



HAL
open science

Motricité et perception visuelle des mouvements humains : expériences chez l'adulte, l'enfant et le patient parkinsonien

Christel Bidet-Ildei

► **To cite this version:**

Christel Bidet-Ildei. Motricité et perception visuelle des mouvements humains : expériences chez l'adulte, l'enfant et le patient parkinsonien. Psychologie. Université Pierre mendès France, Grenoble II, 2006. Français. NNT: . tel-01773523

HAL Id: tel-01773523

<https://hal.science/tel-01773523>

Submitted on 22 Apr 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université Pierre Mendès France
Laboratoire de Psychologie et NeuroCognition, CNRS- UMR 5105
Ecole Doctorale d'Ingénierie pour la Santé, la Cognition et l'Environnement

Thèse de doctorat
Spécialité
Sciences Cognitives
Présentée par
Christel ILDEI-BIDET

**Motricité et perception visuelle des
mouvements humains : expériences chez l'adulte,
l'enfant et le patient parkinsonien**

Soutenance publique le 08/12/2006

Directeur de thèse : Pr Jean-Pierre Orliaguet

Composition du jury

Yann Coello,	Professeur, Université Charles de Gaulle, Lille3-Rapporteur
Edouard Gentaz,	Chargé de recherche CNRS, LPNC, Grenoble
Jean-Pierre Orliaguet,	Professeur Emérite, Université Pierre Mendès France, Grenoble 2
Arlette Streri,	Professeur, Université René Descartes, Paris 5-Rapporteur
Jean-Luc Velay,	Chargé de recherche CNRS, INRC, Marseille

Publications réalisées durant la thèse

Articles

Ildei, C., Orliaguet, J-P, Sokolov, A., Pavlova, M. (2006). Perception of biological motion of elliptic form, *Perception*, p 1137-1149.

Bidet-Ildei, C., Meary, D. and Orliaguet, J-P. (Sous-presse) Perception of elliptic movements in 7-to-11 year old children: Evidence of motor-perceptual interactions, *Current Psychology letters*.

Valdois, S., Bidet-Ildei, C., Prado, C., Lassus, D., Orliaguet, J-P (En révision). New insights on developmental mixed dyslexia: Evidence from a single case study.

Communications

Bidet-Ildei, C., Orliaguet, J-P & Meary, D. (2006). Perception of elliptic movements in 7-to-11 year old children: Influence of motor rules. *29 th European Conference on Visual Perception*, St. Petersburg (Russia).

Pavlova, M., Bidet-Ildei, C., Sokolov, A., Braun, C. & Krägeloh-Mann, I. (2006). MEG response to biological motion in the right temporal cortex is modulated by periventricular lesions. *29 th European Conference on Visual Perception*, St. Petersburg (Russia).

Bidet-Ildei, C., Orliaguet, J-P., Sokolov, A., Pavlova, M. (2005). Perception of biological motion of elliptic form, in *Fechner Day 2005. Proceedings of the twenty-first Annual Meeting of the International Society for Psychophysics* Eds J.S. Monahan, S.M. Sheffert & J.T. Townsend pp 43-48

Bidet-Ildei, C., Meary, D. & Orliaguet, J-P. (2005). Perception of elliptic movements in 7-to-11 year old children, in *Fechner Day 2005. Proceedings of the twenty-first Annual Meeting of the International Society for Psychophysics* Eds J.S. Monahan, S.M. Sheffert & J.T. Townsend pp 39-42

Ildei, C., Meary, D. and Orliaguet, J-P. (2004). Influence of motor rules on the visual perception of human movement. *International Congress of Psychology*, Beijing (China).

RESUME

Cette thèse est consacrée à l'étude du rôle de la motricité dans la perception visuelle des mouvements humains. L'objectif est de montrer que les correspondances entre les performances motrices et les jugements perceptifs, contrairement à ce qui est postulé par les théories motrices de la perception, ne sont pas forcément dues à l'intervention du système moteur. Pour cela nous avons analysé d'une part les jugements perceptifs pour des stimuli dont la cinématique ne respecte plus les règles de production motrices et d'autre part les liens existant entre les capacités motrices et perceptives chez des populations présentant un niveau de développement moteur variable (enfants, patients atteints de la maladie de Parkinson). Ces travaux ont concerné uniquement les relations espace-temps telles qu'elles s'expriment dans les mouvements morphocinétiques (principe d'isochronie) et topocinétiques (loi de Fitts).

Les résultats indiquent que la modification de la cinématique des mouvements n'empêche pas le respect des règles motrices lors du jugement perceptif de mouvements d'ellipse ou de pointage de cible. Par contre, une perturbation très importante de la cinématique entraîne une modification du jugement des mouvements d'écriture. D'autre part, on observe des décalages entre les compétences motrices et les compétences perceptives chez les enfants et les patients parkinsoniens. Ces résultats suggèrent que la perception visuelle des mouvements humains n'implique pas systématiquement une intervention du système moteur. On constate en particulier que le type de mouvement (écriture vs mouvement d'atteinte de cible) et les propriétés des objets manipulés (verre vs cylindre) ont un effet très important sur le degré d'intervention du système moteur lors du jugement visuel de mouvements humains.

Mots clefs : Perception visuelle des mouvements humains, préférences perceptives, relation motricité-perception, écriture, mouvement elliptique, mouvement d'atteinte de cibles, mouvements non naturels, enfant, maladie de Parkinson.

RESUME EN ANGLAIS

This dissertation aims at analysing the role of motor-perceptual interactions in the visual perception of human movements. Most of studies showed that recognition of human movements was influenced by motor competences and then validated the motor theories of perception. The aim of our research was to demonstrate that visual perception of human movement does not necessarily depend on motor abilities and does not imply motor-perceptual interactions. The experiments consisted in analysing 1) the visual preferences for human movements which does not conform to the motor rules (unnatural movements) and 2) the influence of the level of motor competences on visual performances, in children and in patients presenting motor impairments (Parkinson's disease). Researches only focused on space-time relations which were observed in the morphocinetic (isochrony principle) and topocinetic (Fitts' law) movements.

The results indicate that the violation of the kinematics does not influence the visual judgement of elliptic or reaching movements. However, a significant disturbance of velocity profile modifies the visual preference in handwriting. In addition, we observed that the visual performances of children and those of patients with a Parkinson's disease are not totally dependent of motor competence. Taken together, the findings suggest that the motor system is not systematically involved in the visual perception of human movements. Particularly, the type of the movement (handwriting vs reaching movement) or the properties of the handled object (glass vs cylinder) has an influence on the implication of the motor system in visual judgements of human motions.

Key words: Visual perception of human movements, perceptual preferences, motor-perceptual interaction, handwriting, elliptic movement, reaching movement, unnatural movements, child, Parkinson's disease.

REMERCIEMENTS

La thèse est une aventure, et comme toute aventure il est difficile de la mener à bien sans soutien. Ce soutien, je le dois d'abord au ministère de la recherche et au CIES qui m'ont donné les moyens financiers de mener à bien ce travail sur trois années. Je le dois ensuite et surtout à mon directeur de thèse, Jean-Pierre Orliaguet qui m'a accompagnée, aidée, rassurée et remise dans le droit chemin depuis ma première année de Master. Il a toujours été là même quand il pensait que mes inquiétudes n'étaient pas fondées et que son emploi du temps était surchargé que ce soit pour répondre à des questions scientifiques ou personnelles. Pour cela, Je l'admire et je le respecte.

Ensuite, je tenais à remercier le laboratoire de Psychologie et NeuroCognition qui m'a accueillie pendant ces trois années et a mis à ma disposition l'ensemble de ses moyens matériels. De plus, le fait d'appartenir à ce laboratoire m'a donné l'opportunité de rencontrer des personnes formidables qui m'ont beaucoup aidée et soutenue toute au long de ce périple. En particulier je voudrais citer les membres de l'équipe action-perception et mes collègues doctorants. Je tenais également à souligner le travail des étudiants de Master 1 et 2 qui m'ont aidée à réaliser la majorité des expériences.

Je n'oublie pas non plus Marina Pavlova qui m'a très gentiment accueillie pendant deux mois au laboratoire de Psychologie et Neurobiologie de l'Université de Tübingen en Allemagne et qui m'a permis de me familiariser avec la technique de magnétoencéphalographie. Elle a toujours répondu présente quand le besoin s'en faisait sentir et ceci même après mon retour en France.

Je suis consciente également que rien de tout cela n'aurait pu aboutir sans l'aide de sujets volontaires pour les expériences. Dans ce registre, je tiens particulièrement à remercier les enfants de l'école de Chirens ainsi que leurs institutrices et les patients de l'hôpital de Grenoble pour qui les passations furent parfois contraignantes sans oublier les nombreux étudiants de l'université Pierre Mendès France.

Enfin, je tiens à remercier ceux qui m'ont épaulée quotidiennement, qui étaient là dans les moments de joie comme dans ceux de doute et de tristesse. Ils m'ont toujours aidée et soutenue quel que soit les problèmes auxquels je fus confrontée. Ce sont eux qui m'ont donné la force de continuer et de persévérer quels que soient les obstacles, merci maman, papa et Yohann.

Pour finir, achever cette aventure n'aurait pas été possible sans l'ensemble des membres du jury qui ont très gentiment accepté d'évaluer mon travail.

SOMMAIRE

Résumé.....	i
Résumé en anglais.....	ii
Remerciements.....	iii
INTRODUCTION.....	1
PARTIE I INTRODUCTION THEORIQUE	
<hr/>	
I.1 « Connaissance » des règles motrices.....	4
I.1.1 Perception visuelle des mouvements : connaissance des règles cinématiques.....	5
I.1.2 Perception visuelle des mouvements apparents : connaissance des contraintes biomécaniques ..	12
I.1.3 Perception visuelle d'un stimulus statique.....	13
I.2 Réseaux neuronaux impliqués dans la perception visuelle des mouvements humains	16
I.2.1 Voies visuelles.....	16
I.2.2 Circuits neuronaux impliqués dans la perception des mouvements biologiques	17
I.3 Liens motricité-perception	21
I.3.1 Etudes développementales	22
I.3.2 Pathologie.....	23
I.3.3 Etude de l'activité cérébrale.....	24
I.4 Théories motrices de la perception.....	29
I.4.1 Représentations motrices et Représentations perceptives.....	29
I.4.2 Rôle des contingences sensori-motrices : La théorie oculomotrice	32
I.5 Quelques données contradictoires : une alternative aux théories motrices de la perception ?	34
I.5.1 Etudes développementales	34
I.5.2 Etudes en neuropsychologie	35
I.5.3 Etudes animales	36
Notre recherche	39
PARTIE II EXPERIMENTATIONS	
<hr/>	
II.1 Influence de la cinématique sur les préférences perceptives : mouvements d'ellipse.....	42
II.1.1 Introduction.....	42
II.1.2 Méthode	44
II.1.3 Résultats	47
II.1.4 Conclusion.....	50
Résumé	52
II.2 Influence de la cinématique sur les préférences perceptives : mouvements de pointage ...	53
II.2.1 Introduction.....	53
II.2.2 Méthode	54
II.2.3 Résultats	56
II.2.4 Conclusion.....	58
Résumé	59
II.3 Etude des préférences perceptives : mouvements d'écriture et de pointage non naturels .	60
II.3.1 Introduction.....	60
II.3.2 Méthode	61
II.3.3 Résultats	64
II.3.4 Conclusion.....	69
Résumé	71
II.4 Production et perception des mouvements d'écriture chez l'enfant.....	72
II.4.1 Introduction.....	72
II.4.2 Méthode	73
II.4.3 Résultats	76
II.4.4 Conclusion.....	80
Résumé	81

II.5 Production et perception des mouvements d'Ellipse chez des patients atteints de la forme idiopathique de la maladie de Parkinson.....	82
II.5.1 Introduction.....	82
II.5.2 Méthode	86
II.5.3 Résultats	91
II.5.4 Conclusion.....	94
Résumé	96
PARTIE III DISCUSSION GENERALE	97
<hr/>	
Références bibliographiques	103
Annexes	111
Table des illustrations	140

INTRODUCTION

La reconnaissance des mouvements produits et leur interprétation par autrui jouent un rôle important dans la communication sociale. Elle permet par exemple de déterminer très rapidement l'état émotionnel des personnes avec lesquelles nous interagissons, d'anticiper un danger potentiel, et même de prévoir les gestes qu'une personne a l'intention de réaliser. De très nombreuses recherches, en particulier sous l'impulsion de G. Johansson (Johansson, 1973), ont cherché à préciser quels pouvaient être les mécanismes susceptibles d'expliquer une telle efficacité dans la perception et la reconnaissance des mouvements humains.

Une des orientations théoriques a consisté à montrer que la reconnaissance des mouvements humains ne relève pas uniquement d'un apprentissage visuel mais impliquerait une intervention du système moteur, notamment sous la forme d'une simulation motrice intériorisée. Ainsi, l'homme ne serait capable d'interpréter un geste que dans la mesure où il est capable de le simuler, c'est-à-dire en d'autres termes de se mettre à la place de l'autre. De nombreuses données sont venues étayer cette conception montrant notamment que le niveau de reconnaissance perceptive dépend au moins en partie du niveau de maîtrise du geste. Toutefois, des données plus récentes montrent que l'intervention du système moteur n'est pas nécessairement impliquée lors de la perception visuelle des mouvements. Par exemple, on a pu montrer que l'animal nouveau-né et le nourrisson étaient capables de reconnaître des mouvements humains qu'eux-mêmes ne sont pas capables de réaliser.

Notre travail se situe dans le cadre de cette discussion théorique. Le but est d'analyser les conditions dans lesquelles s'établissent les relations entre motricité et perception et quel est le degré d'implication du système moteur lors de la perception des mouvements humains. La première partie de la thèse est consacrée à une revue de questions visant à rappeler les différentes expériences consacrées à la perception visuelle du mouvement humain qu'il s'agisse des études comportementales menées chez l'adulte et l'enfant où d'études cliniques menées chez des patients présentant des difficultés motrices où enfin de celle s'étant intéressées plus particulièrement aux réseaux neuronaux.

La deuxième partie, quant à elle est destinée à présenter notre travail expérimental. Elle est constituée de cinq expériences portant sur la perception visuelle des mouvements humains. Les premières expériences ont consisté à analyser les préférences perceptives pour des mouvements dont la cinématique ne respectait plus les règles de production motrice. L'intérêt était de savoir quelles sont les préférences perceptives pour des mouvements

impossibles à simuler mentalement. Les deux dernières expériences, quant à elles, visent plus spécifiquement à comprendre le rôle de la maîtrise du geste moteur sur le traitement de l'information visuelle. Pour cela, nous avons systématiquement comparé les performances motrices et perceptives de deux populations dont le niveau moteur variait (enfant, patient atteint de la maladie de Parkinson).

La troisième partie, enfin, reprend l'ensemble de nos résultats expérimentaux et les confronte avec les modèles théoriques abordés dans le premier chapitre. En particulier, nous discuterons des facteurs pouvant nuancer le rôle du système moteur dans la perception visuelle des mouvements humains.

PARTIE I INTRODUCTION THEORIQUE

INTRODUCTION THEORIQUE

Les recherches concernant la perception visuelle du mouvement humain ont été en grande partie initiées et développées par Gunnar Johansson (Johansson, 1973, 1975, 1976). La technique utilisée dite du « point-light display » consistait à présenter sur un écran une séquence animée de points lumineux représentant différents types d'actions (marche, course, danse). Cette séquence était obtenue en filmant dans le noir les actions de sujets portant des diodes lumineuses placées sur différentes articulations (i.e., épaules, hanches, genoux). Dans ces conditions, et malgré une absence totale d'indice de forme, la présentation très brève (100 ms) de la séquence animée permet une reconnaissance quasi instantanée de l'action alors qu'une présentation statique ne permet aucune reconnaissance. Ces capacités de reconnaissance sont par ailleurs très robustes : elles persistent même si le nombre de diodes lumineuses est très réduit, si les sujets présentent un important retard mental (i.e., Sparrow, Shinkfield, Day, & Zerman, 1999) ou lorsque l'action est dissimulée par un masque formé de diodes lumineuses présentant un mouvement aléatoire (i.e., Pavlova & Sokolov, 2000).

Enfin, on constate que la présentation d'une séquence de points permet au sujet d'identifier le sexe des individus (i.e., Kozlowski & Cutting, 1977), de reconnaître des personnes familières (i.e., Cutting & Kozlowski, 1977; Loula, Prasad, Harber, & Shiffrar, 2005) ou d'identifier les propriétés physiques des objets comme le poids (i.e., Runeson & Frykholm, 1981) ou la taille (i.e., Jokisch & Troje, 2003). Ces quelques données montrent que le système visuel est très sensible au mouvement humain et qu'une information même très réduite permet une identification très précise des actions.

Par ailleurs de très nombreuses recherches ont montré que les capacités du système visuel allaient au-delà d'une simple identification des actions mais impliqueraient une « connaissance » au moins implicite des règles de production motrice. C'est sur ce point que portera l'essentiel du chapitre suivant.

I.1 « CONNAISSANCE » DES REGLES MOTRICES

La réalisation des mouvements humains est réglée par un certain nombre de principes moteurs concernant notamment les relations espace-temps. Dans cette partie, nous présenterons quelques expériences montrant que le système visuel a une sensibilité très fine aux règles de production du mouvement lorsque les stimuli représentent des mouvements

réels mais également lorsqu'il s'agit de mouvements apparents ou même de stimuli statiques.

1.1.1 Perception visuelle des mouvements : connaissance des règles cinématiques

La sensibilité à la cinématique a été mise en évidence lors d'expériences montrant que les humains pouvaient distinguer et reconnaître des actions en se basant seulement sur l'évolution de la vitesse au cours du mouvement. Le but de cette partie est d'analyser plus particulièrement la sensibilité du système visuel aux règles cinématiques du mouvement.

1.1.1.1 Relations entre durée et longueur de trajectoire

Les relations entre la durée et la longueur d'une trajectoire dépendent du type de mouvement considéré. Nous développerons ici, les principes moteurs concernant la production de mouvements topocinétiques (c'est-à-dire dirigés vers un but spatialement défini comme les mouvements de pointage de cible) et morphocinétiques (c'est-à-dire impliquant la réalisation d'une forme comme les mouvements de dessin ou d'écriture). Nous rappellerons dans un premier temps les règles de production de ces mouvements avant de montrer la précision avec laquelle le système visuel les intègre.

1.1.1.1.1 Production de mouvements topocinétiques et morphocinétiques

L'observation du profil de vitesse d'un mouvement de pointage de cible fait clairement apparaître une asymétrie, laissant supposer l'existence de deux phases, une phase balistique d'approche rapide de la cible et une phase de contrôle sensoriel dans la partie terminale du mouvement, celle-ci étant plus ou moins importante selon la précision nécessaire à l'exécution du mouvement (Woodworth, 1899). On doit à Fitts (1954) le fait d'avoir modéliser la relation existant entre la durée d'un mouvement et sa difficulté. Ainsi, les mouvements de pointage sont régis par la loi dite de Fitts, $TM = a + b \log_2 (2D/L)$ où TM représente le temps de mouvement, a et b deux constantes et $(2D/L)$ l'indice de difficulté du mouvement (ID) où D représente la distance séparant le point de départ et la cible et L la largeur de la cible. Ceci montre donc, ce qui peut paraître trivial, que la durée des mouvements topocinétiques est directement fonction de la longueur de la trajectoire. Il

est à noter que cette relation a été retrouvée pour différents types de mouvements : mouvements de pointage aller-retour (Fitts, 1954), mouvements de pointage discrets (Fitts & Peterson, 1964), lancer de fléchettes (Kerr & Langolf, 1977).

Cependant, d'autres recherches ont pu montrer que les relations espace-temps étaient différentes pour les mouvements morphocinétiques. On constate en effet que ceux-ci, contrairement aux mouvements topocinétiques s'organiseraient selon le principe d'isochronie. Ce principe a été mis en évidence lors d'observations déjà très anciennes montrant que la durée des mouvements d'écriture d'une même lettre n'était que faiblement influencée par sa taille (Binet & Courtier, 1893). On observe en effet une augmentation spontanée de la vitesse moyenne du mouvement, ceci permettant de maintenir la durée d'exécution à peu près constante. Une expérience réalisée par Viviani & Schneider (1991) chez l'adulte et l'enfant a permis de formaliser avec précision ce principe d'isochronie. La tâche consistait à tracer continuellement pendant plusieurs secondes sur une tablette graphique des ellipses de différentes tailles. Les sujets étaient libres de choisir le rythme d'exécution des mouvements mais avaient pour instruction de maintenir ce rythme tout au long de chaque tracé. Les résultats montrent un respect du principe d'isochronie : l'augmentation de la taille des ellipses n'entraînait pas une augmentation correspondante de la durée. Les auteurs ont formalisé ce principe par la fonction de puissance $T = T_0 * P^\gamma$ où T représente le temps de mouvement, P le périmètre de l'ellipse, T_0 le temps de base du sujet correspondant à la durée de mouvement théorique pour une ellipse de 1 cm de périmètre et γ l'exposant indiquant le degré d'isochronie. L'exposant γ est toujours compris entre les valeurs 0 et 1, la valeur 0 correspond au respect d'une isochronie parfaite alors que la valeur 1 correspond à une absence d'isochronie, c'est-à-dire à une relation proportionnelle entre le temps de mouvement et le périmètre. Les résultats indiquent une valeur stable de l'exposant dès 5 ans autour de 0.4, montrant une mise en place relativement précoce du principe d'isochronie lors de la production des mouvements morphocinétiques. On peut noter que l'isochronie des mouvements a été également observée pour les mouvements de saisie d'objet (Jeannerod, 1984), l'écriture de lettres ou de phrases (Thomassen & Teulings, 1985) et pour les mouvements de percussion (Delay, Nougier, Orliaguet, & Coello, 1997).

En résumé, on constate donc que les relations espace-temps s'organisent différemment selon qu'il s'agit de produire des morphocinèses ou des topocinèses. L'intérêt est maintenant de savoir si la perception visuelle des mouvements est dépendante de ces règles de production motrice.

