre dans les processus permettant d'optimiser l'intensité des EMG par rapport à la force d'impact de façon anticipée.

### ***L'anticipation de l'activité EMG semble mettre en jeu à la fois des informations continues et a priori***

Dans une seconde expérience, nous avons souhaité tester l'hypothèse relative à l'utilisation d'informations *a priori* que suggère la différence de pente de la relation QDM/EMG. Nous n'avons demandé aux sujets d'attraper une balle tombant de 3 hauteurs différentes en leur donnant la possibilité de voir la position initiale de lâcher ou en la leur masquant à l'aide d'un tube. Cette seconde condition se rapproche de la tâche demandée avec le Kinelite® puisque le tube avait la même longueur dans tous les cas. Les essais ont été présentés de façon aléatoire dans les conditions AVEC et SANS tube.

A nouveau, nous avons trouvé un calibrage temporel et dynamique de l'activité EMG anticipée. Par contre, la pente de la relation linéaire entre EMG et QDM était plus proche de la relation idéale passant par l'origine. Nous en avons déduit que l'information *a priori* avait une influence sur la façon dont le SNC anticipait et modulait la coordination des actions d'attraper.

### ***La stratégie de contrôle de la cinématique de la main dans la capture d'un objet accéléré est très similaire à celle une tâche de poursuite nécessitant la mise en jeu de mécanismes prédictifs.***

Dans une dernière expérience, les sujets devaient attraper une barre en chute libre. Au départ, ils avaient leur coude collé à la hanche, coude fléchi à 90°. La barre était lâchée à deux hauteurs (NORM pour la hauteur d'épaule ou HAUT pour une hauteur initiale de 2.5 m du sol) soit par le sujet lui-même (SEUL), soit par l'expérimentateur (EXPE), à une distance du plan frontal égale à leur longueur de bras.

Nous avons observé des trajectoires plutôt linéaires lors des lâchers faits à hauteur normale et des trajectoires principalement curvilignes dans les lâchers faits à hauteur plus importante. La décélération de la main se faisait généralement juste après le moment de l'impact dans la condition SEUL et avant dans la condition EXPE. Dans tous les cas, la trajectoire finale de la main s'alignait sur celle de la barre (verticale de la gravité) avant qu'elle ne soit saisie.

Enfin, bien que peu différentes dans la condition où le sujet attrapait la barre à hauteur normale, les vitesses verticales et tangentielles de la main et de la barre n'étaient pas corrélées entre elles au moment de la saisie.

L'angle d'approche entre la main et la trajectoire variant durant le mouvement, nous en avons déduit que son déplacement n'était pas régulé par une stratégie à angle constant comme cela a été proposé pour des captures de balle sur des trajectoires paraboliques.

Le changement d'orientation de la trajectoire de la main pour s'aligner sur celle de la barre correspond plutôt à une stratégie de poursuite. Pour qu'elle puisse se faire, il faut que certains paramètres aient été estimés à l'avance (direction de la trajectoire, vitesse et/ou accélération de l'objet, hauteur d'interception par rapport aux possibilités d'allonge du bras et aux délais liés à son inertie). Ce faisant, le SNC limite la marge d'erreur à l'attraper et diminue la perturbation liée à l'impact de l'objet dans la main ; deux facteurs qui contribuent à augmenter les chances de réussite de la capture compte tenu des délais dont il dispose pour faire son mouvement.

### **Conclusion**

L'analyse des activités musculaires et de la cinématique de la main au cours d'attraper ou de capture d'objets en chute libre, a permis de mettre en évidence plusieurs stratégies d'anticipation. Cette modulation se faisait à partir d'informations extraites pendant le mouvement et d'informations extraites de l'environnement avant le début du mouvement. Ces informations *a priori* seraient à l'origine du choix de la stratégie la mieux adaptée par rapport aux conditions initiales de l'action.

Ces informations *a priori* comprennent des informations spatiales (position initiale de l'objet), cinématiques (trajectoire, vitesse) et peut-être des informations liées à la modélisation des effets de la gravité sur les objets en chute libre (notamment accélération vers la bas) pouvant être utilisées pour affiner les estimations du temps restant au contact.

Nos résultats sont à nouveau en désaccord avec les théories traditionnellement proposées pour expliquer les coordinations visuo-motrices dans les tâches de capture d'objet. La vision n'étant pas la seule information utilisée dans la capture d'objet, les modèles basés sur la variable optique  $\tau$  devraient être complétés ou affinés par l'introduction d'informations *a priori* dont nous avons montré les effets sur les stratégies d'anticipation durant la capture d'objet.

## **CONCLUSION GÉNÉRALE**

Notre travail a permis de mettre en évidence des stratégies principalement anticipatrices au cours d'action visuo-motrices que l'on peut rencontrer dans la vie quotidienne : navigation et capture d'objet. Ces stratégies s'inscrivent dans un mode de fonctionnement de notre SNC qui, selon les théories les plus récentes, est similaire à celui d'un simulateur.

La simulation est la capacité de prédire ce qui **peut** ou **va se passer** (modèle du futur) en puisant dans sa mémoire (modèle du passé-présent) et en faisant des hypothèses sur ce que l'on peut faire le moment présent. Selon Bernstein (1957), c'est grâce à l'interaction entre ces modèles que l'on peut anticiper.

Sans le savoir, il a précédé le physicien prix Nobel de physique Ilya Prigogine (Prigogine et Stengers, 1979 ; Prigogine, 1982) dans son analyse de la métamorphose des sciences. En effet, c'est lui qui 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 initiale.** Il augmente ainsi la justesse de ses prédictions. Une façon pour le moins séduisante pour prévenir les délais liés à la transmission des informations sensorielles.

Dans le choix des possibles qui s'offrent à lui, deux facteurs vont jouer un rôle important quant à la capacité à distinguer l'information pertinente et de celle qui l'est moins : son expérience antérieure et sa connaissance de l'état dans lequel se trouve le système et/ou l'environnement au moment de l'action. Ces deux facteurs vont avoir aussi une influence sur la rapidité d'analyse. C'est une façon d'appréhender les différences que l'on peut observer entre les sujets experts et les sujets novices. Toute se passe comme si l'information *a priori* jouait le rôle d'un enzyme dont l'action principale est d'accélérer les réactions pour arriver au résultat désiré.

**La « flèche du temps » jouerait un rôle constructif essentiel et serait à l'origine des mécanismes d'anticipation utilisés par notre cerveau.**