I.1.1.1.2 Perception visuelle des mouvements morphocinétiques et topocinétiques

Méary, Chary Palluel & Orliaguet (2005) ont cherché à savoir si les sujets avaient un accès aux lois et principes définissant les relations entre la longueur de la trajectoire et la durée de mouvement. Pour cela, ils ont comparé la façon dont les sujets jugeaient la vitesse de mouvements morphocinétiques et topocinétiques. L'expérience a consisté à présenter sur un écran des mouvements d'écriture et des mouvements de pointage de cible. Le mouvement d'écriture correspondait à la production d'un *e*. Le dispositif expérimental permettait de faire varier la vitesse d'écriture et la taille du *e*. Pour les mouvements de pointage l'amplitude du mouvement et la durée pouvaient également varier d'un essai à l'autre. La tâche des sujets consistait notamment à identifier les mouvements qui paraissaient être réalisés à vitesse normale. Pour chaque type de mouvement (écriture, pointage) et chaque amplitude, les auteurs ont comparé les temps moyens jugés comme « correct ». Les résultats indiquent une différence entre les deux types de mouvement : à amplitude égale, les temps de mouvement moyens jugés comme « correct » sont beaucoup plus dépendants de l'amplitude pour les mouvements de pointage que pour les mouvements d'écriture. Ce résultat indique que les préférences perceptives des sujets ne dépendent pas d'un principe général de covariation espace-temps mais sont directement influencées par les principes moteurs régissant chaque type de mouvement, c'est-à-dire le principe d'isochronie pour les mouvements d'écriture et la loi de Fitts pour les mouvements de pointage.

Récemment, ces résultats ont été confirmés par une expérience d'ajustement montrant le respect du principe d'isochronie dans le jugement perceptif de mouvements elliptiques (Bidet-Ildei, Méary, & Orliaguet, Sous-presse). Dans cette expérience, les sujets ajustaient la vitesse d'un mouvement elliptique de périmètre variable pour qu'elle leur paraisse « normale » c'est-à-dire ni trop lente ni trop rapide. Les résultats indiquent le suivi d'une fonction de puissance entre la durée choisie et le périmètre des ellipses avec une valeur stable de l'exposant autour de 0.44 et ceci dès l'âge de 7 ans. Ainsi, les choix perceptifs des sujets sont conformes au principe d'isochronie tel qu'il a été observé par Viviani & Schneider (1991).

1.1.1.2 Covariation vitesse-courbure

Comme dans la partie précédente, nous évoquerons dans un premier temps les règles de production motrices avant de présenter les résultats obtenus en perception visuelle.

1.1.1.2.1 Production des mouvements courbes

La loi de covariation vitesse-courbure a donné lieu à de nombreux travaux (i.e., Lacquaniti, Terzuolo, & Viviani, 1983; Viviani & McCollum, 1983; Viviani & Terzuolo, 1982). Une des premières expériences (Lacquaniti et al., 1983) a consisté à demander à des sujets adultes de produire des séquences d'ellipses (ou de gribouillis) et à enregistrer le profil de vitesse des mouvements. Les auteurs constatent que la vitesse instantanée du mouvement est directement dépendante de la courbure de la trajectoire. Lors de la production d'une ellipse, la vitesse d'exécution est maximum lorsque la courbure est faible et tend à diminuer lorsque la courbure de la trajectoire est plus prononcée. Cette relation est formalisée par l'équation $V(t) = [K * \{R(t) / (1 + \alpha R(t))\}]^{1-\beta}$ où $V(t)$ représente la vitesse instantanée et $R(t)$ le rayon de courbure de la trajectoire à l'instant t . Le paramètre K représente le gain de vitesse qui est propre à chaque sujet et constant sur de grandes portions de trajectoire. On a pu montrer que sa valeur est dépendante de la longueur des segments à produire et du rythme global de mouvement (Viviani & McCollum, 1983). Le paramètre α est compris entre 0 et 0.1 et corrige la valeur prédite de $V(t)$ pour qu'elle ne devienne pas infinie lorsque la trajectoire à produire n'a pas de point d'inflexion. L'exposant β constitue le paramètre le plus important de la relation existant entre la vitesse de production et la courbure de la trajectoire. Chez l'adulte sa valeur est de 2/3 (Viviani & Schneider, 1991) d'où le nom de « loi de puissance 2/3 »¹.

On peut noter que Hicheur, Vieilledent, Richardson, Flash, & Berthoz (2005) ont mis en évidence une relation du même type pour les mouvements de locomotion mais avec une valeur β variable en fonction de la forme de la trajectoire. Les auteurs suggèrent que la loi de puissance 2/3 observée pour les mouvements elliptiques ne pourrait être qu'une extension d'une loi de covariation vitesse-courbure générale dépendante de contraintes physiques.

¹ Cette loi est également nommée loi de puissance 1/3 ou loi de covariation vitesse courbure en fonction des paramètres utilisés pour la définir (courbure ou rayon de courbure).

I.1.1.2.2 Perception visuelle des mouvements courbes

Plusieurs expériences ont permis de montrer que le système visuel était sensible à la loi de covariation vitesse-courbure. Ainsi, des mouvements ne respectant pas les lois cinématiques de production de mouvements curvilignes sont à l'origine d'illusions géométriques et temporelles. Nous présenterons ici les travaux les plus représentatifs c'est-à-dire ceux effectués par l'équipe de Viviani.

- *Les illusions géométriques*

Une des premières études réalisée dans ce domaine a été effectuée par Viviani & Stucchi (1989). L'expérience consistait à présenter sur un écran un point lumineux se déplaçant selon une trajectoire elliptique avec une cinématique correspondant à la loi de puissance $2/3$. D'un essai à l'autre, l'excentricité de l'ellipse était modifiée tout en conservant la même cinématique. Lorsque le spot lumineux décrit à un moment donné une trajectoire circulaire, mais avec un profil de vitesse correspondant à la production d'une ellipse, les résultats montrent que les sujets ont tendance à percevoir un tracé d'ellipse plutôt que celui d'un cercle alors que la présentation statique de la même forme géométrique donne lieu à une reconnaissance systématique du cercle. On observe donc des phénomènes d'illusions perceptives lorsque la vitesse du mouvement et la trajectoire ne respectent plus la loi de covariation vitesse-courbure. Les auteurs expliquent ce phénomène par la notion de compromis entre la forme perçue et les lois cinématiques connues. Ce phénomène de compromis est particulièrement visible lorsque l'on propose aux sujets une trajectoire d'ellipse orientée verticalement associée à une cinématique d'ellipse orientée horizontalement. Dans ce cas, les sujets présentent une tendance à percevoir un cercle, signe manifeste d'un compromis entre les deux types d'informations disponibles. Cette expérience souligne donc l'influence de la cinématique sur l'identification de la forme des trajectoires. On peut noter que ce phénomène d'illusion n'est pas spécifique au système visuel mais s'observe également lorsque le mouvement est présenté dans la modalité proprioceptive (Viviani, Baud-Bovy, & Redolfi, 1997).

- *Les illusions temporelles*

L'influence des lois cinématiques a également été mise en évidence lors d'expériences montrant que la cinématique naturelle de production d'un mouvement

constitue une norme temporelle. Une de ces expériences a consisté à demander à des sujets adultes de régler la vitesse de déplacement d'un point décrivant une trajectoire elliptique ou pseudo-aléatoire pour qu'elle leur paraisse uniforme c'est-à-dire à vitesse constante. Pour cela, les sujets actionnaient une manette qui avait pour effet de modifier la valeur de l'exposant β dans la relation de puissance $V(t) = [K * R(t) / (1 + \alpha R(t))]^{1-\beta}$ décrite précédemment. Les auteurs observent que les sujets choisissent systématiquement une valeur β correspondant à celle observée lors de la production de ce type de mouvement ($\beta = 2/3$) et jamais une valeur de 1 correspondant mathématiquement à une vitesse uniforme. Ceci est d'autant plus surprenant que ce choix correspond à des variations de vitesse de près de 200 % le long de la trajectoire. Par ailleurs on constate que la présentation d'une vitesse mathématiquement constante le long d'une trajectoire elliptique provoque, quant à elle, une sensation de brusque accélération et décélération (Runeson, 1974; Viviani & Stucchi, 1992). Les auteurs en déduisent que pour une raison qui reste à préciser la perception d'une vitesse uniforme ne correspondrait pas à une réalité physique objective mais bien au respect des lois de production des mouvements (Viviani & Stucchi, 1992). De la même façon, une expérience récente a permis de mettre en évidence que les sujets adultes considèrent comme naturel uniquement des mouvements où la relation entre la courbure de la trajectoire et la vitesse instantanée respecte les lois de production des mouvements (Bidet-Ildei, Orliaguet, Sokolov, & Pavlova, 2006).

Cet ensemble de résultats montre que la cinématique fait partie intégrante de la perception visuelle des mouvements. Ainsi, une ellipse ne respectant pas la loi de covariation vitesse-courbure est considérée comme non naturelle (ou non biologique). De plus, l'identification de la forme d'une trajectoire n'est possible que si le stimulus respecte les règles de production motrice.

1.1.1.3 Les phénomènes d'anticipation

Les expériences précédentes ont toutes porté sur la perception visuelle de mouvements simples ne comportant qu'une seule composante motrice (une lettre, un mouvement de pointage, une même ellipse répétée). D'autres expériences ont porté sur la perception de séquences motrices. Les résultats obtenus dans ce domaine montrent que le système visuel est capable d'utiliser les informations cinématiques contenues dans un mouvement, non seulement pour identifier ce mouvement, mais aussi pour anticiper l'identité des mouvements suivants.

I.1.1.3.1 Production de mouvements séquentiels

Une des caractéristiques du système moteur est de pouvoir produire des séquences motrices (parole, écriture) tout en préservant la continuité et la fluidité des mouvements. Ceci montre que pendant la réalisation des premières composantes de la séquence le système moteur anticipe la programmation des composantes suivantes. Cette anticipation motrice a été observée dans différents domaines comme la parole (Benguérel & Cowan, 1974), les mouvements de saisie (Louis-Dam, Kandel, & Orliaguet, 2000; Louis-Dam, Orliaguet, & Coello, 1999) ou les mouvements d'écriture (Kandel, Orliaguet, & Boe, 2000; Kandel, Orliaguet, & Viviani, 2000; Louis-Dam et al., 2000; Orliaguet, Kandel, & Boe, 1997).

Quel que soit le type de mouvement considéré, cette anticipation se caractérise par une modification de la première composante du mouvement en fonction de la difficulté de la composante suivante. Par exemple, en écriture, lors de la production de digrammes (*ll*, *le*, *ln*), les caractéristiques du premier *l* diffèrent en fonction de la lettre suivante (*l*, *e*, ou *n*). Le temps d'exécution du premier *l* et en particulier le temps de la phase descendante est plus important quand la lettre suivante est un *n*, qui implique un changement de la taille et de l'orientation du mouvement qu'un *e* qui n'implique qu'un changement de taille (Orliaguet et al., 1997).

L'intérêt est maintenant de savoir si les modifications cinématiques contenues dans la première composante d'une séquence sont utilisables par le système visuel pour identifier les composantes suivantes.

I.1.1.3.2 Perception visuelle de mouvements séquentiels

Les expériences réalisées en écriture ont consisté à présenter sur un écran un *l* en train de s'écrire appartenant au digramme *ll*, *le* ou *ln*. Les sujets devaient prédire l'identité du mouvement suivant. Les résultats montrent que, dans une tâche de choix forcé, les sujets sont capables d'identifier la lettre (*l*, *e* ou *n*) qui suit la production d'un premier *l* en écriture cursive (Kandel, Orliaguet, & Boe, 2000; Orliaguet et al., 1997). De la même façon ils sont capables, à partir de la perception visuelle d'un premier geste de préhension d'un cylindre de prévoir la taille de la cible (petite moyenne ou grande) sur laquelle le sujet a posé l'objet saisi (i.e., Louis-Dam et al., 1999) ou même de déterminer l'activité fonctionnelle (jeter, boire ou poser) qui va suivre la préhension d'un verre (Louis-Dam et al., 2000). L'ensemble de ces résultats montre que les sujets ont une connaissance au moins implicite des

phénomènes d'anticipation motrice et que le système visuel peut s'en servir pour effectuer une anticipation perceptive. Une expérience complémentaire (Kandel, Orliaguet, & Viviani, 2000) a permis de montrer que l'anticipation perceptive s'appuierait davantage sur les différences de vitesse que sur les différences de durée. La procédure était identique à celle décrite précédemment (Kandel, Orliaguet, & Boe, 2000). En revanche, à la suite d'une procédure de normalisation des temps de mouvements, la durée du premier l de chaque digramme était rendue identique mais les profils de vitesse conservaient leurs différences. Les résultats montrent que, dans ce cas, l'anticipation perceptive est toujours réalisée avec efficacité. Ceci indique que ce ne sont pas les indices de durée mais les indices les plus spécifiquement moteurs (changement de l'allure du profil de vitesse) qui sont utilisés lors de l'anticipation perceptive.

L'ensemble des données obtenues lors d'expériences portant sur la perception des mouvements réels montre que le système visuel est extrêmement sensible aux règles cinématiques du mouvement ceci jouant un rôle essentiel dans l'identification des trajectoires du mouvement et dans l'anticipation des mouvements à venir. D'autres expériences montrent que même lorsque ce mouvement n'est qu'apparent (mouvement phi), la perception est influencée par la façon dont est normalement réalisé le mouvement.

1.1.2 Perception visuelle des mouvements apparents : connaissance des contraintes biomécaniques

Depuis les expériences de Korte (1915), on sait que lorsque l'on fait apparaître alternativement devant un observateur (privé de repères) deux points lumineux légèrement décalés l'un par rapport à l'autre, l'observateur a l'impression que le point se déplace de la première position à la deuxième. Ce type d'illusion nommé « effet phi » montre que malgré le nombre très important de possibilités de trajectoire, le mouvement apparent perçu suit toujours le chemin le plus court entre les deux points lumineux.

Shiffrar & Freyd (1990; 1993) ont mis en évidence une exception à cette règle lors de la présentation de photographies représentant un corps humain dans différentes positions. L'expérience classique a consisté à présenter successivement deux images statiques représentant deux positions de l'avant bras avec un intervalle inter-stimulus compris entre 100 et 750 ms (voir fig. 1).

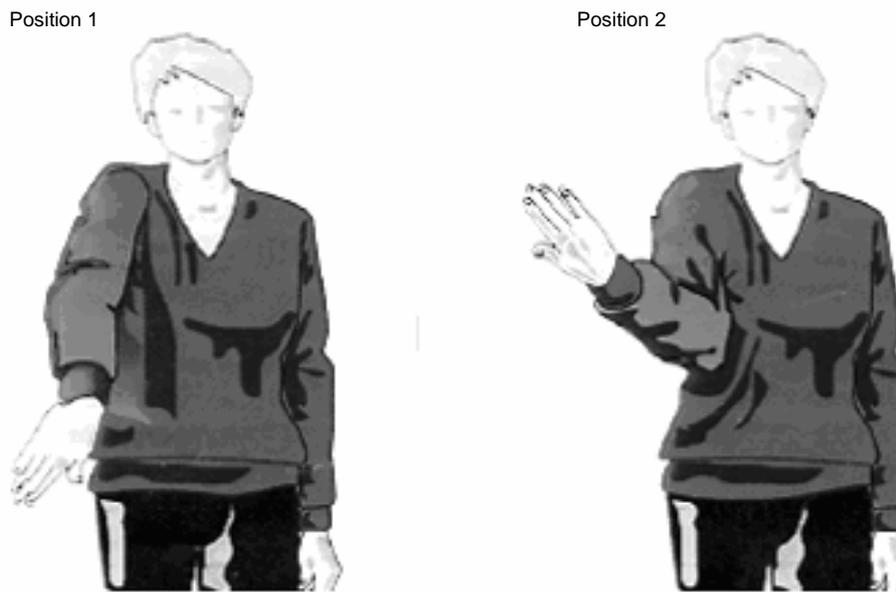


Figure 1: Représentation schématique des stimuli présentés par Shiffrar & Freyd (1990), empruntée à Viviani (1998).

Dans cette situation, les sujets perçoivent un mouvement apparent du bras suivant une trajectoire conforme aux contraintes biomécaniques et ceci alors qu'il s'agit du chemin le plus long. On peut noter que ceci n'est vrai que pour des intervalles inter-stimulus supérieurs à 250 ms. Avec des délais plus courts, les auteurs supposent que les mouvements (trop rapides) ne sont pas reconnus comme des mouvements humains ce qui pourrait expliquer la perception d'un mouvement correspondant au chemin le plus court. La connaissance des contraintes biomécaniques aurait donc une influence directe sur la perception des mouvements apparents.

I.1.3 Perception visuelle d'un stimulus statique

L'intérêt des recherches effectuées dans ce domaine était de savoir si le système visuel pouvait avoir accès à la façon dont a été réalisé un dessin et en quoi cette information favorise l'identification d'une figure. Une expérience de Babcock & Freyd (1988) a consisté à demander à des sujets d'identifier l'ordre dans lequel avaient été réalisés les traits composants un dessin. A partir de déformations spécifiques contenues dans ces tracés (par exemple le chevauchement de traits), les sujets sont tout à fait capables d'identifier l'ordre dans lequel les traits ont été réalisés ou le sens de production d'un même trait. Par ailleurs, on a pu montrer que les sujets adultes peuvent identifier les changements de direction

relatifs à l'écriture d'une lettre et ainsi différencier diverses méthodes de production d'un même caractère. Cette capacité à extraire « la grammaire de l'action » permettrait aux humains de reconnaître des lettres (et à fortiori des mots et des phrases) malgré une variabilité très importante de l'écriture ce qu'à pu montrer une expérience réalisée par Freyd (1983) portant sur l'identification de symboles artificiels. Ces symboles étaient constitués de deux ou trois segments et étaient réalisés selon deux méthodes de production. La seule différence entre ces deux méthodes était l'ordre et la direction de production de chaque segment constituant le symbole. Une première phase d'entraînement consistait à apprendre aux sujets à associer chaque symbole avec un chiffre. Durant cette phase, chaque symbole se réalisait sur un écran de manière dynamique (chaque segment de façon séparée) et selon une méthode de production donnée (A ou B). Cette première phase s'achevait lorsque les sujets étaient capables d'associer chaque symbole à son chiffre au moins cinq fois consécutives. Cette phase d'entraînement était suivie d'une phase test où l'on présentait sur un écran un symbole en version finale et un chiffre. Les sujets devaient le plus rapidement possible déterminer si le symbole présenté correspondait ou non au chiffre donné. Dans cette phase, chaque symbole avait subi une légère modification. Celle-ci était réalisée en adéquation avec l'une ou l'autre des méthodes de production préalablement présentée. Dans tous les cas la modification du symbole était minime et n'empêchait pas sa reconnaissance. Les résultats indiquent que les temps de réaction sont plus rapides dans le cas d'une modification consistante avec la méthode de réalisation préalablement apprise. Ceci indique que l'information dynamique contenue dans les traces statiques pourrait jouer un rôle dans l'identification d'un dessin.

Cette capacité à déchiffrer le mouvement dans les traces statiques a également été étudiée lors d'expériences portant sur la reconnaissance d'idéogrammes chinois (Flores d'Arcais, 1994). Les idéogrammes sont caractérisés par une forme spécifique et sont écrits selon un sens prédéterminé. On a pu mettre en évidence que l'ordre et le sens dans lequel ont été produits les premiers traits constituent des indices perceptifs très efficaces pour un accès rapide à la signification des idéogrammes. De plus si on modifie l'ordre d'exécution des traits de l'idéogramme sans modifier sa forme, on observe une augmentation significative du temps de reconnaissance ce qui pourrait indiquer l'existence d'une mémoire de l'ordre d'exécution de ces traits. Ainsi, la forme de l'idéogramme, mais également les mouvements ayant permis de le produire pourraient être mémorisés et faciliter l'accès à la signification. Récemment, ce lien entre la production du mouvement et les capacités de

reconnaissance a été mis en évidence dans l'apprentissage des lettres alphabétiques (Bara, Gentaz, Colé, & Sprenger-Charolles, 2004; Longcamp, Zerbato-Poudou, & Velay, 2005). Ainsi, il a été montré que la pratique de l'écriture ou l'exploration haptique des lettres améliorerait très sensiblement les capacités de reconnaissance de ces lettres.

Enfin, pour certains auteurs, cette capacité à récupérer du « mouvement » dans des traces statiques pourrait être à l'origine des impressions de mouvements données par certains dessins ou certaines peintures et même constituer des éléments importants de leur esthétique (Freyd, 1993). En outre, l'auteur souligne que lors de l'observation d'une image statique, les sujets produisent une série de saccades qui suivent la « dynamique » évoquée de l'image.

Qu'il s'agisse de mouvements réels, de mouvements apparents ou de traces statiques, l'ensemble des données présentées dans cette partie montre les grandes capacités du système visuel à utiliser les informations relatives au mouvement. En ce qui concerne les mouvements réels, les préférences perceptives sont en adéquation avec les règles de production motrice qu'il s'agisse de topocinèse ou de morphocinèse et l'identification de la forme d'une trajectoire n'est tout à fait possible que si la cinématique du mouvement respecte ces règles. La perception visuelle du mouvement réel est donc liée à une connaissance au moins implicite des règles de production. Les résultats concernant le mouvement apparent vont dans le même sens. La connaissance des contraintes biomécaniques détermine en grande partie la trajectoire des mouvements perçus. Enfin, on a pu voir que même lorsqu'il s'agit de percevoir des traces statiques, la reconnaissance des mouvements ayant permis de produire ces traces jouent un rôle dans l'identification des symboles et pourrait participer à leur jugement esthétique.

Toutes ces données laissent supposer l'existence d'un réseau neuronal spécifique pour la perception du mouvement. La partie suivante est destinée à décrire ce réseau.

I.2 RESEAUX NEURONAUX IMPLIQUES DANS LA PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS

I.2.1 Voies visuelles

Depuis les premiers travaux de Ungerleider & Mishkin (1982) il est devenu classique de considérer deux voies de traitement des informations visuelles, la voie ventrale ayant des projections sur le cortex inféro-temporal et la voie dorsale ayant des projections sur le cortex pariétal. La première aurait pour fonction principale la reconnaissance consciente des objets. Elle est entre autre constituée des aires TEO (aire occipito-temporale) et TE (aire temporale) qui joueraient un rôle dans l'identification des configurations complexes et dans le traitement des caractéristiques spatiales et de la couleur des objets. La seconde, quant à elle, aurait pour fonction principale la localisation des cibles à atteindre, et serait donc plus spécialisée dans la programmation des actions motrices. Elle est constituée de plusieurs régions corticales dont l'aire MT (aire temporale médiane), l'aire MST (aire temporale supérieure) et les aires VIP (aire intrapariétale ventrale) et LIP (aire intrapariétale latérale) dont les neurones répondent au mouvement et sont pour certains impliqués dans le contrôle des mouvements oculaires (aire MT et MST). Ces deux voies de traitement présentent une distinction fonctionnelle très précoce manifestée par une dichotomie au niveau des cellules ganglionnaires de la rétine entre les neurones parvocellulaires sensibles à la forme et les neurones magnocellulaires sensibles au mouvement.

Cette dissociation fonctionnelle entre les deux voies a toutefois été partiellement remise en cause par les résultats obtenus lors d'expériences portant notamment sur la perception et la reconnaissance des mouvements humains. Les deux voies visuelles, toutes deux issues de V1, ne seraient pas complètement dissociées. Il y aurait une convergence de ces voies dans la partie antérieure du sillon temporal supérieur (STS) (Baizer, Ungerleider, & Desimone, 1991; Giese & Poggio, 2003; Peuskens, Vanrie, Verfaillie, & Orban, 2005; Thompson, Clarke, Stewart, & Puce, 2005; Vaina, Solomon, Chowdhury, Sinha, & Belliveau, 2001), région justement impliquée dans le traitement des mouvements humains comme la marche (i.e., Grossman & Blake, 2002; Grossman et al., 2000). Ceci a été confirmé par une étude de Peuskens et al. (2005) en imagerie cérébrale analysant les

structures cérébrales impliquées dans la perception visuelle des mouvements humains. Ainsi, l'activité du sillon temporal supérieur serait spécifiquement sollicitée par la présence d'une action, alors que la partie postérieure du gyrus temporal inférieur (ITG) située dans la voie ventrale serait sollicitée lors de la reconnaissance d'une personne. Le complexe MT/V5 répondrait, quant à lui, à la présence d'un mouvement complexe (mouvement articulé). Dans cette perspective, Giese & Poggio (2003) ont proposé un modèle neuronal pouvant rendre compte de la perception visuelle des mouvements biologiques². Dans leur modèle, ils postulent l'existence dans le sillon temporal supérieur (STS) de neurones pouvant à la fois intégrer des informations de forme traitées dans la voie ventrale et des informations de mouvement traitées dans la voie dorsale. Récemment, Lange & Lappe (2006) ont également proposé un modèle tenant compte des indices de forme et de mouvement. Leur modèle considère que le traitement visuel fait intervenir deux étapes, une première étape d'analyse locale de la forme du stimulus et une seconde étape d'analyse globale du mouvement (changement de posture). L'ensemble de ces données a incité à considérer la perception visuelle des mouvements humains comme une activité particulière sollicitant des circuits neuronaux spécifiques.

1.2.2 Circuits neuronaux impliqués dans la perception des mouvements biologiques

Plusieurs expériences ont montré que la perception visuelle des mouvements humains faisait intervenir en plus de l'activation de STS, les aires occipitales et fusiformes (Grossman & Blake, 2002; Michels, Lappe, & Vaina, 2005; Vaina et al., 2001), le cervelet (Grossman et al., 2000; Vaina et al., 2001), le gyrus lingual (Servos, Osu, Santi, & Kawato, 2002) et l'amygdale (Bonda, Petrides, Ostry, & Evans, 1996).

Par ailleurs, la spécificité de la perception visuelle des mouvements biologiques a également été mise en évidence lors d'études utilisant l'électroencéphalographie (EEG, i.e., Cochin, Barthelemy, Lejeune, Roux, & Martineau, 1998; Martineau & Cochin, 2003), la magnétoencéphalographie (MEG, i.e., Pavlova, Lutzenberger, Sokolov, & Birbaumer, 2004)

² Les mouvements biologiques correspondent à l'ensemble des mouvements produits dans le règne animal. En ce sens, les mouvements humains sont une sous-catégorie des mouvements biologiques.

et la technique des potentiels évoqués (ERP, i.e., Hirai, Senju, Fukushima, & Hiraki, 2005). Ainsi, Pavlova et al. (2004) ont comparé le déroulement temporel de l'activation de différentes structures cérébrales lors de la perception visuelle de diodes lumineuses représentant un marcheur avec une posture normale³, un marcheur avec une posture inversée⁴ et des mouvements équivalents aux deux stimuli précédents mais où la disposition spatiale des diodes lumineuses a été choisie aléatoirement sur le corps. Les résultats montrent que l'activité cérébrale change en fonction du stimulus présenté. Pour les mouvements aléatoires, on observe uniquement une oscillation gamma (25-30 Hz) précoce dans le cortex occipital (100 ms). Par ailleurs on constate que la présentation du marcheur orienté normalement entraîne, en plus de l'activation du cortex occipital, une succession d'oscillation gamma dans les lobes pariétal (130 ms) et temporal droit (170 ms). Ainsi, la cohérence des mouvements pourrait être traitée de manière très précoce dans le cortex occipital alors que la reconnaissance explicite d'une action pourrait solliciter les lobes pariétal et temporal.

Plusieurs autres expériences montrent que la perception visuelle fait intervenir des aires cérébrales spécifiques mais aussi des structures communes à la perception et à la motricité.

1.2.2.1 Découverte des « neurones miroirs » chez le singe

Les expériences effectuées par l'équipe de Rizzolatti (Di Pellegrino, Fadiga, Fogassi, Gallese, & Rizzolatti, 1992; Rizzolatti & Craighero, 2004; Rizzolatti, Fadiga, Fogassi, & Gallese, 1999) ont consisté à analyser chez le singe macaque l'activité de neurones situés en F5, c'est-à-dire dans le cortex pré-moteur. Les singes étaient entre autre engagés dans deux types de tâche : saisir un objet ou regarder l'expérimentateur saisir ce même objet. L'analyse électrophysiologique montre que ces neurones sont activés lorsque le singe saisit l'objet mais également lorsqu'il regarde la main de l'expérimentateur saisissant l'objet. Il est intéressant de noter que ces neurones « dits miroirs » restent silencieux lorsqu'on présente aux singes une action de saisie effectuée avec un outil (Rizzolatti, Fadiga, Gallese, & Fogassi, 1996) ce qui pour certains auteurs, reflète une activation spécifique des neurones

³ Traduit de l'anglais "walking upright"

⁴ Traduit de l'anglais "walking inverted"

miroirs lorsque l'action perçue correspond à la production habituelle des mouvements (Fogassi et al., 2005). Toutefois, on a pu montrer récemment que d'autres neurones visuomoteurs situés dans la partie latérale de l'aire ventrale pré-motrice (F5) ont une activité plus importante lorsque le singe observe une action effectuée avec un outil (bâton ou pince) plutôt qu'avec un effecteur biologique (main ou bouche). Ces neurones de part leur fonction ont été nommés « neurones miroirs répondant aux outils »⁵ (Ferrari, Rozzi, & Fogassi, 2005).

1.2.2.2 Système miroir chez l'homme

A la suite de cette importante découverte chez le singe, plusieurs auteurs ont cherché à savoir s'il existait chez l'homme un système miroir permettant d'observer, comme chez le singe, l'activation de structures motrices lors de la perception visuelle des mouvements humains (pour une revue, voir Blakemore & Frith, 2005). L'ensemble des données semble effectivement corroborer l'existence d'un système miroir incluant au moins le sillon temporal supérieur (STS), l'aire de Broca, le cortex moteur primaire et le cortex pré-moteur (Fadiga, Fogassi, Pavesi, & Rizzolatti, 1995; Hamilton, Wolpert, Frith, & Grafton, 2006; Hari et al., 1998; Nishitani & Hari, 2000; Saygin, Wilson, Hagler, Bates, & Sereno, 2004). De plus, Avikainen, Forss, & Hari, (2002) ont montré que le cortex somatosensoriel intervenait également dans ce système miroir. Dans leur expérience, les auteurs ont enregistré chez des sujets droitiers les champs électromagnétiques du cortex somatosensoriel évoqués lors d'une réponse à une stimulation des nerfs médians gauche et droit au niveau des poignets ceci durant trois types d'activité. Le sujet était soit inactif, soit entrain de manipuler de petits objets, soit observait une personne entrain de manipuler de petits objets. Les résultats indiquent une augmentation de l'intensité du signal dans le cortex somatosensoriel primaire (SI) et une suppression du signal dans le cortex somatosensoriel secondaire (SII) ceci dans les tâches de manipulation et d'observation sauf lorsque la main droite, qui manipule les objets, est stimulée. Pour les auteurs, ce résultat montre qu'il existe une importante connexion entre le système miroir et le cortex somatosensoriel ce qui peut suggérer que ce réseau joue un rôle dans la compréhension des actions d'autrui.

⁵ Traduction de l'expression anglaise « tool-responding mirror neurons ».

Une récente expérience utilisant la tomographie par émission de positon (PET), a permis de mettre en évidence que ce système miroir et en particulier l'activation du cortex pré-moteur joue bien un rôle spécifique lors de l'observation d'actions humaines (Tai, Scherfler, Brooks, Sawamoto, & Castiello, 2004). On constate en effet que l'activité cérébrale de sujets droitiers est différente selon que les sujets observent un même mouvement de saisie effectué par un expérimentateur ou par un robot lui-même manipulé par un expérimentateur. En effet, les résultats montrent une activation du cortex pré-moteur gauche uniquement lors de l'observation du mouvement de saisie effectué par l'expérimentateur. Ceci indique, comme chez le singe, que le système miroir est spécifiquement sensible à l'aspect biologique ou non biologique d'un mouvement alors que les mouvements sont, par ailleurs, bien reconnus comme des actions lorsqu'elles sont effectuées par le robot. Pour les auteurs ces données pourraient s'expliquer par une sensibilité du système visuel à la modification de la coordination temporelle et de l'harmonie du mouvement (habituellement observée lors d'une production humaine) lorsque le mouvement de saisie est effectué par un système artificiel ceci provoquant une dissociation entre l'engramme cinématique prévu et l'acte perçu.

Les données présentées dans cette partie ont un double intérêt. Elles confirment l'existence de réseaux neuronaux spécifiques à la perception visuelle des mouvements humains et elles montrent surtout que la perception visuelle des mouvements humains fait intervenir des structures responsables du traitement visuel (circuit MT/V5, aires occipitale et fusiforme des visages) mais également des structures que l'on considérait préalablement comme jouant un rôle spécifique uniquement dans la production du mouvement (cortex pré-moteur, aire motrice supplémentaire). C'est en particulier l'intervention de ces aires motrices et la découverte de neurones spécifiques impliqués à la fois dans la production et la perception des mouvements qui ont contribué à orienter un grand nombre de travaux (qu'ils soient psychophysiques, neuropsychologiques ou neurophysiologiques) vers une analyse des liens fonctionnels pouvant exister entre la production et la perception visuelle des mouvements humains.

I.3 LIENS MOTRICITE-PERCEPTION

Une des premières expériences ayant permis de mettre en évidence les liens pouvant exister entre la production et la perception visuelle des mouvements humains a été réalisée par Beardsworth & Buckner (1981). Dans cette expérience, les auteurs étudient la reconnaissance de la marche chez des personnes se connaissant bien (des amis) à partir de films où seuls sont visibles des points lumineux en mouvement. Comme dans les expériences de Johansson (1973, cf précédemment p 4), ces points représentaient des diodes lumineuses placées sur chacune des articulations des sujets en train de marcher. Les résultats indiquent que le pourcentage de reconnaissance de sa propre démarche (58.3 %) est supérieur à celui de la reconnaissance d'amis proches (31.6 %) ce qui souligne l'influence de l'expérience motrice. D'autre part, une expérience de Casile & Giese (2006) a permis de montrer que l'expérience visuelle en elle-même n'était pas à même de rendre compte de l'ensemble des possibilités perceptives du sujet. Dans cette expérience, les auteurs ont testé sous deux conditions expérimentales (avec ou sans entraînement moteur) les capacités de discrimination visuelle de séquences animées représentant un individu en train de marcher avec une différence de phase qui pouvait être naturelle ou non naturelle. L'entraînement consistait à apprendre aux sujets à marcher avec une différence de phase non naturelle. Durant cet entraînement les sujets avaient les yeux bandés et l'évaluation de l'expérimentateur ne se faisait que verbalement ou en utilisant la modalité haptique. A la fin de l'entraînement moteur les capacités motrices du sujet étaient évaluées par un système qui permettait d'enregistrer les trajectoires du mouvement. En dépit de tout apprentissage visuel, les résultats indiquent une différence significative entre les capacités de discrimination visuelle obtenues avant et après l'entraînement pour la condition où la différence de phase est non naturelle. De plus, les auteurs ont mis en évidence une importante corrélation entre les performances des sujets après l'entraînement et l'évaluation motrice. Ces premiers résultats montrent déjà que la perception visuelle des mouvements ne relève pas uniquement d'un traitement visuel mais fait également intervenir sa propre expérience motrice. D'autres expériences ont cherché à établir un lien entre le système perceptif et le système moteur en analysant 1) le développement des capacités motrices et perceptives, 2) les capacités visuelles des sujets présentant un handicap moteur et

3) l'activation des structures visuelles et motrices au cours de tâches de perception visuelle des mouvements.

I.3.1 Etudes développementales

Très peu d'études se sont intéressées au lien existant entre la maîtrise du geste moteur et les capacités perceptives.

Une première expérience (Louis-Dam et al., 2000) a consisté à comparer les capacités d'anticipation motrice et perceptive d'enfants âgés de 7 à 11 ans ceci pour des mouvements de saisie et des mouvements d'écriture. Les tâches d'anticipation motrice consistaient à demander aux enfants de produire un mouvement séquentiel d'écriture (*ll* ou *ln*) ou de saisie (attraper un cylindre pour le poser ou le jeter). Les auteurs constatent que l'anticipation motrice (se caractérisant par une augmentation de la durée du premier mouvement en fonction de la difficulté du mouvement suivant) s'acquiert progressivement au cours du développement. Elle est présente en moyenne vers 9 ans pour les mouvements de saisie et vers 11 ans pour les mouvements d'écriture.

Les tâches d'anticipation perceptive, quant à elles, consistaient à présenter sur un écran le premier mouvement de chaque séquence (le premier *l* pour les mouvements d'écriture ou la saisie de l'objet) et à demander aux enfants de prédire le mouvement suivant. Les prédictions correctes sont différentes du hasard à partir de 9 ans pour les mouvements de saisie et à partir de 11 ans pour les mouvements d'écriture. Ce résultat indique que les performances perceptives sont conformes à celles que l'on observe sur le plan moteur. De plus, une analyse plus fine sujet par sujet, permet d'observer un léger décalage développemental : l'anticipation motrice est toujours maîtrisée avant l'anticipation perceptive ce qui est conforme à l'idée d'une influence du système moteur sur les performances perceptives.

Il est intéressant de noter que ces liens motricité-perception ont été retrouvés dans d'autres domaines comme la perception de la parole (Desjardins, Rogers, & Werker, 1997) et même lorsque la perception porte sur des stimuli statiques (Bara et al., 2004; Longcamp, Zerbato-Poudou et al., 2005). Ainsi, on a pu démontrer que la perception de la parole est influencée par le niveau articulaire. Les enfants ayant des difficultés d'articulation (par exemple confusion d/b), ont une lecture labiale plus difficile que les enfants ne présentant

pas de troubles articulatoires. D'autre part, la pratique de l'écriture améliore les capacités de reconnaissance des lettres alphabétiques.

L'ensemble de ces recherches suggère donc que l'expérience motrice, ou le niveau de développement moteur a un effet sur la perception visuelle des mouvements humains et même sur la perception des traces graphiques générées par un mouvement humain.

I.3.2 Pathologie

Plusieurs études cliniques ont mis en évidence les liens existant entre les difficultés motrices et perceptives (i.e., Chary et al., 2004; Desjardins et al., 1997; Heilman, Rothi, & Valenstein, 1982; Sirigu et al., 1995). Par exemple, Heilman et al. (1982) ont montré que des patients atteints d'apraxie présentent des difficultés à discriminer les gestes qu'ils ont des difficultés à produire. Chary, Méary, Orliaguet, David, Moreau & Kandel (2004) ont obtenu des résultats similaires chez la patiente DC atteinte de dysgraphie à la suite d'une lésion pariétale gauche. Dans cette expérience, les auteurs ont comparé les capacités motrices et perceptives de DC pour les mouvements réalisés avec difficultés (écriture) et pour ceux (pointages de cible) pour lesquels DC ne présentait aucune difficulté.

Concernant les séquences de lettre, la tâche motrice consistait dans la production de trois digrammes *ll*, *le* et *ln* de difficulté variable. Chez les sujets contrôle la production de ce type de mouvement donne systématiquement lieu à un phénomène d'anticipation motrice se manifestant par une augmentation de la durée du premier *l* en fonction de la difficulté de la lettre suivante (cf anticipation p 10-11). Chez DC, les résultats indiquent une absence d'anticipation motrice et une durée de production des digrammes beaucoup plus importante, ce qui confirme ses difficultés pour l'écriture.

La tâche d'anticipation perceptive consistait à présenter sur un écran la production du premier *l* de chaque digramme. La patiente devait prédire dans chaque cas parmi les trois propositions (*l*, *e* ou *n*) la lettre qui suivait la production du *l*. A la différence des sujets contrôle qui sont capables d'effectuer des prédictions correctes, les résultats de DC se situent au niveau du hasard indiquant une absence totale d'anticipation perceptive.

Concernant les séquences de pointage, la tâche motrice consistait dans la production de deux mouvements successifs de pointage. La première composante était identique et consistait dans la production d'un mouvement de pointage droit-devant dirigé vers une cible de 0.8 cm placée à 20 cm d'un point de départ. Le second mouvement était dirigé vers la

droite vers une cible de taille variable (0.4 ; 0.8 et 1.2 cm) placée à 10 cm de la première cible. Dans cette tâche, les sujets contrôle, comme DC manifestent une anticipation motrice se caractérisant par une augmentation de la durée du premier mouvement de pointage en fonction de la diminution de la taille de la seconde cible.

Comme pour l'écriture, les auteurs ont ensuite demandé aux sujets de prédire la taille de la cible du second mouvement à partir de la présentation sur un écran de la première composante de la séquence. Les résultats indiquent chez les sujets contrôle comme chez DC un phénomène d'anticipation perceptive se caractérisant par une bonne capacité de prédiction de la taille de la cible.

Ces résultats montrent donc que les difficultés perceptives sont très fortement liées aux difficultés motrices, laissant supposer des liens très forts entre motricité et perception.

1.3.3 Etude de l'activité cérébrale

Une autre façon d'étudier les liens entre motricité et perception a été d'analyser les aires cérébrales impliquées dans la production et la perception visuelle des mouvements. L'objectif de cette partie n'est pas de présenter une revue de question exhaustive mais de décrire quelques recherches ayant étudié l'activité cérébrale sur des tâches ayant déjà fait l'objet d'une analyse comportementale et dont nous avons déjà présenté les résultats. C'est pourquoi cette partie se focalise sur l'activité cérébrale lors de la perception de mouvements réels (en particulier durant les tâches d'anticipation perceptive), de mouvements apparents et de traces statiques.

1.3.3.1 Perception visuelle des mouvements réels

Chaminade, Méary, Orliaguet & Decety (2001) ont étudié l'activité des aires cérébrales impliquées dans les phénomènes d'anticipation perceptive de séquence de lettres et de pointage. Pour cela, ils ont proposé à des adultes d'effectuer des tâches classiques d'anticipation perceptive telles qu'elles ont été décrites précédemment (cf p 11-12). Ces deux conditions expérimentales étaient comparées à une condition contrôle où les sujets devaient anticiper la distance parcourue par une balle après le contact avec un obstacle. Pour chaque condition, on présentait aux sujets la première partie de la séquence de mouvement (le premier *l*, le premier pointage ou le lancement de la balle) et les sujets devaient prédire la suite de la séquence c'est-à-dire respectivement la lettre suivant le *l* (*l* ou *n*), la taille de la

cible à atteindre dans le second pointage (grande ou petite) et la distance parcourue par la balle après l'obstacle (prés ou loin). Pendant ces différentes tâches, l'activité des différentes aires cérébrales étaient enregistrées grâce à une méthode de tomographie par émission de positon (PET).

Les résultats comportementaux confirment les capacités du système visuel à anticiper la suite d'une séquence : le pourcentage moyen de bonnes réponses est de l'ordre de 77 % pour tous les types de séquences (lettre, pointage ou mouvement de la balle).

Les données de l'imagerie cérébrale indiquent une activation de structures spécifiques en fonction de la nature de la tâche. Ainsi, pour les séquences de lettres, on observe une activation dans l'opercule frontal gauche (aire de Broca) et le lobe pariétal supérieur (SPL) alors que pour les séquences de pointage, on observe une activation du cortex pré moteur gauche et du sillon intra pariétal droit (IPS). De plus, ces deux tâches activent des circuits frontaux-pariétaux impliqués dans la planification et le contrôle des actions chez l'homme et le singe (cf p 17-18). Enfin, si on compare les situations de mouvements humains à la situation contrôle, on observe dans ce dernier cas une activation spécifique du cortex préfrontal dorso latéral indiquant qu'un traitement cognitif avancé est spécifiquement sollicité lors de cette tâche. Ces données indiquent donc que la perception visuelle du mouvement humain implique une intervention spécifique des structures cérébrales motrices.

1.3.3.2 Perception visuelle des mouvements apparents

Une étude récente (Stevens, Fonlupt, Shiffrar, & Decety, 2000) a analysé les aires cérébrales impliquées lors de la perception visuelle de mouvements apparents, ceci dans deux conditions expérimentales (voir fig. 2a et 2c) : 1) présentation successive (au même endroit) de photographies représentant un être humain avec la jambe droite placée sur un tabouret le point droit placé derrière puis devant le genou droit (condition biologique) et 2) présentation successive (au même endroit) d'une configuration spatiale représentant un point au dessus puis en dessous d'un rectangle (condition objet).

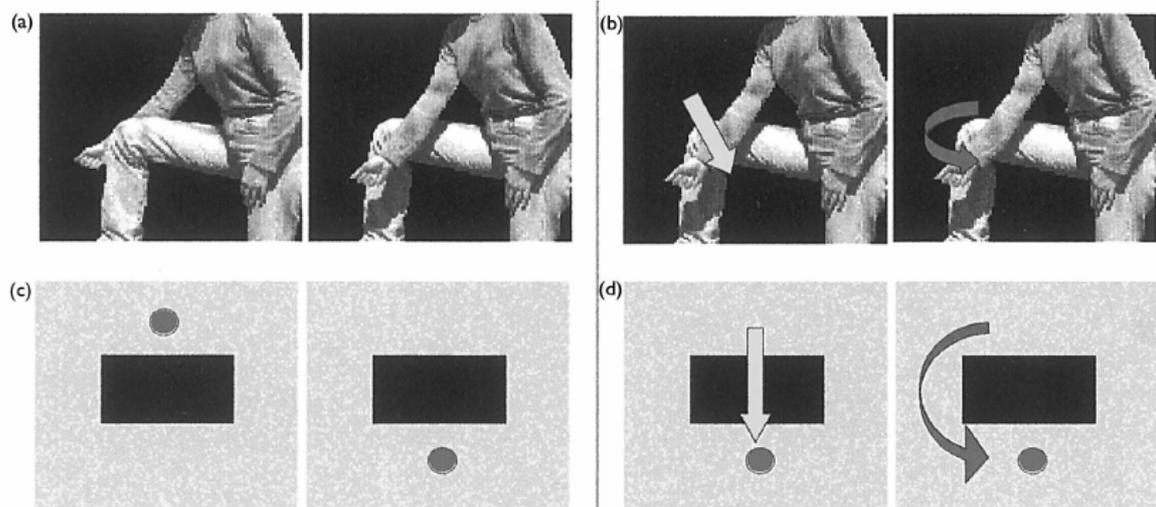


Figure 2: Configurations utilisées (a et c) et chemins possibles (b et d) dans la tâche de Stevens et al. (2000).

Chaque séquence était présentée dans deux conditions temporelles différentes. La durée des stimuli était soit 1) de 400 ms avec un intervalle inter-stimulus de 350 ms (condition biologiquement possible) soit 2) de 150 ms avec un intervalle inter-stimulus de 100 ms (condition biologiquement impossible). Conformément aux résultats présentés précédemment (cf p 13), le chemin le plus court (à travers le rectangle) est systématiquement perçu dans la condition « objet » alors que dans la condition « biologique » le chemin perçu dépend des conditions de présentation. Dans la condition biologiquement possible c'est le contournement du genou (chemin qui tient compte des contraintes biomécaniques) qui est majoritairement perçu (80 % des cas) alors que dans la condition biologiquement impossible c'est le chemin le plus court (à travers le genou) qui est perçu.

Le plus intéressant est de constater que ces différences comportementales se retrouvent au niveau cérébral. Ainsi, seule la condition biologiquement possible entraîne une activation bilatérale spécifique dans le cortex moteur primaire et le gyrus pariétal supérieur. Ainsi, l'activation des aires motrices et pariétales apparaît uniquement lorsque l'action perçue est conforme à ce que le sujet est capable de produire. Ces résultats suggèrent donc que l'activation du système moteur serait à l'origine de la prise en compte des contraintes biomécaniques lors de la perception des mouvements apparents.

1.3.3.3 Perception visuelle des traces statiques

Deux expériences récentes ont permis de préciser les liens existant entre la production et la perception visuelle des mouvements humains dans des tâches de perception visuelle de traces statiques (Longcamp, Anton, Roth, & Velay, 2003, 2005). Il s'agissait d'expériences utilisant la technique d'imagerie à résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) durant l'exécution ou l'observation passive de lettres.

La première étude a consisté à comparer les aires cérébrales activées lors de l'observation visuelle ou lors de l'écriture de lettres alphabétiques, de pseudo-lettres et de stimuli contrôle consistant en trois barres obliques. Le résultat fondamental de cette étude est l'importante correspondance existant entre l'observation visuelle des lettres alphabétiques et leur production, ceci se manifestant par une activation spécifique d'une partie du cortex pré-moteur ventral gauche (aire 6 de Brodmann) alors qu'il n'est jamais sollicité lors de l'observation visuelle de pseudo-lettres pour lesquelles les sujets n'ont pas de programmes moteurs pré-appris. Les auteurs en déduisent que l'activation du cortex pré-moteur serait liée à la sollicitation automatique des programmes moteurs de l'écriture lors de l'observation de lettres connues.

Pour tester cette hypothèse, une seconde expérience a été réalisée avec des sujets gauchers (écrivant de la main gauche). Si comme le suggèrent les résultats précédents, l'observation visuelle de lettres connues implique l'utilisation automatique des circuits sollicités pour l'écriture de ces lettres, des sujets gauchers devraient présenter une activation dans l'hémisphère droit équivalente à celle rencontrée lorsqu'ils écrivent une lettre. Comme lors de l'expérience précédente, les sujets avaient pour tâche d'observer attentivement les lettres alphabétiques, les pseudo-lettres ou les stimuli contrôle. Les résultats montrent que l'observation visuelle de lettres alphabétiques par des sujets gauchers entraîne une activation spécifique d'une partie du cortex pré-moteur ventral droit (Aire 6 de Brodmann). En outre, cette activation, observée dans l'hémisphère droit, est symétrique à celle observée précédemment dans l'hémisphère gauche lorsque la tâche était effectuée par des sujets droitiers. Cette deuxième expérience confirme donc les résultats observés précédemment et montre clairement l'activation automatique des circuits impliqués dans la production des lettres lors d'une tâche d'observation visuelle de ces mêmes lettres présentées en statique.

Cette partie consacrée à l'étude des liens entre la motricité et la perception, a permis de mettre en évidence des relations très fortes entre les capacités de production et de perception visuelle des mouvements humains. En particulier, il est ainsi démontré que non seulement le système moteur est activé lors de la perception des mouvements humains mais en plus cette activation est spécifique du type de mouvement perçu. D'autre part le dysfonctionnement ou l'absence de certaines capacités motrices entraîne une diminution ou une absence spécifique des capacités perceptives correspondantes. Enfin, la sollicitation du système moteur se ferait à la fois pour les mouvements réels mais aussi pour les mouvements apparents et même pour les traces statiques. L'ensemble de ces travaux suggère donc que le système moteur est, au moins en partie, à l'origine des capacités perceptives du système visuel lors la perception visuelle des mouvements humains. Les résultats obtenus lors de la perception visuelle de traces statiques suggèrent même que la perception d'une lettre consiste à la fois à détecter les propriétés de forme mais aussi les gestes ayant permis de la produire. Toutes ces données concourent à valider les théories motrices de la perception visuelle qui seront justement l'objet du chapitre suivant.

I.4 THEORIES MOTRICES DE LA PERCEPTION

Les théories motrices de la perception considèrent comme nécessaire l'intervention du système moteur pour rendre compte de la perception visuelle des mouvements humains. Nous présenterons ici quelques uns des courants théoriques les plus admis dans la littérature notamment ceux considérant qu'il existe des liens représentationnels entre la production et la perception visuelle des mouvements humains et ceux qui font l'économie de la notion de représentation et considèrent les relations perception-motricité comme relevant de traitement de plus bas niveau.

I.4.1 Représentations motrices et Représentations perceptives

1.4.1.1 Modèle de Prinz : équivalence des codes perceptifs et moteurs

D'une manière générale, certaines théories considèrent simplement l'existence d'un module représentationnel commun entre la production et la perception des mouvements (Hommel, Musseler, Aschersleben, & Prinz, 2001; Prinz, 1997). Les codes sensoriels et moteurs représenteraient des caractéristiques communes permettant l'accès à un même schéma représentationnel. Pour l'équipe de Prinz, défendant la théorie du codage événementiel (TEC)⁶ ce cadre de référence commun reposerait sur l'existence de codes cognitifs qui représenteraient aussi bien les codes perceptifs que les schémas d'actions dans le sens où, dans les deux cas, ils font référence aux événements extérieurs. Ainsi, les règles de production motrice seraient progressivement mémorisées dans ces codes cognitifs à partir de l'expérience motrice et visuelle des sujets. Ce système de codage commun pourrait trouver une base neuroanatomique avec les neurones miroirs ayant, par définition, des caractéristiques visuo-motrices (cf p 18-19).

D'autres auteurs se sont intéressés plus spécifiquement au contenu de ce code commun et en particulier aux représentations des règles de production motrice.

⁶ Traduit de l'anglais Theory of Event Coding

1.4.1.2 Représentation des règles de production des mouvements

Un des arguments essentiels en faveur d'une représentation des règles de production est venu d'expériences montrant que les capacités à percevoir les mouvements humains étaient en partie amodale c'est-à-dire indépendante des systèmes sensoriels ayant traité l'information de mouvement. Ainsi, Viviani, Baud-Bovy & Redolfi (1997) ont montré que le système proprioceptif comme le système visuel (cf p 8) est sensible à la loi de covariation vitesse-courbure. L'expérience consistait à placer la main d'un sujet sur un bras robotisé dont on pouvait programmer le tracé d'ellipse. Durant cette stimulation passive de mouvement, les sujets avaient les yeux bandés et ne recevaient donc que des informations proprioceptives. Le mouvement d'ellipse respectait ou non les relations naturelles existant entre la vitesse et la courbure de la trajectoire (loi de puissance $2/3$). La tâche des sujets était de reproduire avec l'autre bras le mouvement perçu. Les résultats sont tout à fait similaires à ceux observés lors de la tâche visuelle. Lorsque le mouvement d'ellipse respecte la loi de covariation vitesse-courbure les sujets reproduisent très précisément le mouvement perçu. En revanche, on observe une importante dégradation des performances (modification de la forme, grande variabilité) lorsque la relation entre vitesse et courbure n'est plus biologiquement correcte (inversement du profil de vitesse par exemple). Pour les auteurs ce résultat indique donc que la connaissance implicite que les sujets ont de la loi de covariation vitesse-courbure est indépendante de la modalité sensorielle et relèverait donc de représentations motrices.

Récemment, Viviani (2002) a reconsidéré cette notion d'accès aux représentations motrices en évoquant plutôt un phénomène de résonance entre ce qui est perçu par le sujet à un instant t et les actions que le sujet a l'habitude de produire. Le modèle s'appuie sur l'existence de deux systèmes d'oscillateurs fonctionnant en parallèle (l'un moteur, l'autre perceptif) et en perpétuelle interaction. Dans un tel système, la notion de préférence perceptive correspondrait à la valeur pour laquelle les oscillateurs moteurs ont le plus de chance d'être entraînés c'est-à-dire aux valeurs correspondant à la production habituelle des sujets. De plus, dans cette conception, l'expérience visuelle joue un rôle en renforçant au fil du temps les oscillateurs du système perceptif. Nous pouvons noter que cette notion de résonance avait déjà été abordée par l'équipe de Rizzolatti (Rizzolatti et al., 1999). Dans cette étude les auteurs distinguaient deux types de comportements résonants, les comportements imitatifs où une action perçue est immédiatement reproduite (phénomène observé chez les animaux et patients atteints de lésion frontale) et les comportements de

pure observation qui ne déclenchent pas la reproduction d'une action mais le système neuronal de l'action afin d'en extraire sa signification. Ce deuxième comportement résonnant se rapproche de la théorie de Viviani (2002) en ce sens qu'il propose le déclenchement par le système perceptif d'une résonance dans le système moteur.

Une autre façon de concevoir le rôle des représentations motrices a été de considérer que la perception visuelle des mouvements humains pouvait solliciter une simulation motrice intériorisée accompagnant la perception du stimulus.

1.4.1.3 Simulation motrice intériorisée du mouvement

L'idée de l'intervention d'une simulation motrice intériorisée s'appuie en particulier sur les données mettant en évidence les similitudes fonctionnelles observées lors de tâche de perception visuelle, de pratique mentale ou de pratique réelle. Pour ne prendre qu'un exemple on constate en effet que le principe d'isochronie (cf p 6) est observé dans différents types de tâches qu'il s'agisse de préférences visuelles (Meary et al., 2005), de pratique mentale (Decety, 1993) ou de pratique réelle (Thomassen & Teulings, 1985). Il est intéressant de noter que cette isochronie est en général inconnue des sujets et ne peut donc être considérée comme une connaissance tacite, préalable, pouvant avoir une incidence sur le contenu des représentations. Ces données ont donc été interprétées comme étant dues à une simulation motrice intériorisée. Les données issues de l'imagerie cérébrale vont dans le même sens. Ainsi, plusieurs expériences ont mis en évidence l'existence d'un recouvrement des réseaux neuronaux impliqués dans la production, l'imagination et l'observation d'une action (pour une revue, voir Jeannerod, 2001). En effectuant ces différents types de tâche, on observe, une activation du cortex pré-moteur, de l'aire motrice supplémentaire (AMS) et du cervelet complétée dans le cas de relations production-imagination par une activation du cortex moteur primaire, des voies cortico-spinales et des ganglions de la base. L'ensemble de ces données a amené Jeannerod (1999; 2001) à développer une théorie de la simulation motrice. Il propose que le système moteur soit parti intégrante d'un ensemble neuronal qui est activé dans de nombreuses situations impliquant l'action, que celle-ci soit intentionnellement planifiée ou non. Cette activation témoignerait de l'existence d'un processus de simulation qui servirait à la fois à préparer le système pour l'action et à donner aux sujets des informations sur la faisabilité d'actions potentielles. Ainsi, l'action est envisagée dans un continuum de l'intention à l'exécution. Ce continuum est la plupart du temps sous le contrôle volontaire du sujet qui peut simuler l'action (en reconstruire les

aspects cachés) sans pour autant l'exécuter. Cependant, il pourrait également être impliqué inconsciemment dévoilant les aspects cachés d'actions rendues potentielles par le contexte. Cette notion de potentialité de l'action a été mise en évidence dans l'expérience de Grafton, Fadiga, Arbib, & Rizzolatti (1997) qui montre une activation des aires pré-motrices lors de l'observation visuelle d'outils familiers. Tout se passe comme si l'observation visuelle de ces objets activait la préparation de futures actions.

Cependant, on peut noter que lorsque les sujets observent des actions sans objectif particulier, les aires motrices peuvent ne pas être sollicitées. La composante « intention » pourrait donc jouer un rôle déterminant dans l'établissement du lien fonctionnel entre la perception et l'action (pour une revue, voir Grezes, Fonlupt, & Decety, 2000). Par exemple, Decety et al. (1997) ont montré que l'observation d'actions dans le but de les reconnaître sollicitait des réseaux mnésiques alors que l'observation dans le but d'imiter l'action était spécifiquement associée avec l'activation de structures impliquées dans la planification et l'exécution des actions.

1.4.2 Rôle des contingences sensori-motrices : La théorie oculomotrice

Cette théorie s'appuie sur un constat relativement simple : comme la plupart des organes sensoriels, l'œil cumule des fonctions sensorielles et motrices. Il possède à la fois des capteurs permettant de traiter les propriétés environnementales et un système musculaire permettant le déplacement de ces capteurs (poursuite et saccade). Cette double fonction a orienté les recherches sur les liens pouvant exister entre les traitements sensoriels et les mouvements oculaires (i.e., Hamker, 2003). Ainsi, on a pu montrer que des circuits neuronaux communs (en particulier les aires MT et MST) intervenaient lors de la perception des mouvements et du contrôle des mouvements oculaires (i.e., Pack, Grossberg, & Mingolla, 2001). De plus, le système oculomoteur humain en particulier le système de poursuite fonctionne selon des règles prédéterminées permettant de prévoir les événements et les conséquences d'une action (i.e., Leigh, Huebner, & Gordon, 1994). Le système perceptif, quant à lui, aurait la capacité d'anticiper la position spatiale d'un point mobile disparaissant subitement en décalant la dernière position perçue dans le sens du mouvement en cours (Freyd & Finke, 1984). Ceci suggère que les capacités d'anticipation du système perceptif pourraient être liées à l'utilisation des règles du système oculomoteur. Pour

O'Regan & Noë (2001) ces règles dérivent de l'expérience continue des contingences sensori-motrices. Ainsi, l'expérience perceptive se constituerait progressivement avec l'utilisation de ces règles et toute déviation entraînerait une modification de la perception de l'objet aboutissant à l'impression consciente que quelque chose d'inhabituel se produit. Ce phénomène pourrait être à l'origine de la notion de mouvement naturel ou non naturel (cf p 10). Dans cette perspective, une expérience de De'Sperati & Viviani (1997) a montré que le système oculomoteur de poursuite visuelle est sensible à la loi de puissance deux tiers (cf p 7-8) entraînant des phénomènes de retard ou d'avance systématique lorsque les sujets doivent suivre des yeux un point se déplaçant selon une trajectoire elliptique qui ne respecte pas une cinématique naturelle. Cependant, les décalages observés dans cette expérience sont tout à fait comparables à ceux observés lorsque la tâche est visuo-manuelle (Viviani & Mounoud, 1990) indiquant pour les auteurs l'intervention d'un mécanisme central.

Les différentes théories venant d'être présentées, quels que soient leurs fondements, postulent toutes que le système moteur est directement impliqué dans la perception visuelle des mouvements humains. L'intervention motrice pourrait être de haut niveau et nécessiter un couplage entre les représentations motrices et perceptives ou de plus bas niveau et solliciter les contingences sensori-motrices. Toutefois un certain nombre de données récentes montrent que le système moteur peut ne pas intervenir lors de la perception visuelle des mouvements biologiques.

I.5 QUELQUES DONNEES CONTRADICTOIRES : UNE ALTERNATIVE AUX THEORIES MOTRICES DE LA PERCEPTION ?

Plusieurs expériences utilisant la technique de Johansson (cf p 4) montrent que l'homme est capable de reconnaître des animaux en mouvement (i.e., Mather & West, 1993; Pavlova, Krageloh-Mann, Sokolov, & Birbaumer, 2001) et qu'il en est de même pour les animaux à l'égard des mouvements humains (i.e., Herman, Morrel-Samuels, & Pack, 1990). Il est difficile d'expliquer ces capacités perceptives en invoquant l'expérience motrice des sujets et donc de faire référence aux théories motrices de la perception. Le but de cette partie est de présenter les différentes études remettant en partie en question les liens motricité-perception. Nous présenterons quelques données significatives obtenues chez l'enfant, chez les patients et chez l'animal.

I.5.1 Etudes développementales

Comme chez l'adulte, la grande majorité des expériences réalisées chez l'enfant ont utilisé la technique « du point-light display » (cf p 4) consistant à présenter le mouvement de corps humains par l'intermédiaire de points lumineux placés sur les articulations. Une expérience de Fox & McDaniel (1982) a permis de mettre en évidence chez des bébés âgés de 8 à 16 semaines une nette préférence pour les stimuli représentant un être humain en train de marcher par rapport à ceux représentant ce même être humain ayant subi une rotation de 180° ou ceux représentant un mouvement aléatoire. De plus, Bertenthal, Proffitt, & Cutting (1984) ont montré que les bébés âgés de 3 à 5 mois étaient capables de discriminer les stimuli représentant un marcheur droit⁷ d'un marcheur inversé⁸ uniquement lorsqu'ils sont présentés en mouvement. Enfin, Booth, Bertenthal, & Pinto (2002) ont montré que des bébés âgés de 3 à 5 mois étaient capables de différencier des activités de marche et de course.

⁷ Traduit de l'anglais upright

⁸ Traduit de l'anglais inverted

Ces quelques données indiquent donc que les capacités du système perceptif à reconnaître des mouvements humains apparaissent avant la maîtrise corporelle de ces mêmes mouvements. En effet, l'expérience motrice de la marche ne semble pas nécessaire à la reconnaissance visuelle de la marche. Pour Bertenthal (1996), ces capacités seraient (au moins en partie) liées à des prédispositions fonctionnelles innées.

1.5.2 Etudes en neuropsychologie

Nous avons vu précédemment que la disparition des capacités motrices pouvait entraîner une disparition équivalente des capacités perceptives (cf patiente dysgraphique p 22). En revanche, plusieurs autres expériences montrent une dissociation entre les atteintes motrices et les capacités perceptives. Ces expériences ont majoritairement porté sur la reconnaissance de stimuli représentant des personnes en mouvement. Par exemple, Pavlova et ses collaborateurs (Pavlova, Staudt, Sokolov, Birbaumer, & Krageloh-Mann, 2003) ont étudié les capacités de reconnaissance visuelle d'un mouvement humain chez des adolescents nés prématurément et présentant des lésions périventriculaires provoquant de plus ou moins grandes difficultés de locomotion. La tâche des sujets était de repérer parmi un ensemble de 55 points lumineux en mouvement la présence ou non d'un individu en train de marcher. Ces 55 points, représentaient soit un masque formé de 44 points lumineux se déplaçant de manière aléatoire et 11 points représentant le mouvement d'un être humain en train de marcher soit seulement un masque représentant le mouvement aléatoire de l'ensemble des points. Les capacités motrices des sujets étaient évaluées par un examen neurologique permettant de définir quatre groupes en fonction de la sévérité des troubles moteurs. Les résultats indiquent clairement une indépendance entre les capacités de discrimination perceptive et la capacité de locomotion propre à chaque sujet. Quel que soit le niveau moteur des sujets, tous étaient capables d'identifier l'action de marcher. Les résultats indiquent donc que l'expérience motrice en elle-même n'est pas nécessaire pour analyser des mouvements humains.

Une expérience récente est venue confirmer ces données (Martins, Olivera, & Amorim, 2005). Dans cette étude, les auteurs ont comparé les capacités de sujets présentant une paralysie congénitale des mains à celles de sujets contrôle dans une tâche de jugement perceptif de figures représentant de façon réaliste (photographie) une main selon différents

points de vue (i.e., paume vers le plafond, paume vers le sol). Chaque stimulus subissait une rotation de 0 à 180° dans le plan médio-sagittal, par pas de 30°, soit vers l'intérieur du corps (trajectoire médiale) soit vers l'extérieur (trajectoire latérale). Les sujets devaient dire par rapport à l'image précédente de quel côté avait été effectuée la rotation (droite ou gauche). L'analyse portait uniquement sur les réponses correctes et les auteurs se sont intéressés à la différence entre les temps de réponse pour les rotations latérales et médiales. Les résultats indiquent une différence de temps similaire pour les sujets contrôle et les sujets présentant une paralysie même si ces derniers présentent de manière générale des temps de réponse plus élevés. Les sujets paralysés sont donc sensibles aux mêmes contraintes biomécaniques que les sujets contrôle lors de la perception visuelle de mouvements humains.

Une autre expérience (Funk, Shiffrar, & Brugger, 2005) a testé l'influence de contraintes biomécaniques dans les phénomènes de mouvements apparents⁹ en particulier chez un sujet né sans bras et présentant par ailleurs des sensations de membres fantômes. Les résultats ne sont pas différents de ceux du groupe contrôle. Le sujet a tendance à percevoir un mouvement apparent conforme aux contraintes biomécaniques.

L'ensemble de ces données, indique que l'intervention du système moteur n'est pas une condition nécessaire au traitement perceptif des mouvements humains. En dépit de toute expérience motrice préalable, les sujets sont capables d'identifier sans difficulté des mouvements humains et de tenir compte des contraintes biomécaniques.

1.5.3 Etudes animales

Plusieurs études réalisées chez l'animal vont dans le même sens. Dans une expérience récente Vallortigara, Regolin, & Marconato (2005) ont étudié les préférences perceptives de poussins, venant juste d'éclore, exposés pour la première fois à une séquence animée de points lumineux. Treize points ont été utilisés pour fabriquer les mouvements. Ceux-ci représentaient différents types de stimulus : le mouvement de locomotion d'une poule, le mouvement de locomotion d'un chat, un mouvement aléatoire (la forme de la poule est préservée mais les points bougent de façon aléatoire), un mouvement où les dispositions spatiales de départ des points lumineux ont été modifiés (le mouvement est

⁹ cf p 12-13

identique à celui d'une poule mais la forme n'est pas respectée) ou un mouvement rigide d'une poule (rotation autour d'un axe vertical des points représentant la forme d'une poule) Les poussins étaient placés pendant 6 min face à deux de ces mouvements et on étudiait vers quel stimulus ils se dirigeaient spontanément (libre choix). Les résultats indiquent une nette préférence pour le mouvement représentant la locomotion d'une poule par rapport au stimulus représentant un mouvement rigide ou un mouvement aléatoire. En revanche, l'attrance est identique pour la séquence représentant la locomotion d'une poule et celle où la configuration spatiale des points a été modifiée. Ce résultat indique une préférence pour un type de mouvement particulier (mouvement semi-rigide caractéristique des vertébrés) plus que pour une forme particulière (forme de la poule). Afin de vérifier cette hypothèse, les auteurs ont comparé les séquences animées représentant la locomotion d'une poule et d'un chat. Conformément à leur hypothèse, les poussins ne présentent aucune différence de préférence entre ces deux types de stimuli. Cette expérience est très intéressante à deux niveaux. D'une part, elle montre que l'expérience visuelle n'est en rien responsable des préférences perceptives des poussins pour les séquences animées représentant des mouvements biologiques. Par ailleurs, cette donnée tend à démontrer l'existence d'un mécanisme intrinsèque (peut être génétique) de prédisposition pour ce type de mouvement. De plus, elle met en évidence chez les poussins la dissociation existant entre les capacités motrices et les préférences perceptives.

Le but de cette partie était de mettre en perspective quelques résultats expérimentaux alternatifs peu compatibles avec les théories motrices de la perception. Les résultats présentés montrent sur le plan développemental un décalage manifeste entre les capacités perceptives et motrices. Ensuite, l'intégrité du système moteur ne semble pas être une condition sine qua non pour la perception visuelle des mouvements biologiques. En effet, les phénomènes de préférence perceptive et de discrimination existent même lorsque le sujet n'a jamais eu ou n'a plus les capacités motrices associées. Ces résultats ne semblent pas par ailleurs explicables par l'expérience visuelle, ce que montrent les données obtenues lors des expériences effectuées sur le poussin. Même si les dernières expériences présentées ne portaient que sur des mouvements de locomotion, les données obtenues remettent en question l'existence d'un lien nécessaire entre motricité et perception lors de la

reconnaissance des mouvements humains. L'objet de notre travail va justement consister à réexaminer l'existence des liens motricité-perception et à étudier plus particulièrement les facteurs pouvant avoir un effet sur le degré d'intervention du système moteur.

NOTRE RECHERCHE

Les travaux présentés lors de cette introduction théorique ont permis de mettre en évidence les remarquables capacités du système visuel dans la perception et la reconnaissance des mouvements humains. Ces capacités apparaissent même lorsque le stimulus est très appauvri et s'appliquent à l'identification des actions, à la « connaissance » des règles motrices et même à la prédiction des actions non encore réalisées.

L'ensemble de ces capacités semble (au moins en partie) due à l'intervention du système moteur. En effet on a pu montrer que 1) le niveau de développement moteur a une influence sur le niveau de développement perceptif 2) les difficultés motrices génèrent généralement des difficultés perceptives visuelles et 3) la perception visuelle des mouvements humains activent les structures cérébrales connues pour jouer un rôle dans la production du mouvement. Ces données valident donc en partie les théories motrices de la perception que l'on fasse référence à un code commun perception-motricité (Hommel et al., 2001; Prinz, 1997), à la notion de représentation et de résonance motrice (Viviani, 2002; Viviani et al., 1997) de simulation intériorisée du mouvement (Jeannerod, 2001) ou de contingence sensori-motrice (O'Regan & Noë, 2001)

Toutefois, certains résultats sont venus remettre en cause la nécessité d'une intervention motrice pour expliquer les capacités perceptives du système visuel. Ainsi, les capacités de reconnaissance concernant notamment la locomotion sont conservées chez des sujets ayant perdu l'usage de la marche. Par ailleurs, les expériences sur l'animal ont pu montrer, par exemple, que les poussins nouveau-nés sans expérience visuelle et motrice sont sensibles aux mouvements de locomotion d'une poule mais également au déplacement d'un chat, déplacement qui par définition ne pourra jamais être exécuté par le poussin.

Notre recherche se situe dans le cadre de cette discussion théorique. Le but est de montrer que la correspondance entre les performances motrices et les jugements perceptifs n'est pas forcément due à l'intervention directe du système moteur notamment en ce qui concerne la simulation motrice intériorisée. Pour cela, deux types de recherche ont été réalisés.

Les premières expériences ont porté sur la perception visuelle de mouvements non naturels. Elles ont consisté à analyser les préférences perceptives pour des mouvements dont

la cinématique ne respectait plus les règles de production motrice, c'est-à-dire des mouvements ne permettant plus une activation du système moteur sous forme de simulation.

Par ailleurs, nous avons analysé de manière systématique le rôle du niveau moteur sur les jugements perceptifs. Pour cela les recherches ont porté sur l'enfant et sur le patient atteint de la maladie de Parkinson.

Ces travaux n'ont concerné que les relations espace-temps, c'est à dire un domaine dans lequel les règles de production motrice sont maintenant bien établies qu'il s'agisse des mouvements morphocinétiques (écriture, dessin) ou des mouvements topocinétiques (mouvement d'atteinte de cible).

PARTIE II EXPERIMENTATIONS

II.1 INFLUENCE DE LA CINEMATIQUE SUR LES PREFERENCES PERCEPTIVES : MOUVEMENTS D'ELLIPSE

II.1.1 Introduction

Comme nous l'avons vu précédemment, le tracé d'une forme elliptique est soumis à un certain nombre de contraintes qui ont été mises en évidence principalement par les travaux de Viviani et de ses collaborateurs (pour une revue, voir Viviani, 2002). La première de ces contraintes est connue sous le nom de loi de puissance $2/3$ ¹⁰. Il s'agit en fait du respect systématique d'un lien entre la courbure de la trajectoire et la vitesse tangentielle de mouvement définie mathématiquement par la fonction de puissance $V(t) = K * [R(t) / (1 + \alpha R(t))]^{(1-\beta)}$ où $V(t)$ représente la vitesse de mouvement à l'instant t , $R(t)$ le rayon de courbure de la trajectoire à l'instant t , K le gain de vitesse qui dépend de chaque sujet et devient constant pour les grandes portions de trajectoire, α un coefficient compris entre 0 et 0.1 qui dépend du point d'inflexion de la trajectoire et β une constante dont la valeur est proche de $2/3$ à partir de douze ans (Viviani & Schneider, 1991). Les paramètres de cette fonction (en particulier la valeur de l'exposant β) sont observés de manière systématique et il est devenu classique de considérer cette loi comme définissant le tracé naturel (ou biologique) d'un mouvement elliptique.

Un autre principe à l'œuvre lors du tracé de mouvements elliptiques est connu sous le nom de principe d'isochronie. Il définit une relation espace-temps spécifique qui se caractérise par une augmentation de la vitesse de mouvement lorsque le périmètre de l'ellipse augmente, ceci entraînant une relative constance du temps de mouvement. Viviani & Schneider (1991) ont montré que ce principe pouvait être formalisé par la fonction de puissance $T = T_0 * P^\gamma$ où T représente le temps de mouvement, P le périmètre de l'ellipse, T_0 un temps de référence qui dépend de chaque sujet et γ une constante qui représente le

¹⁰ Cette loi est également connue sous le nom de loi de puissance $1/3$ ou sous le nom de loi de covariation vitesse-courbure, cf introduction p 7-8.

degré d'isochronie. Quand γ est égal à 0, l'isochronie est parfaite, quand γ est égal à 1 la durée de mouvement augmente de manière proportionnelle au périmètre, et dans ce cas, il n'y a plus isochronie. L'expérience princeps de Viviani & Stucchi (1991) a permis de mettre en évidence un exposant proche de 0.4 que l'on retrouve dès l'âge de cinq ans.

Plus récemment, Bidet-Ildi et al (Sous-presse) ont réalisé une expérience portant sur le jugement perceptif de la vitesse de mouvements d'ellipse. L'expérience consistait à présenter sur un écran d'ordinateur un point noir décrivant une forme elliptique dont le périmètre pouvait varier. Les sujets effectuaient une tâche de préférence perceptive. Ils devaient pour chaque périmètre régler la vitesse de mouvement pour qu'elle corresponde à une vitesse qu'ils jugeaient comme « spontanée » et « naturelle ». Les auteurs ont mis en évidence le respect d'une relation de puissance entre la période finale préférée des sujets et le périmètre des ellipses présentées. Ils ont nommé cette relation « isochronie perceptive » et l'ont formalisée de la façon suivante : $P_f = P_0 * P^\gamma$ où P_f représente la période finale préférée des sujets, P_0 la période de référence de chaque sujet, P , le périmètre des ellipses et γ une constante représentant le degré d'isochronie. Dans leur expérience, l'exposant γ de la fonction de puissance prenait la valeur de 0.44.

Etant donné la forte similitude existant entre les résultats obtenus dans cette tâche de perception visuelle et ceux relevés dans le cas de la production de mouvement les auteurs ont suggéré que les jugements perceptifs pourraient faire appel à une simulation motrice intériorisée. Dans ce cas, le phénomène d'isochronie perceptive ne serait qu'un reflet de l'isochronie motrice. Ainsi, ce principe ne pourrait être observé que pour des mouvements humains que les sujets seraient capables de simuler. Toutefois, comme nous l'avons vu dans la partie introductive, d'autres expériences, plus générales, montrent que l'intervention du système moteur n'est pas indispensable lors de la perception visuelle des mouvements (Pavlova et al., 2003). On peut donc penser que le respect du principe d'isochronie en perception n'est pas nécessairement le résultat d'une simulation motrice intériorisée. Pour répondre à cette question, notre expérience a consisté à analyser les préférences perceptives pour des mouvements elliptiques ne respectant plus les lois cinématiques (mouvements non naturels) et donc de ce fait impossibles à simuler. Nous avons cherché à savoir si le principe d'isochronie perceptive pouvait continuer à s'exprimer pour de tels mouvements. Si l'intervention du système moteur est effectivement impliquée dans les phénomènes

d'isochronie perceptive, on devrait observer pour les mouvements non naturels des résultats non conformes à ce principe.

Il faut noter que nous avons choisi de travailler sur le principe d'isochronie dans la mesure où il s'agit d'un principe moteur et perceptif ne donnant lieu à aucune prise de conscience. En effet quand on interroge les sujets sur leurs productions ils pensent avoir réalisés ou choisis des mouvements dont la durée augmente en fonction de la distance (i.e., Meary et al., 2005). De ce fait, dans notre expérience les résultats ne pourront donc pas être expliqués par une connaissance préalable de la règle motrice.

II.1.2 Méthode

II.1.2.1 Sujets

Soixante sujets droitiers, étudiants de premier cycle à l'université Pierre Mendès France, ont participé à l'expérience. Tous étaient naïfs vis-à-vis des hypothèses testées dans cette étude. Ils ne présentaient aucun trouble visuel ou moteur particulier et ceux ayant une vue corrigée portaient leurs lunettes durant l'expérience. Leur participation était rétribuée par l'obtention de points comptant pour leurs examens de fin d'année.

II.1.2.2 Préparation et présentation des stimuli

Les stimuli utilisés dans cette expérience étaient en tout point identiques à ceux utilisés dans l'expérience de Bidet-Ildei et al (Sous-presse). Il s'agissait d'un point décrivant un mouvement elliptique. La forme de l'ellipse a été définie par 400 coordonnées (X,Y) qui suivaient les équations $x = a \cos \theta$ et $y = b \sin \theta$ où θ variait linéairement entre $-\pi$ et π et où a et b correspondaient aux semi axes de l'ellipse. Le rapport b/a était de 0.425 et l'excentricité¹¹ de l'ellipse \sum de 0.9. Les stimuli présentés pouvaient avoir un profil de vitesse correspondant ou non à un mouvement humain (voir fig. 3B, 3C, 3D, 3E). La modification des profils de vitesse a été réalisée en utilisant la loi de puissance 2/3

¹¹ Excentricité : Terme qui permet de caractériser l'allure générale de la trajectoire d'une ellipse. C'est une donnée exprimée par un chiffre entre 0 et 1. Plus la valeur de l'excentricité est proche de 0 et plus la trajectoire ressemble à un cercle. Inversement, plus la valeur de l'excentricité se rapproche de 1 et plus l'ellipse présentera une forme aplatie.

(cf introduction p 9). Ainsi, en modifiant le paramètre $(1-\beta)$ dans l'équation $V(t) = K * [R(t) / (1 + \alpha R(t))]^{(1-\beta)}$ nous avons construit des stimuli de forme elliptique qui correspondaient ou non à ce qu'un être humain a l'habitude de produire. Dans notre expérience quatre stimuli ont été élaborés. Le premier est considéré comme naturel c'est-à-dire respectant la loi de puissance $2/3$. Les trois autres sont considérés comme non naturels : la trajectoire elliptique n'était plus associée à une cinématique respectant la loi de puissance $2/3$ mais à une cinématique présentant une vitesse constante ($1-\beta = 0$), une accentuation du lien vitesse-courbure ($1-\beta = 0.66$) ou une inversion de la cinématique par rapport à l'exécution d'un mouvement humain ($1-\beta = -0.33$).

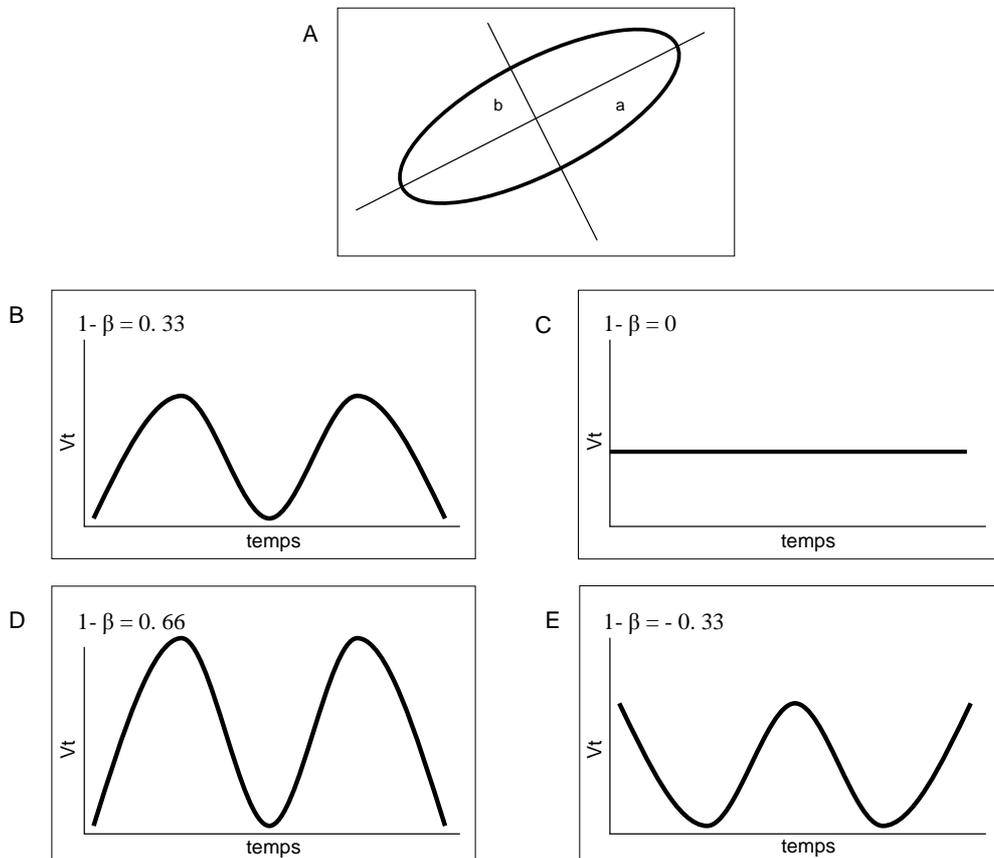


Figure 3: Caractéristiques géométriques et profils de vitesse des stimuli. A) Trajectoire elliptique du mouvement présentée avec une orientation de -45° par rapport à l'horizontale. B) Profil de vitesse naturel respectant la loi de puissance $2/3$. C, D et E) Profils de vitesse dont les valeurs β ($1-\beta = 0$, $1-\beta = 0.66$ et $1-\beta = -0.33$) ne sont pas conformes à la loi de puissance $2/3$.

Quelle que soit la condition, la trajectoire du mouvement restait identique¹². Les stimuli étaient présentés sur un écran d'ordinateur (17", résolution 1024*768 pixels, fréquence d'échantillonnage 85 Hz). Ils consistaient en un point noir ($\varnothing = 0.4$ cm) se déplaçant sur un fond blanc (22*22 cm) décrivant en continu la trajectoire elliptique selon un des quatre profils de vitesse définis préalablement. L'ellipse était toujours présentée avec une orientation de -45° par rapport à l'horizontale (voir fig. 3A). Le programme de présentation des stimuli permettait de faire varier le périmètre de l'ellipse (P) et la période (c'est-à-dire la durée d'un cycle) sans modifier l'allure du profil de vitesse et les caractéristiques géométriques du stimulus de départ.

II.1.2.3 Procédure

L'expérience se déroulait dans une pièce calme. Les sujets étaient aléatoirement répartis dans une des quatre conditions expérimentales. Quelle que soit la condition, les sujets étaient assis à environ 50 cm de l'écran d'ordinateur (voir fig. 4).

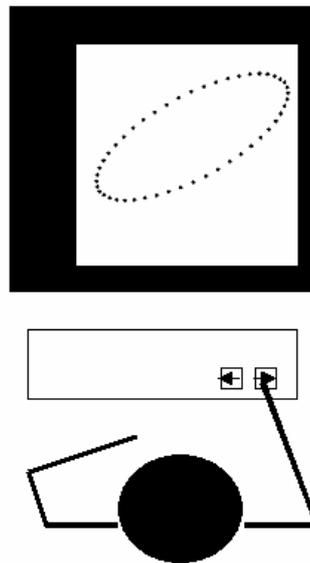


Figure 4: Dispositif expérimental. Le sujet est assis à environ 50 cm d'un écran d'ordinateur. Le stimulus décrit une forme elliptique. Le sujet appuie sur la flèche droite ou gauche du clavier pour diminuer ou augmenter la vitesse de mouvement jusqu'à ce qu'il ait trouvé la vitesse qu'il préfère.

¹² Les étapes de modification du profil de vitesse ainsi que la procédure d'interpolation linéaire sont expliquées de manière détaillée en annexe I.

L'expérience comprenait quinze essais correspondant à quinze tailles d'ellipse déterminées aléatoirement entre 3 et 60 cm arrondi au dixième de centimètre. Les quinze ellipses suivaient, en fonction de la condition expérimentale, un des quatre profils de vitesse décrits préalablement. La période initiale était également choisie aléatoirement (équipartition entre 0.15 et 8 s). Les sujets avaient pour tâche de trouver leur vitesse préférée c'est à dire une vitesse qu'ils jugeaient comme « normale », ni trop lente, ni trop rapide. Pour cela, ils pouvaient faire varier la vitesse du stimulus en utilisant les flèches du clavier. Les flèches de gauche et de droite permettaient respectivement d'augmenter ou de diminuer la vitesse de mouvement. Chaque pression sur une des flèches faisait évoluer la période de mouvement de 25 ms. Aucune limite de temps n'était imposée même si les sujets étaient encouragés à faire un choix spontané. Une fois leur choix effectué, les sujets appuyaient sur le bouton « entrée » du clavier et déclenchaient l'essai suivant, ceci avec un délai aléatoire compris entre 0.5 et 2.5 s.

II.1.3 Résultats

Avant d'entreprendre l'analyse des résultats obtenus en conditions non naturelles, nous avons vérifié que les données obtenues pour les stimuli naturels étaient bien conformes à celles observées préalablement dans l'expérience de Bidet-Ildei et al (Sous-presse). Pour chaque sujet, nous avons donc effectué une régression de puissance entre les périodes finales choisies et le périmètre des ellipses $P_f = P_0 * P^\gamma$ (voir fig. 5).

Un filtrage a permis de retirer les valeurs extrêmes et de les remplacer dans l'analyse de régression par des valeurs potentielles qui tenaient compte à la fois des paramètres de la régression et de la dispersion observée chez chaque sujet (Belsley, Kuh, & Welsch, 1980). L'analyse a consisté à étudier pour chaque tâche 1) la cohérence des données à partir de l'analyse des coefficients de corrélation (r), 2) le degré d'isochronie en évaluant la valeur de l'exposant (γ) de la fonction de puissance et 3) la vitesse moyenne préférée des sujets en étudiant leur période de référence (P_0).

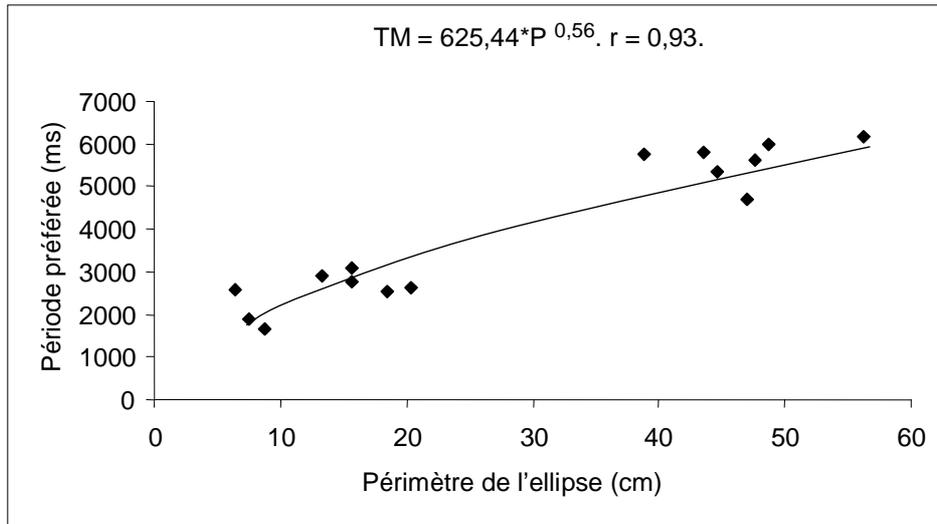


Figure 5 : Exemple de la méthode d'analyse utilisée pour un sujet. Les données sont approximées par la fonction de puissance $P_f = P_0 * P^\gamma$ où P_f représente la période préférée des sujets, P , le périmètre de l'ellipse, P_0 la période de référence et γ l'exposant de la fonction de puissance qui indique le degré d'isochronie.

Les valeurs des coefficients de corrélation ont été transformées en valeur Z Fisher et nous avons utilisé les logarithmes des périodes de référence ($\log P_0$) afin de respecter les conditions de normalité nécessaire à la pratique d'une ANOVA.

II.1.3.1 Analyse des mouvements naturels

Concernant la cohérence des résultats, on observe en moyenne de forts coefficients de corrélation ($r = 0.71 \pm 0.49$) ce qui rend compte de la bonne approximation des données par une fonction de puissance même si nos résultats sont sensiblement inférieurs à ceux observés par Bidet-Ildi et al (Sous-presse).

Concernant le degré d'isochronie, la moyenne observée pour l'exposant γ (0.36 ± 0.22) est proche de celle observée par Bidet-ildei et al. (0.44) et indique un degré d'isochronie encore plus important.

Concernant les périodes de références, on observe une moyenne plus faible (0.69 ± 0.24) que celle observée précédemment. En résumé, les données obtenues sont bien conformes au respect du principe d'isochronie pour les mouvements naturels.

II.1.3.2 Analyse des mouvements non naturels

L'analyse suivante était destinée à tester le respect du principe d'isochronie pour le jugement perceptif de stimuli elliptiques non naturels. La procédure utilisée pour évaluer la régression de puissance entre la période finale choisie et le périmètre des ellipses est la même que celle utilisée précédemment. Les calculs ont permis pour chaque sujet et chaque condition d'évaluer le coefficient de corrélation (r), le degré d'isochronie (γ) et la période de base des sujets (P_0).

Dans un premier temps, nous avons vérifié les conditions d'homogénéité des variances et de normalité pour chaque paramètre et chaque condition. Les tests de Levene et Lilliefors pratiqués sur les données révèlent pour chaque paramètre et chaque condition une homogénéité des variances ($F(2,30) = 0.83 ; 1.54$ et 0.32 , $p = ns$) et un respect de la loi normale ($p > 0.20$ dans chaque condition et pour chaque paramètre).

Ensuite, nous avons comparé statistiquement les conditions non naturelles ($1-\beta = -0.33 ; 1-\beta = 0$ et $1-\beta = 0.66$) à la condition contrôle ($1-\beta = 0.33$) en réalisant des contrastes. Les valeurs moyennes de chaque indice sont données dans le tableau.1.

Tableau 1: Valeurs moyennes du coefficient de corrélation, de l'exposant et de la période de référence dans chaque condition. Les valeurs moyennes des coefficients de corrélation (r) et des périodes de référence (P_0) ont été obtenues à partir de la transformation inverse des valeurs Z Fisher et des valeurs $\log P_0$. La situation $\beta = 0.33$ est considérée comme une situation contrôle.

Cond	r	γ	P_0
$1-\beta = -0.33$	0.78	0.33	0.61
$1-\beta = 0$	0.81	0.34	0.88
$1-\beta = 0.66$	0.78	0.43	0.53
$1-\beta = 0.33$	0.71	0.36	0.69

Concernant les coefficients de corrélation, on observe aucune différence significative entre les conditions non naturelles et la condition contrôle ($F(1,56) = 1.22$, $p = ns$) ce qui suggère une importante cohérence des résultats ($r = 0.78 \pm 0.49$) quel que soit le type de mouvement.

Concernant le degré d'isochronie, nous observons également une absence de différence entre les conditions non naturelles et la condition contrôle ($F(1,56) = 0.01$, $p = ns$).

Enfin, les périodes de référence ne présentent pas non plus de différences significatives en fonction de la condition ($F(1,56) = 0.04$, $p = ns$).

II.1.4 Conclusion

Le but de cette expérience était de savoir si l'intervention du système moteur était à l'origine du phénomène « d'isochronie perceptive » observé lors de la présentation visuelle de mouvements elliptiques naturels (respectant la loi de puissance $2/3$). Pour cela, nous avons testé les préférences perceptives des sujets pour des stimuli non reproductibles par le système moteur humain. Il s'agissait de forme elliptique associée à une cinématique non naturelle c'est-à-dire ne respectant pas la loi de puissance $2/3$.

Les analyses ont permis de mettre en évidence un respect du principe d'isochronie perceptive lors du jugement visuel d'ellipse ayant une cinématique naturelle mais également non naturelle. Ainsi, quelle que soit la cinématique (naturelle ou non naturelle) on observe le respect d'une relation de puissance entre les périodes préférées des sujets et le périmètre des ellipses se caractérisant par un exposant dont la valeur est proche de 0.36.

Ce résultat permet de remettre en cause la nécessité d'une intervention motrice pour expliquer le phénomène d'isochronie perceptive observé lors du jugement de formes elliptiques naturelles. Il est d'autant plus surprenant que le principe d'isochronie serait intrinsèquement lié à l'application de la loi de puissance $2/3$ (Viviani & Flash, 1995). Selon ces auteurs, l'augmentation de la vitesse de mouvement observée lorsque le périmètre de l'ellipse augmente serait liée à l'augmentation du gain de vitesse (K) observé avec la diminution de la courbure de la trajectoire. En effet, l'augmentation du périmètre de l'ellipse réduirait la courbure de la trajectoire et impliquerait une augmentation de vitesse plus importante dans l'exécution du mouvement. De plus, ce principe n'a pu être retrouvé cognitivement puisqu'il n'est pas connu consciemment par les sujets qui pensent systématiquement avoir choisi des périodes de mouvements plus lentes quand le périmètre de l'ellipse augmentait. L'application de ce principe dans un contexte non naturel est donc très surprenante. Une des explications les plus simples serait de considérer que le principe

d'isochronie perceptif peut être activé à partir de la forme de la trajectoire, seul paramètre à n'avoir subi aucune transformation. Cependant, nous avons vu précédemment (cf p 9) que la forme de mouvement perçue est dépendante de la cinématique. Ainsi, même si la forme de la trajectoire n'a subi aucune transformation objective, il est probable qu'un phénomène d'illusion se produise et que la forme perçue ne soit pas tout à fait équivalente à la forme présentée. Toutefois, nous pouvons noter que ce phénomène d'illusion est limité du fait de l'orientation de l'ellipse à -45° . Cependant, même dans ce cas, nous pourrions nous attendre à quelques perturbations comme une diminution de la cohérence des résultats signe d'un compromis entre la forme reconnue et la cinématique non naturelle. L'absence de perturbation suggère donc que l'activation du principe d'isochronie est associée à un phénomène d'illusion temporelle, aboutissant à une non prise en compte de la nature de la cinématique dans cette tâche de préférence visuelle. Si cette hypothèse paraît dans un premier temps peu vraisemblable car on sait que les sujets distinguent des stimuli naturel et non naturel (Bidet-Ildei et al., 2006) elle devient possible si l'on prend en compte le fait 1) que les mouvements sont présentés en continu, 2) que la consigne n'exige pas le suivi exact du mouvement du point et 3) que l'expérimentateur dit explicitement aux sujets qu'il s'agit de mouvements elliptiques. En effet, les expériences précédentes ont démontré d'une part que le suivi d'un mouvement non naturel était très difficile (phénomène d'avance ou de retard) et très coûteux en attention (de'Sperati & Viviani, 1997; Viviani & Mounoud, 1990) et d'autre part que la reconnaissance explicite d'une forme implique des difficultés à reconnaître l'aspect naturel ou non naturel de la cinématique (Bidet-Ildei et al., 2006). On pourrait donc tout à fait envisager qu'après un certain nombre de périodes où le suivi du point s'avère difficile, le sujet active le modèle interne de cinématique correspondant à la forme reconnue (c'est-à-dire la loi de puissance $2/3$) et donc retombe sur l'évaluation de la vitesse d'une ellipse naturelle. Cette explication est confortée par le fait que l'on note une diminution de la gêne provoquée par l'aspect non naturel de l'ellipse avec le temps. De plus, nous pouvons souligner, et ceci même si nous ne l'avons pas mesuré explicitement, que l'évaluation des ellipses naturelles était toujours réalisée plus rapidement que l'évaluation des ellipses non naturelles. Cependant, si cette explication permet de rendre compte de nos résultats, elle ne permet pas de se prononcer sur l'utilisation du système moteur pour activer le principe d'isochronie en perception. En effet, il se pourrait que la cinématique naturelle soit associée à la forme reconnue grâce à une mémoire motrice qui pourrait être sollicitée

par simulation ou résonance. De plus, une fois le phénomène d'illusion cinématique en place, plus rien n'empêche l'intervention du système moteur pour rendre compte de l'application du principe d'isochronie car toutes les situations (naturelle ou non naturelle) deviennent équivalentes. Ainsi, cette expérience à elle seule ne permet pas d'évaluer précisément l'implication du système moteur pour rendre compte des phénomènes de préférence perceptive.

Une autre explication, serait de considérer que les sujets ont réduit la tâche de préférence perceptive au choix d'un rythme de mouvement en basant leurs jugements uniquement sur une constante rythmique (haut-bas). Dans ce cas, les mouvements elliptiques sont réduits à de simples allers-retours et on comprend aisément que la cinématique du mouvement n'intervienne pas dans ces choix.

L'expérience suivante a pour but de tester les jugements visuels de mouvements de pointage non naturels afin de vérifier si les principes moteurs guidant la production de ce type de mouvement sont à l'œuvre dans le cas du jugement perceptif de mouvements de pointages non simulables par un organisme humain.

Résumé

Cette expérience visait à tester la nécessité d'une intervention motrice pour expliquer le respect d'un principe d'isochronie (i.e., tendance à maintenir constante la durée du mouvement quand l'amplitude augmente) observé lors de la perception visuelle de mouvements elliptiques. Pour cela, 60 adultes, répartis dans quatre conditions expérimentales, devaient ajuster la vitesse de quinze ellipses d'amplitude variables présentées sur un écran. La cinématique des mouvements pouvaient être ou non conformes à la loi de covariation vitesse-courbure. Si le respect du principe d'isochronie est dû à une simulation intériorisée du mouvement, nous devrions observer des perturbations lors du jugement visuel des mouvements non naturels qui sont par définition non simulables par le système moteur. L'analyse a porté sur la cohérence des données, le degré d'isochronie et le temps de base des sujets. Les résultats indiquent des préférences perceptives en accord avec le principe d'isochronie que la cinématique de mouvement soit ou non conforme à la loi de covariation vitesse-courbure. Les données permettent de relativiser l'utilisation d'une simulation intériorisée du mouvement pour rendre compte des préférences perceptives des sujets concernant la perception visuelle des mouvements humains.

II.2 INFLUENCE DE LA CINEMATIQUE SUR LES PREFERENCES PERCEPTIVES : MOUVEMENTS DE POINTAGE

II.2.1 Introduction

On sait que la production de mouvements de pointage aller-retour respecte une loi mathématique très précise, que l'on nomme en référence au chercheur qui l'a découverte, la loi de Fitts (Fitts, 1954). Cette loi définit une relation logarithmique entre le temps d'exécution d'un mouvement et la difficulté de celui-ci. Elle est formalisée de la façon suivante : $TM = a + b \log_2(2D/L)$ où TM représente le temps de mouvement, D la distance entre les deux cibles, L la largeur des cibles, et a et b deux constantes. Le rapport $(2D/L)$ est considéré comme un indice de difficulté. Cette loi a également été démontrée dans le cas de la production de mouvements de pointage discrets (Fitts & Peterson, 1964). Bien qu'elle ait été formalisée de façon différente (i.e., Meyer, 1990) il semble exister un accord sur le fait que le temps de mouvement dépend des contraintes spatiales, et notamment de la distance à parcourir et de la taille de la cible.

D'autre part, Meary, Chary, Palluel-Germain, & Orliaguet (2005) ont montré (même s'ils ne l'ont pas testé explicitement) que les jugements perceptifs des mouvements de pointage se rapprochaient de la loi de Fitts. Le but de cette expérience est de déterminer, comme dans l'expérience précédente si les préférences perceptives concernant les mouvements de pointage sont dépendantes ou non d'une intervention motrice. Pour cela, nous allons d'une part tester de manière plus systématique si la loi de Fitts contraint ou non le jugement perceptif de mouvements de pointage et d'autre part si la cinématique du mouvement a un impact sur ces jugements.

II.2.2 Méthode

II.2.2.1 Sujets

Cinquante quatre sujets droitiers ont participé à l'expérience. Il s'agissait d'étudiants de premier cycle de l'Université Pierre Mendès France. Tous étaient naïfs vis-à-vis des hypothèses testées dans cette étude. Les sujets ne présentaient aucun trouble visuel ou moteur particulier et ceux ayant une vue corrigée portaient leurs lunettes durant l'expérience. Leur participation était rétribuée par l'obtention de points comptant pour leurs examens de fin d'année. Cinq sujets ont été ajoutés pour la préparation des stimuli.

II.2.2.2 Préparation et présentation des stimuli

Les stimuli consistaient en des mouvements de pointage construits à partir de la production réelle de cinq sujets. La tâche de ces sujets était d'effectuer le plus rapidement et le plus précisément possible un mouvement de pointage de cible. Les mouvements étaient réalisés sur une tablette graphique (Wacom GD.1218R, fréquence d'échantillonnage 200 Hz, précision spatiale 0.2 mm). Trois distances (10, 15 et 20 cm) et trois tailles (0.4, 0.7 et 1.2 cm) de cible ont été choisies. Ceci a permis en fonction de la loi de Fitts (1954) de déterminer neuf indices de difficulté (ID). Ils sont égaux au logarithme en base 2 de deux fois la distance divisée par la taille de la cible soit 4.05 ; 4.64 ; 4.84 ; 5.06 ; 5.42 ; 5.64 ; 5.84 ; 6.22 et 6.64. Chacun des cinq sujets effectuait cinq essais par indice de difficulté. Les vingt cinq essais ainsi obtenus ont permis de calculer la trajectoire et le profil de vitesse moyens des mouvements de pointage correspondant à chaque indice de difficulté.

Les neuf stimuli visuels consistaient dans la présentation d'un point noir ($\emptyset = 0.4$ mm) se déplaçant d'un point de départ (représenté par un carré de 1 cm) vers une cible de 0.4, 0.7. ou 1.2 cm. Celle-ci pouvant se trouver à une distance de 10, 15 ou 20 cm du point de départ (voir fig. 6A). Dans chaque cas, le point se déplaçait selon la trajectoire moyenne calculée précédemment. Le profil de vitesse de chaque mouvement pouvait, soit correspondre à la production réelle (condition naturelle), soit présenter une vitesse constante (condition constante) c'est-à-dire différente de ce qui est normalement observé dans la production de mouvements de pointage (voir fig. 6B). Afin de garder la trajectoire du mouvement de pointage identique, les coordonnées (X,Y) du mouvement ont été recalculées en prenant soin de rendre la distance entre deux coordonnées ($= \sqrt{(x^2 + y^2)}$) constante tout au

long de la trajectoire. Le logiciel de présentation des stimuli permettait aux sujets de régler la durée des mouvements sans modifier ni la forme de la trajectoire ni la distribution de la vitesse le long de cette trajectoire.

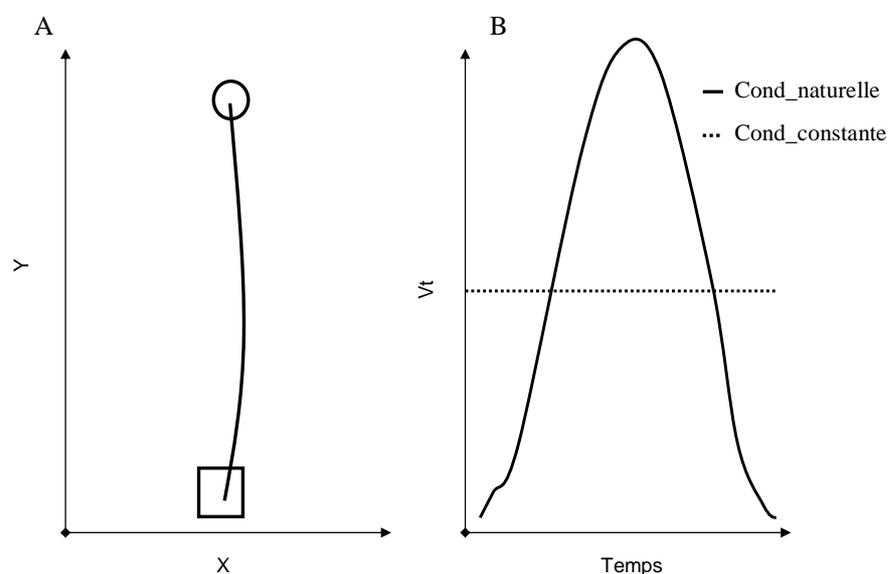


Figure 6: Caractéristiques géométriques et cinématiques des stimuli. A) Exemple d'une trajectoire caractéristique d'un mouvement de pointage pour un indice de difficulté donné. B) Allure des profils de vitesse associés à la trajectoire. Le trait plein représente la condition naturelle obtenue à partir du tracé réel des participants additionnels. Celui en pointillé représente une situation de vitesse constante. Quelle que soit la condition la trajectoire présentée correspondait à la trajectoire moyenne calculée.

II.2.2.3 Procédure

L'expérience se déroulait dans une pièce calme. Les sujets étaient assis à environ 50 cm d'un écran d'ordinateur (17", résolution 1024*768 pixels, fréquence d'échantillonnage 85 Hz). Les stimuli apparaissaient sur un fond blanc de dimension 22*22 cm. La durée initiale de mouvement était choisie aléatoirement entre 0.15 et 2.5 s. Pour chaque essai le sujet devait régler la vitesse du mouvement pour qu'elle lui paraisse « naturelle » et adéquate pour atteindre la cible le plus rapidement possible sans la rater. Pour cela, il disposait des flèches de gauche et de droite d'un clavier d'ordinateur (voir fig. 7). Chaque pression sur une des flèches faisait varier la période de mouvement de 25 ms. L'expérience se déroulait en 3 phases qui correspondaient à chaque taille possible de la cible (0.4, 0.7 et 1.2 cm). L'ordre des phases était choisi aléatoirement. Chaque phase

consistait en 12 essais (soit 2 types de mouvement (cinématique naturelle et vitesse constante) * 3 distances (10, 15 et 20 cm) * 2 essais). L'ordre des essais était choisi aléatoirement.

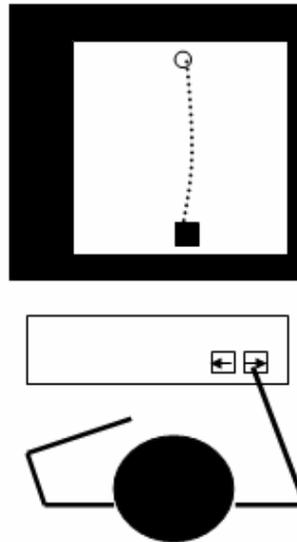


Figure 7: Dispositif expérimental. Le stimulus consiste en 1 point noir ($\varnothing = 0.4$ mm) se déplaçant d'un point de départ (carré de 1 cm) vers une cible dont la taille et la distance peuvent varier. Les stimuli diffèrent selon la cinématique associée au déplacement du point (naturelle ou constante). Le sujet doit dans chaque cas ajuster avec les flèches de droite et de gauche du clavier la vitesse de mouvement pour qu'elle lui paraisse « naturelle » et « adéquate » pour atteindre la cible le plus rapidement possible sans la rater.

II.2.3 Résultats

L'analyse a porté sur les préférences perceptives des sujets concernant le jugement de mouvements de pointage naturels ou présentés avec une vitesse constante et plus particulièrement sur le respect de la loi de Fitts. Pour chaque sujet et pour chaque type de mouvement nous avons recueilli 18 valeurs correspondant à 2 essais par combinaison distance-taille (9 combinaisons = 3 distances * 3 tailles). Les données ont été approximées selon la fonction linéaire définie par $TM = a + b * ID$ (voir introduction). Trois paramètres ont été évalués pour chaque sujet et chaque condition (le coefficient de corrélation, la pente et l'ordonnée à l'origine). Un filtrage a été préalablement effectué afin de retirer les valeurs extrêmes et de les remplacer par des valeurs potentielles qui tenaient compte à la fois des paramètres de la régression et de la dispersion observée chez chaque sujet (Belsley et al., 1980). La figure 8 présente un exemple de l'analyse effectuée.

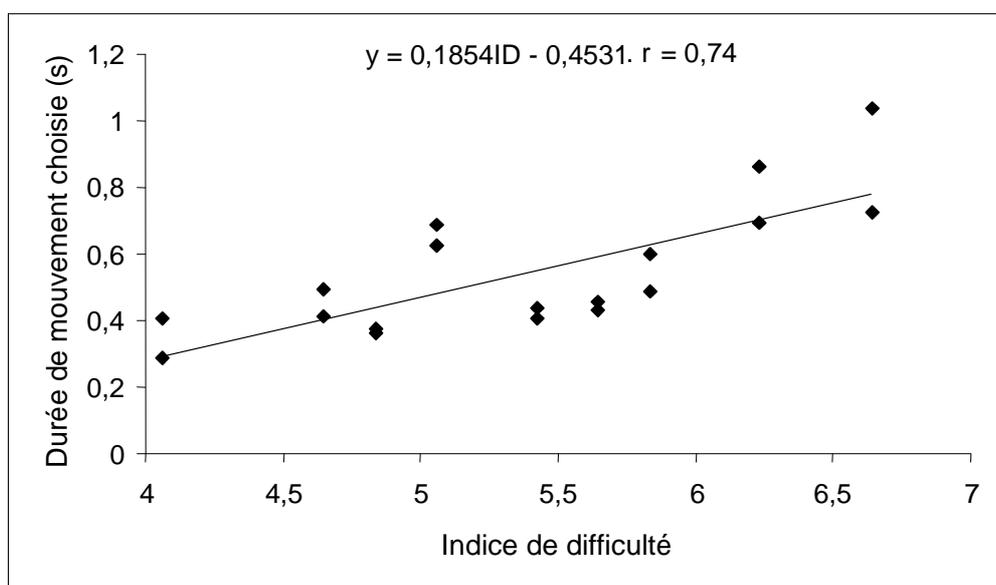


Figure 8 : Exemple pour un sujet de la régression linéaire effectuée entre les indices de difficulté et la durée de mouvement préférée. Dans chaque cas trois paramètres sont évalués (le coefficient de corrélation, la pente et l'ordonnée à l'origine).

Pour tester la significativité des différences entre les conditions, nous avons utilisé les valeurs Z Fisher des coefficients de corrélation afin de respecter les conditions de normalité nécessaire à la pratique d'une ANOVA (Kendall & Stuart, 1979).

Le test de Lilliefors révèle un respect de loi normale ($p > 0.15$) pour chaque paramètre et chaque condition. Les résultats moyens obtenus sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 2 : Valeurs moyennes de coefficient de corrélation (r) de la pente et de l'ordonnée à l'origine dans chaque condition (naturelle et constante).

	Coefficient de corrélation	Pente	Ordonnée
Cond_naturelle	0.69	0.11	0.03
Cond_constante	0.70	0.11	-0.003

Pour chaque paramètre de la régression les deux conditions ont été comparées avec une ANOVA. L'analyse ne révèle aucune différence significative entre les deux conditions expérimentales que ce soit pour les valeurs Z (Fisher) pour les pentes ou pour les ordonnées ($F(1,53) < 1$ pour chaque paramètre).

II.2.4 Conclusion

Le but de cette expérience était de déterminer si les choix perceptifs des sujets concernant la relation entre la durée du mouvement et l'indice de difficulté suivaient la loi de Fitts connue pour contraindre la production de mouvements de pointage. En outre, nous voulions voir si les préférences perceptives des sujets étaient modifiées dans le cas de jugements de pointage non naturels c'est-à-dire non reproductibles par un être humain.

L'analyse des préférences perceptives a permis de mettre en évidence le suivi d'une relation linéaire entre le temps de mouvement préféré des sujets et l'indice de difficulté ce qui correspond au suivi de la loi de Fitts. Cependant, ces préférences perceptives semblent guidées par un principe commun que les mouvements de pointage soient naturels ou non naturels. Cette constatation suggère que le respect de la loi de Fitts n'est pas contraint par la cinématique (naturelle ou non naturelle) du mouvement. Cependant, une autre explication est tout à fait envisageable : la perception de mouvement de pointage de cible (naturel ou non naturel) est traitée cognitivement et est indépendante d'une intervention motrice. En effet, un traitement cognitif de la tâche impliquerait exactement les mêmes résultats que ceux observés dans le cas d'une utilisation de la loi de Fitts puisqu'il s'agit de choisir une augmentation de la durée de mouvement proportionnelle à la difficulté de celui-ci. Dans ce cas, on peut comprendre que la cinématique ne soit pas une donnée déterminante dans les préférences perceptives des sujets. Cette hypothèse s'accorde avec le fait que les sujets sont conscients de la stratégie utilisée. Ils disent clairement avoir choisi des temps plus faibles pour des cibles « grandes » placées proches du point de départ que pour des cibles « petites » placées à une distance plus importante. D'autre part, sur le plan moteur le temps de mouvement tel qu'il est prédit par la loi de Fitts dépend directement des ajustements finaux que l'on observe en fin de mouvement lorsque la précision augmente (petite cible). Ainsi, il est difficile d'imaginer l'utilisation de cette loi en perception car 1) aucun ajustement n'est nécessaire dans cette tâche, la cible est atteinte à tous les essais quel que

soit la vitesse de mouvement et 2) cela impliquerait que les sujets effectuent des prédictions sur les ajustements nécessaires à l'exécution de chaque pointage, ce qui est extrêmement coûteux et ne s'accordent pas très bien avec le fait que les sujets choisissent très rapidement la vitesse qu'ils préfèrent. Nous reviendrons sur cette différence de stratégie (motrice vs cognitive) dans l'expérience suivante qui a pour objectif de comparer directement les préférences perceptives concernant les mouvements non naturels de pointage et d'écriture.

Résumé

Cette expérience avait pour but de tester le respect de la loi de Fitts (i.e., tendance à augmenter linéairement la durée d'un mouvement avec sa difficulté) pour rendre compte des préférences perceptives concernant les mouvements de pointage de cible. D'autre part, nous voulions déterminer dans quelle mesure ce respect était dû à l'intervention d'une simulation motrice intériorisée des mouvements. Pour cela, 54 sujets droitiers devaient ajuster la vitesse de neuf pointages de cible de difficulté variable pour qu'elle leur paraisse adéquate pour atteindre la cible le plus rapidement possible. Les mouvements de pointage se différençaient selon la distribution de la vitesse le long de la trajectoire. Celle-ci pouvait être naturelle (respect de la loi de Fitts) ou non naturelle (vitesse constante). Pour chaque condition nous avons testé la relation linéaire entre l'indice de difficulté du mouvement et le temps de mouvement choisi. L'analyse a porté sur le coefficient de corrélation, la pente et l'ordonnée à l'origine. Les données s'organisent selon une relation linéaire entre l'indice de difficulté du mouvement et le temps choisi quelle que soit la cinématique du mouvement (naturelle ou constante). Ces résultats remettent donc en cause l'implication du système moteur pour rendre compte des préférences perceptives concernant les mouvements de pointage de cible mais seraient plutôt compatibles avec l'utilisation d'une stratégie cognitive.

II.3 ETUDE DES PREFERENCES PERCEPTIVES : MOUVEMENTS D'ECRITURE ET DE POINTAGE NON NATURELS

II.3.1 Introduction

Comme nous l'avons vu au cours des deux expériences précédentes, la production de mouvements de pointage et d'écriture est contrainte par des règles motrices différentes. Ainsi, la relation entre la durée de mouvement et son amplitude n'évolue pas de la même manière lorsqu'il s'agit de mouvements de tracé (écriture) ou de mouvements dirigés vers un but spatialement défini (pointage). Dans le premier cas, la relation espace-temps est soumise au respect du principe d'isochronie qui se manifeste par une augmentation de la vitesse du mouvement en fonction de l'augmentation de l'amplitude rendant la durée de mouvement relativement constante (Thomassen & Teulings, 1985). Pour les mouvements de pointage, au contraire, la relation espace-temps est dépendante de la loi de Fitts (Fitts, 1954) : on observe une augmentation quasi proportionnelle du temps de mouvement en fonction de l'amplitude de la trajectoire.

Récemment une expérience de Méary et al. (2005) a permis de montrer que les préférences perceptives concernant les mouvements d'écriture et de pointage n'étaient pas soumises à un principe général de covariation espace-temps mais dépendaient des principes moteurs à l'œuvre dans la production de chacun de ces mouvements (principe d'isochronie et loi de Fitts). Les auteurs ont comparé les relations existant entre les durées de mouvements préférées des sujets et l'amplitude de chaque mouvement, celle-ci correspondant à la hauteur des e pour les mouvements d'écriture et à la distance séparant le point de départ et la cible pour les mouvements de pointage.

Les résultats montrent une différence de jugement entre les deux types de mouvement. Ainsi, la pente observée pour les mouvements de pointage est beaucoup plus importante que celle observée pour les mouvements d'écriture. Ce résultat est interprété par les auteurs comme la manifestation de l'intervention directe du système moteur dans le jugement perceptif des mouvements. Cependant, compte tenu des résultats obtenus lors des expériences précédentes, il apparaît que l'intervention du système moteur, ne serait pas

nécessaire pour rendre compte des préférences perceptives. Afin de répondre à cette question, nous avons comparé les jugements visuels concernant les mouvements de pointage et d'écriture non reproductibles par le système moteur. Si les différences observées pour les mouvements naturels dépendent d'une intervention motrice nous devrions observer des perturbations lors du jugement des mouvements non naturels. On pourrait ainsi s'attendre à observer des résultats correspondants à l'application d'une loi générale de covariation espace-temps quel que soit le type de mouvement (écriture ou pointage).

II.3.2 Méthode

Les stimuli, la procédure et l'analyse des résultats étaient similaires à ceux utilisés dans l'expérience de Méary et al. (2005). Seule la cinématique des stimuli a été modifiée pour obtenir des mouvements non naturels c'est-à-dire non conformes aux lois cinématiques du mouvement.

II.3.2.1 Sujets

Cent six adultes volontaires ont participé à l'expérience. Il s'agissait d'étudiants de l'université Pierre Mendès France de Grenoble. Aucun d'eux ne présentait de trouble moteur ou visuel particulier et tous étaient naïfs vis-à-vis des hypothèses testées dans cette étude. Les sujets ayant une vue corrigée portaient leurs lunettes durant l'expérience. Leur participation était rétribuée par des points comptant pour leurs examens de fin d'année.

II.3.2.2 Préparation et présentation des stimuli

Pour la condition "écriture", le stimulus consistait en un point noir de 0.4 mm de diamètre se déplaçant sur un fond blanc (22*22 cm). Le déplacement était défini par 400 coordonnées (X,Y) représentant la forme caractéristique d'un *e* en écriture cursive associée à une cinématique ne correspondant pas à un mouvement naturel. Deux types de cinématique ont été utilisées (voir fig. 9A droite). La première a consisté à associer à la forme du *e* une vitesse tangentielle constante c'est-à-dire correspondant à la production d'un cercle. Pour cela, les coordonnées (X,Y) du mouvement ont été recalculées en prenant soin de rendre la distance entre deux coordonnées ($= \sqrt{(x^2 + y^2)}$) constante tout au long de la trajectoire. La seconde cinématique consistait en une inversion point par point des valeurs de la vitesse tangentielle normalement observée. Afin de garder la trajectoire du mouvement

d'écriture identique, les nouvelles coordonnées (X,Y) du mouvement ont été retrouvées par interpolation linéaire à partir des coordonnées (X,Y) de départ¹³. Le programme de présentation du stimulus permettait de modifier l'amplitude et la durée du mouvement sans changer ni la forme ni la cinématique du stimulus. Quatre amplitudes différentes (2.5 ; 7.5 ; 12.5 et 17.5 cm) et 25 durées de mouvement (de 0.15 à 2.55 s par pas de 100 ms) ont été sélectionnées.

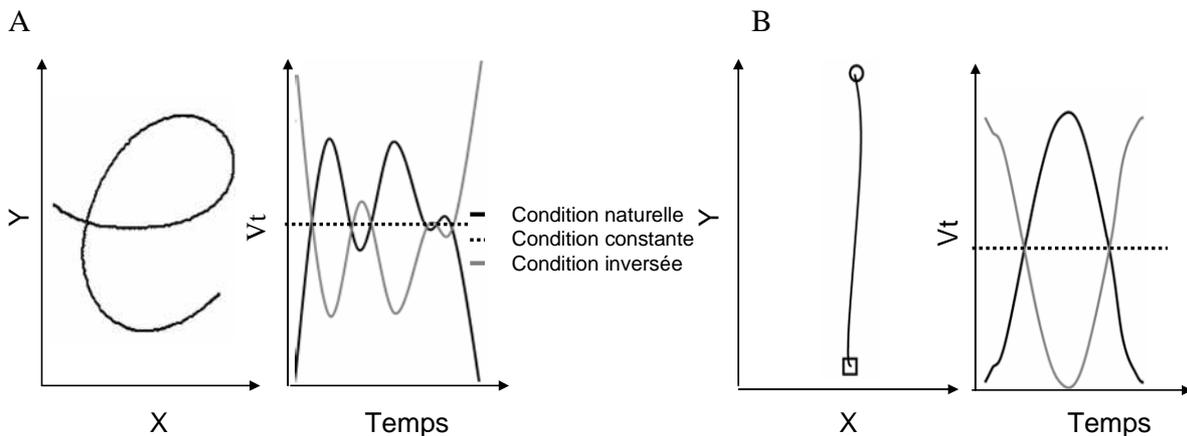


Figure 9: Caractéristiques et profil de vitesse des stimuli dans la condition écriture (A) et dans la condition pointage (B). Le profil de vitesse naturel est donné à titre indicatif, il ne correspond pas à une situation expérimentale.

Concernant les mouvements de pointage, les stimuli consistaient également en un point noir de 0.4 mm de diamètre se déplaçant sur un fond blanc (22*22 cm) d'un point de départ (représenté par un carré de 1 cm de côté) à une cible de 1 cm de diamètre. Le déplacement du point était également déterminé par 400 coordonnées (X,Y) représentant la forme caractéristique d'un mouvement de pointage associé à deux cinématiques non naturelles. Les nouveaux profils de vitesse ont été obtenus soit en rendant constante la vitesse tangentielle le long de la trajectoire soit en inversant point par point les valeurs de la vitesse tangentielle normalement observée (voir fig. 9B droite). Pour cela, les nouvelles coordonnées du mouvement ont été recalculées comme pour le *e* par interpolation linéaire à

¹³ La procédure d'inversion du profil de vitesse ainsi que le calcul des nouvelles coordonnées sont détaillés en annexe II.

partir de la trajectoire naturellement observée¹³. Comme pour les mouvements d'écriture 4 amplitudes (2.5 ; 7.5 ; 12.5 et 17.5 cm) et 25 durées de mouvement (de 0.15 à 2.55 s par pas de 100 ms) ont été choisies.

II.3.2.3 Procédure

Chaque sujet était aléatoirement réparti dans une des quatre conditions expérimentales (écriture / vitesse constante, écriture / vitesse inverse, pointage / vitesse constante et pointage / vitesse inverse).

Dans la condition écriture, chaque stimulus était présenté sur un écran d'ordinateur (17", résolution 1024*768 pixels, fréquence d'échantillonnage 85 Hz) placé à environ 50 cm des sujets (voir fig. 10A). L'expérience commençait lorsque l'expérimentateur appuyait sur le bouton « démarrer » situé à gauche de l'écran. Après un délai de 0.5 s le stimulus apparaissait avec une amplitude et une durée de mouvement prédéterminée. Les sujets avaient pour tâche de déterminer si la vitesse d'exécution du mouvement leur paraissait « trop lente » (TL), « trop rapide » (TR) ou « ni trop lente ni trop rapide » (NLNR). Ils répondaient en choisissant un des trois onglets (TL, NLNR ou TR) correspondant à chacune des catégories. La position des onglets TL et TR était contrebalancée. La réponse devait être la plus spontanée possible. Dès que le sujet cliquait sur un des boutons l'essai suivant commençait après un délai de 0.5 s.

L'expérience comprenait quatre sessions (correspondant aux quatre amplitudes de mouvement). Dans chaque session, les 25 durées de mouvement possibles étaient présentées dans un ordre aléatoire. Chaque session était séparée par une pause d'environ deux minutes permettant à l'expérimentateur de modifier l'amplitude du stimulus. Chaque sujet réalisait donc 100 jugements (25 durées * 4 amplitudes). L'expérience complète durait environ 25 minutes.

Pour les mouvements de pointage (voir fig. 10B) la procédure était identique à celle présentée précédemment à ceci près qu'un point de départ représenté par un carré de 1cm de côté et une cible de 1 cm de diamètre apparaissait 1.5 s avant l'exécution du mouvement de pointage. Pour chaque essai le sujet devait également juger la vitesse d'exécution du mouvement comme « trop lente », « trop rapide » ou « ni trop lente ni trop rapide ». Chaque sujet effectuait 100 jugements (25 durées de mouvements * 4 amplitudes).

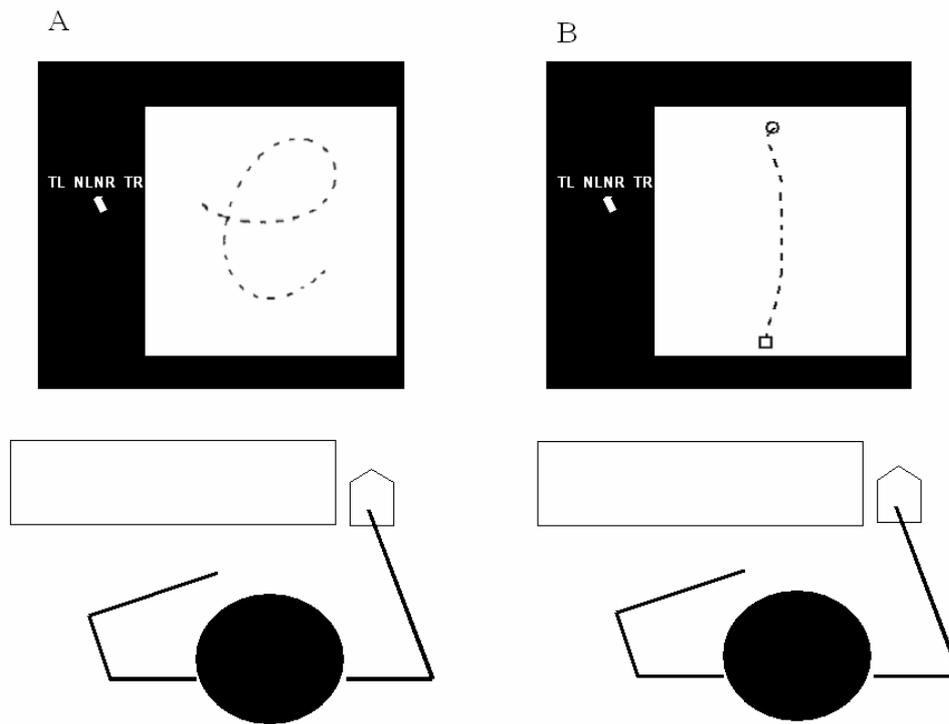


Figure 10: Dispositif expérimental. Dans chaque condition, le sujet est assis devant un écran d'ordinateur. Un point noir ($\varnothing = 0.4$ mm) décrit sur un fond blanc un mouvement d'écriture (A) ou de pointage (B) non naturels avec une amplitude et une durée prédéterminée. Dans chaque cas le sujet doit juger la vitesse d'exécution du mouvement comme « trop lente » (TL), « trop rapide » (TR) ou « ni trop lente ni trop rapide » (NLNR) en cliquant avec une souris sur une des trois réponses situées à gauche de l'écran.

II.3.3 Résultats

Dans un premier temps, nous avons testé la cohérence des jugements de vitesse pour l'ensemble des sujets en étudiant la distribution des valeurs choisies pour chaque catégorie de réponse (« trop lent », « ni trop lent ni trop rapide » et « trop rapide »). Ainsi, une médiane des durées de mouvement de chaque catégorie (Me) a été calculée en fonction de chaque amplitude, de chaque type de mouvement et de chaque condition (voir fig.11A et 11B).

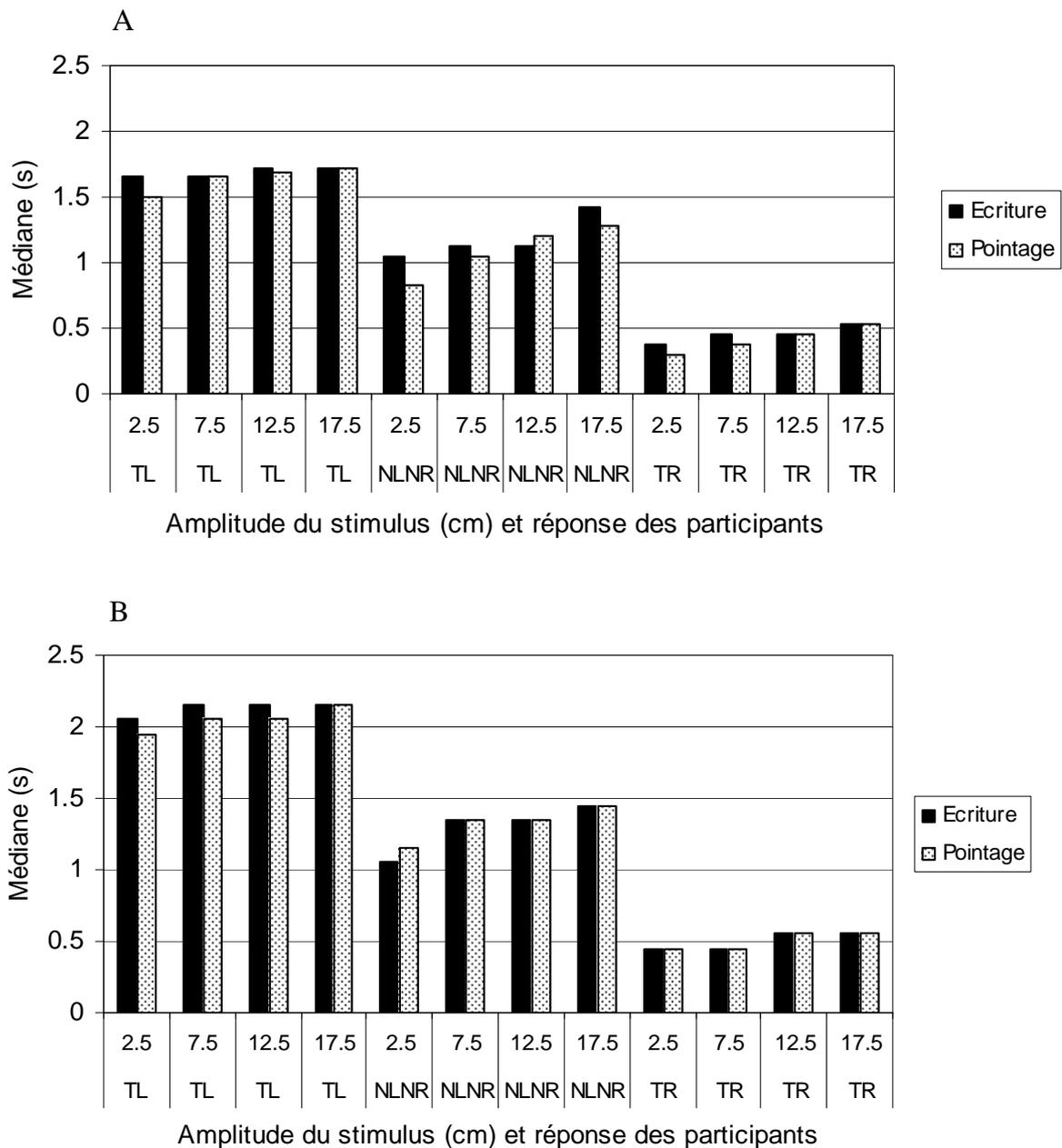


Figure 11: Médiane des durées de mouvement jugées comme « trop lente » (TL), « trop rapide » (TR) et « ni trop lente ni trop rapide » (NLNR) en fonction de l'amplitude (2.5 ; 7.5 ; 12.5 et 17.5 cm) et du type de mouvement (écriture ou pointage) pour la condition « vitesse constante » (A) et pour la condition « vitesse inverse » (B).

Quelle que soit la condition (cinématique constante ou inverse), le type de mouvement (écriture ou pointage) et l'amplitude des stimuli, la médiane (Me) correspond aux vitesses réelles de mouvement. Ainsi, les réponses « trop rapide » se situent dans les premiers intervalles de durée ($0.3 \text{ s} \leq Me \leq 0.55 \text{ s}$), pour les réponses « trop lentes » dans les

derniers intervalles de durée ($1.5 \text{ s} \leq \text{Me} \leq 2.15 \text{ s}$) et pour les réponses « ni trop lente ni trop rapide » dans des intervalles de durée intermédiaire ($0.825 \text{ s} \leq \text{Me} \leq 1.45 \text{ s}$). Les jugements de vitesse s'appuient donc bien sur des caractéristiques objectives de rapidité ou de lenteur des mouvements.

Par ailleurs, on peut observer pour les réponses « ni trop lente ni trop rapide » un décalage de la médiane. Ainsi, les sujets ont une tendance à considérer comme adéquate des durées de mouvements plus rapides pour la plus petite amplitude (pour 2.5 cm ; $0.825 \text{ s} \leq \text{Me} \leq 1.15 \text{ s}$) et plus lentes pour la plus grande (pour 17.5 cm ; $1.275 \text{ s} \leq \text{Me} \leq 1.45 \text{ s}$).

Le but de l'expérience était de déterminer dans quelle mesure l'intervention du système moteur guidait les préférences perceptives concernant les mouvements d'écriture et de pointage naturel. Le traitement statistique a donc uniquement porté sur les réponses « ni trop lente ni trop rapide » c'est-à-dire celles correspondant aux préférences visuelles des sujets.

Une première analyse a consisté à comparer pour chaque condition et chaque type de mouvement les moyennes de durée préférée des sujets en fonction de l'amplitude des mouvements (voir fig.12A et 12B). Quels que soit la condition et le type de mouvement les données sont bien approximées par une fonction linéaire (dans chaque cas $r \geq 0.82$, $p < 0.05$).

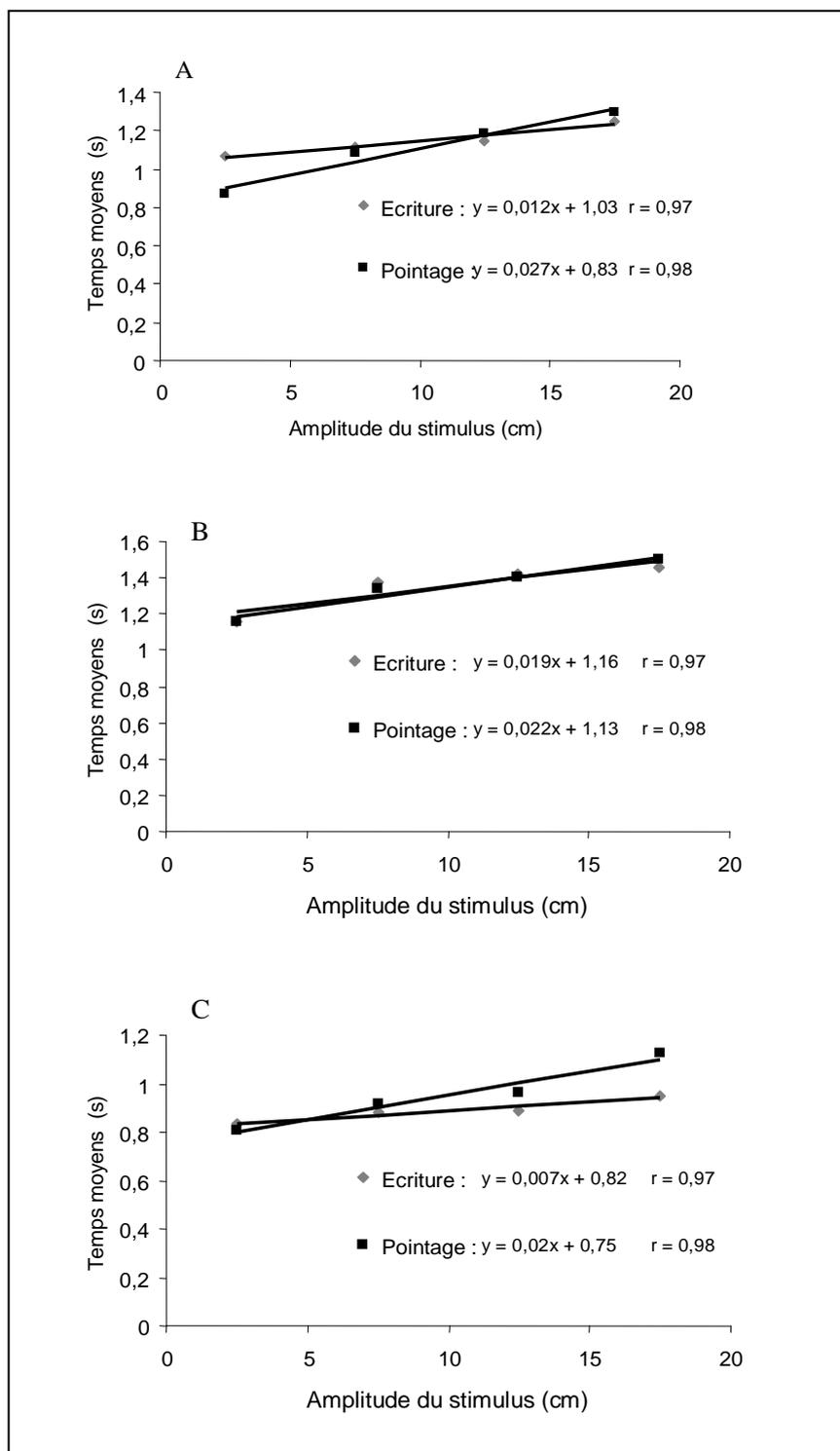


Figure 12: Durée de mouvement moyenne pour les vitesses considérées comme « ni trop lente ni trop rapide » en fonction de l'amplitude du stimulus et du type de mouvement (écriture, pointage) pour la condition vitesse constante (A), la condition vitesse inverse (B) et la condition naturelle (C). Ce dernier graphique a été emprunté à Méary et al. (2005), il est donné à titre indicatif. Dans chaque cas, les résultats sont bien approximés par une fonction linéaire (voir équations et coefficients de corrélation sur les graphiques).

Ensuite, pour chaque sujet, chaque type de mouvement et chaque condition, la moyenne des durées considérées comme « ni trop lente ni trop rapide » a été calculée et le lien existant entre ces durées et l'amplitude des mouvements a été approximé linéairement. Trois indices ont été calculés, le coefficient de corrélation, la pente et l'ordonnée à l'origine. Un filtrage a permis de retirer les valeurs extrêmes et de les remplacer dans l'analyse de régression par des valeurs potentielles qui tenaient compte à la fois des paramètres de la régression et de la dispersion observée chez chaque sujet (Belsley et al., 1980). Deux sujets ont été retirés de cette analyse car ils présentaient des résultats trop éloignés (> à deux écarts-type) du reste de la population. Les résultats moyens pour chaque paramètre et chaque condition sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3: Moyenne des paramètres pour chaque condition et chaque type de mouvement.

		Coefficient de corrélation	Pente	Ordonnée
Vitesse constante	E	0.71	0.013	1.004
Vitesse constante	P	0.88	0.03	0.794
Vitesse inverse	E	0.64	0.02	1.141
Vitesse inverse	P	0.81	0.024	1.052

Les paramètres de la régression linéaire pour chaque condition et chaque type de mouvement ont été comparés de façon indépendante avec une ANOVA. Pour cette analyse, nous avons utilisé les valeurs Z (Fisher) des coefficients de corrélation afin de respecter les conditions de normalité nécessaires à la pratique d'une ANOVA.

Pour la condition « vitesse constante », les tests de Lilliefors et Levene indiquent un suivi de la loi normale ($p > 0.20$) et une homogénéité des variances pour les ordonnées et les pentes ($F(1,50) < 1$, $p = ns$) mais pas pour les Fishers ($F(1,50) = 4.86$, $p < 0.01$). Cependant, nous avons quand même choisi de pratiquer une ANOVA. L'analyse statistique révèle un effet du type de mouvement sur les pentes ($F(1,50) = 12.72$, $p < 0.01$) et les ordonnées ($F(1,50) = 9.88$, $p < 0.01$) mais pas sur les coefficients de corrélation ($F(1,50) = 3.18$, $p = ns$). En outre, on observe comme c'était le cas dans l'expérience de

Méary et al (2005) des pentes plus élevées pour les mouvements de pointage (pente = 0.03 ± 0.017) que pour les mouvements d'écriture (pente = 0.013 ± 0.015).

Concernant la condition « vitesse inverse », les conditions de normalité et d'homogénéité des variances sont respectées pour tous les paramètres (test de Lilliefors $p > 0.20$ et test de Levene $F(1,50) < 1$, $p = ns$ dans chaque cas). L'analyse statistique ne révèle aucune différence entre les types de mouvements que ce soit pour les coefficients de corrélation ($F(1,50) = 2.86$, $p = ns$), les pentes ($F(1,50) < 1$) ou les ordonnées à l'origine ($F(1,50) = 1.47$, $p = ns$). Quel que soit le type de mouvement considéré (écriture ou pointage), les résultats sont bien approximés par une fonction linéaire. On observe une augmentation d'environ 20 ms de la durée du mouvement avec l'amplitude ce qui se rapproche de la pente observée pour les mouvements de pointage en situation naturelle (voir fig. 12C).

Enfin, la comparaison des résultats avec ceux de l'étude de Méary et al. (2005) permet de montrer une augmentation de la pente en conditions non naturelles (constante et inverse) pour les mouvements d'écriture ($F(1,82) = 7.35$, $p < 0.01$) alors que la pente des mouvements de pointage reste stable ($F(1,83) = 1.07$, $p = ns$).

II.3.4 Conclusion

Cette expérience avait pour but de tester si la différence observée par Meary et al (2005) en ce qui concerne les mouvements d'écriture et de pointage naturels (Meary et al., 2005) apparaissait également pour des mouvements non naturels. Il s'agissait de savoir si la différence observée dans le cas de mouvements naturels impliquait une simulation intériorisée de chaque type de mouvement.

Les données ont mis en évidence un effet de l'importance de la perturbation de la cinématique sur le jugement visuel de mouvements d'écriture et de pointage. Ainsi, dans la condition « vitesse constante », les jugements visuels sont similaires à ceux observés dans le cas de mouvements naturels. Par contre, pour la condition « vitesse inverse », la différence observée entre le jugement des mouvements d'écriture et de pointage disparaît et les résultats ont tendance à se rapprocher de ce qui est normalement observés pour les mouvements de pointage.

Le premier résultat intéressant est que les mouvements de pointage semblent très peu affecter par la cinématique du mouvement ce qui est tout à fait cohérent avec l'expérience précédente et confirme l'idée d'une stratégie différente pour rendre compte des préférences perceptives pour les mouvements de pointage et d'écriture. Cette hypothèse est étayée dans notre expérience par les résultats indiquant une importante différence de cohérence entre les jugements portant sur les mouvements de pointage et les mouvements d'écriture que ce soit dans la condition naturelle (voir, Meary et al., 2005) ou dans les conditions non naturelles (constante et inverse). L'accès conscient aux préférences perceptives pour les mouvements de pointage¹⁴ oriente tout naturellement vers l'utilisation d'une stratégie cognitive. Nous pouvons noter néanmoins pour les conditions non naturelles, une tendance à présenter des coefficients de corrélation plus faibles et des temps de référence plus lents par rapport à la condition naturelle, ce qui pourrait indiquer une perturbation dans le cas d'une cinématique non naturelle provoquée par exemple par une dissociation avec l'expérience visuelle du sujet.

D'autre part on observe une différence entre les deux conditions non naturelles (constante et inverse). Ceci nous amène à reconsidérer la simulation intériorisée du mouvement comme à l'origine de la différence observée dans le jugement perceptif de chaque type de mouvement. En effet, si la simulation intériorisée des mouvements était réellement à l'origine des préférences perceptives, on devrait observer une perturbation aussi bien pour la situation de « vitesse constante » que pour la situation de « vitesse inverse ». Ainsi, nous pouvons supposer que la perturbation observée dans le cas de la situation « vitesse inverse » n'est pas due à une impossibilité de simulation mais peut-être à une absence de reconnaissance de la forme du mouvement ou à une dissociation trop importante avec l'expérience visuelle des sujets. On peut supposer que dans la condition « vitesse constante », la perturbation étant plus faible, le sujet pourrait être à même d'activer des souvenirs qu'ils soient visuels ou moteurs basés sur la forme des stimuli. Cette différence pourrait être à l'origine d'une modification de la stratégie utilisée pour résoudre la tâche. Ainsi, les résultats tendent à montrer qu'un changement de stratégie (motrice vers

¹⁴ Il faut rappeler que quel que soit le type de mouvement considéré le principe d'isochronie est lui toujours appliqué de manière implicite (i.e., Meary et al., 2005).

cognitive) pourrait s'opérer lorsque les mouvements s'écartent trop de ce qui est habituellement observé ou réalisé.

Résumé

Récemment, une expérience a montré que les préférences perceptives concernant les relations espace-temps sont différentes pour les mouvements d'écriture et les mouvements de pointage de cible (i.e., Meary et al., 2005). Cette différence a été interprétée comme résultant d'une intervention du système moteur. Afin de tester cette hypothèse, nous avons comparé les préférences perceptives concernant les relations espace-temps pour des mouvements d'écriture et de pointage non naturels (c'est-à-dire non simulables par le système moteur). Deux conditions de cinématique ont été étudiées : vitesse constante et vitesse inverse. Ainsi, 106 sujets, répartis dans quatre conditions expérimentales, ont eu à évaluer la vitesse de mouvements d'écriture (ou de pointage de cible) d'amplitudes variables, en indiquant s'il la trouve « très lente » (TL), « très rapide » (TR) ou « ni lente ni rapide » (NLNR). Ces dernières réponses ont été considérées comme correspondantes aux préférences perceptives des sujets. Pour chaque condition et chaque type de mouvement, nous avons comparé la relation existant entre l'amplitude des trajectoires et les temps de mouvement évalués comme « ni lent, ni rapide ». Les résultats indiquent un maintien des différences entre écriture et pointage de cible pour la condition de vitesse constante mais une similitude des préférences dans la condition de vitesse inverse : les préférences perceptives observées pour les mouvements d'écriture deviennent équivalentes à celle observées pour les mouvements de pointage de cible. Ces données permettent d'envisager l'impact du type de mouvement sur les mécanismes déterminant les préférences perceptives des sujets.

II.4 PRODUCTION ET PERCEPTION DES MOUVEMENTS D'ECRITURE CHEZ L'ENFANT

II.4.1 Introduction

Les trois premières expériences ont permis de mettre en évidence un effet modéré de la cinématique sur les préférences perceptives des sujets et ceci quelle que soit la règle motrice considérée (principe d'isochronie ou loi de Fitts). Ces premiers résultats sont en contradiction avec l'utilisation d'une simulation intériorisée du mouvement pour rendre compte des préférences perceptives concernant la perception des mouvements humains.

Une autre façon de tester la nécessité d'une intervention motrice consiste à étudier le rôle de l'expérience motrice sur ces préférences. Dans ce domaine la littérature reste ambiguë car certaines expériences montrent un lien direct entre les capacités de production et de perception des sujets (i.e., Chary et al., 2004; Desjardins et al., 1997; Louis-Dam et al., 2000) alors que d'autres au contraire ont souligné la supériorité des capacités perceptives et la dissociation existant entre motricité et perception (i.e., Bertenthal et al., 1984; Booth et al., 2002; Pavlova et al., 2003).

Afin de clarifier le rôle de l'expérience motrice, nous avons comparé la production et la perception des mouvements d'écriture chez des enfants âgés de 6, 8 et 10 ans. Dans la mesure où l'écriture est l'objet d'un apprentissage progressif, il est intéressant de voir dans quelle mesure les choix perceptifs des enfants sont déterminés par leur niveau de pratique motrice. De plus, comme nous l'avons souligné précédemment, la production de ce type de mouvement est contrainte par le principe d'isochronie (i.e., Thomassen & Teulings, 1985) ce qui exclut l'utilisation d'une connaissance préalable (Meary et al., 2005). Ainsi, si les choix perceptifs des enfants correspondent à leur niveau de développement moteur, on pourra en déduire que la pratique de l'écriture influence les jugements visuels.

II.4.2 Méthode

II.4.2.1 Sujet

Quarante cinq enfants droitiers (15 enfants de CP, CE2 et CM2 ans) ont participé à l'expérience. La moyenne des âges était respectivement de 6 ans 2 mois (± 9 mois), 8 ans 7 mois (± 10 mois) et 10 ans 10 mois (± 6 mois). Tous les sujets étaient scolarisés à l'école primaire de Chirens (Isère). Aucun d'eux ne présentait de retard scolaire ni de troubles moteurs ou visuels particuliers. Par ailleurs, cinq sujets adultes ont été ajoutés pour la préparation des stimuli.

II.4.2.2 Matériel et procédure

Chaque sujet effectuait une tâche de production et une tâche de perception visuelle portant chacune sur des mouvements d'écriture cursive.

II.4.2.2.1 Tâche de perception visuelle

- *Préparation et présentation des stimuli*

Pour élaborer les stimuli, on a demandé à cinq adultes d'écrire sur une tablette graphique (Wacom ® IntuosTM A3 ; fréquence d'échantillonnage 200 HZ, précision spatiale 0.2 mm) dix *e* en écriture cursive. Les sujets devaient écrire avec un stylo électromagnétique et ceci le plus naturellement possible. La tablette permettait d'enregistrer les coordonnées (X,Y) des *e* réalisés. A partir des 50 tracés effectués (5 sujets * 10 essais), nous avons calculé un *e* moyen dont la forme (voir fig 13A) et le profil de vitesse (voir fig 13B) apparaissent sur la figure 13. Un logiciel permettait de présenter le *e* sur un écran d'ordinateur (17', résolution 1024*768 pixels, fréquence d'échantillonnage 85 Hz) : les sujets voyaient un point noir ($\emptyset = 0.4$ mm) décrivant le tracé du *e* sur un fond blanc (22*22 cm).

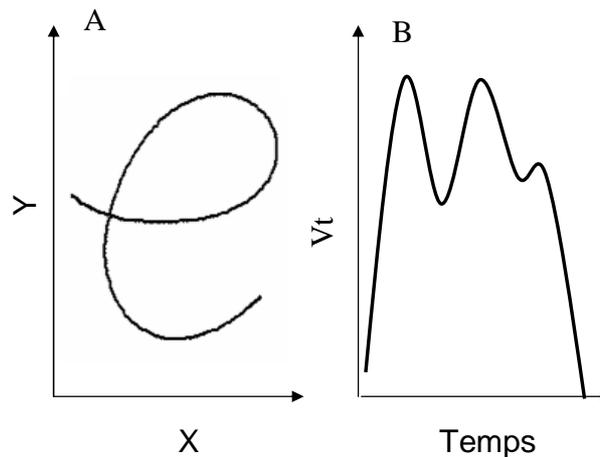


Figure 13: Forme (A) et allure du profil de vitesse (B) du e utilisé comme stimulus.

Un logiciel de présentation permettait de faire varier l'amplitude et la durée du *e* sans modifier la forme générale de la trajectoire et l'allure du profil de vitesse. Dix amplitudes ont été choisies aléatoirement (3.4 ; 4.62 ; 6.29 ; 8.55 ; 11.62 ; 15.8 ; 21.49 ; 29.22 ; 39.73 et 54.02 cm). Pour chacune d'elle, la durée initiale de mouvement était également choisie aléatoirement (équipartition entre 0.1 et 6 s).

- *Procédure*

Le sujet était assis à environ 50 cm de l'écran. L'expérimentateur déclenchait l'expérience en activant le bouton « démarrer » placé à gauche de l'écran (voir fig. 14). Chaque *e* était présenté en continu : dès que la trajectoire du *e* était terminée, une nouvelle trajectoire apparaissait. Le sujet devait ajuster la vitesse de mouvement pour que celle-ci lui paraisse « normale » c'est-à-dire « ni trop lente ni trop rapide ». Pour cela il utilisait les flèches situées à gauche et à droite du clavier de l'ordinateur. Chaque pression sur une des flèches permettait d'augmenter ou de diminuer la durée du mouvement de 50 ms. Aucune limite de temps n'était imposée pour réaliser la tâche. Lorsque le sujet trouvait la vitesse qui lui convenait, il appuyait sur le bouton « entrée » du clavier ceci entraînant le déclenchement de l'essai suivant avec un délai choisi aléatoirement entre 0.5 et 2.5 s. D'un sujet à l'autre, les 10 tailles de *e* étaient présentées de manière aléatoire.

Une phase de familiarisation précédait l'expérience. On présentait aux sujets un *e* d'amplitude constante (17.5 cm). L'expérimentateur manipulait les flèches du clavier afin de familiariser le sujet aux différentes vitesses de mouvement.

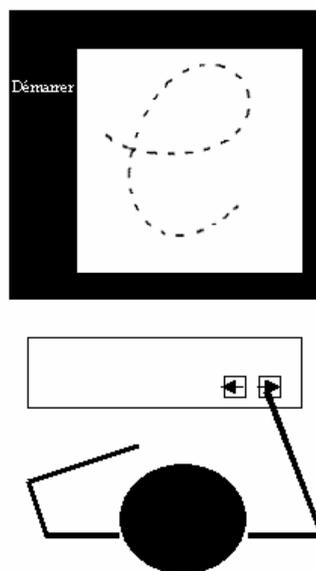


Figure 14 : Dispositif expérimental. La trajectoire du *e* apparaît sur l'écran. Le sujet doit ajuster la vitesse du mouvement en utilisant les flèches du clavier jusqu'à ce qu'il la juge « normale », c'est à dire « ni trop lente, ni trop rapide ».

II.4.2.2.2 Tâche d'écriture

- *Enregistrement des mouvements*

Dix modèles de *e* dessinés sur une feuille de papier ont été présentés aux sujets. Ils avaient la même forme et les mêmes tailles que les *e* présentés dans la tâche de perception visuelle.

Le sujet devait écrire sur une tablette graphique (Wacom ® IntuosTM A3 ; fréquence d'échantillonnage 200 HZ, précision spatiale 0.2 mm) les *e* correspondant aux modèles. L'expérimentateur insistait sur le fait que les tracés devaient être réalisés le plus naturellement possible. On indiquait aux sujets que la tâche consistait à se rapprocher le plus possible du modèle mais qu'il ne s'agissait en aucun cas d'une tâche de copie. Chaque tracé était effectué avec un stylo électronique qui permettait d'enregistrer les coordonnées (X,Y) du mouvement. Le stylo ne laissait pas de trace.

Pour chaque taille le sujet réalisait cinq essais. Chaque essai échoué était recommencé. L'ordre de présentation des modèles était choisi aléatoirement. Une phase de familiarisation précédait l'expérience. Au cours de cette phase, on demandait aux sujets d'écrire quelques *e* à partir d'un modèle dont la longueur de trajectoire était de 17.5 cm. Cette phase avait essentiellement pour but de familiariser les sujets avec l'utilisation du stylo électromagnétique.

- *Analyse des mouvements*

Pour chaque sujet, chaque longueur de trajectoire et chaque essai, on a calculé la longueur réelle de trajectoire du mouvement et sa durée. Ces calculs ont été effectués à partir des coordonnées (X,Y) enregistrées sur la tablette graphique. La longueur de trajectoire du mouvement correspond à la somme des distances entre chaque coordonnée, mesurée en cm. Cette distance a été estimée par le vecteur $\sqrt{(x^2 + y^2)}$ et la durée du mouvement par le nombre de coordonnées (X,Y) * 5 ms¹⁵. Pour chaque sujet et chaque taille de *e* nous avons calculé la longueur de trajectoire et la durée de mouvement moyenne obtenues sur les 5 essais.

L'ensemble de l'expérience (perception visuelle et production) se déroulait dans une pièce isolée et calme. Les sujets effectuaient les tâches de production et de perception de mouvement d'écriture dans un ordre contrebalancé. Une pause de quelques minutes séparait les deux tâches. L'expérience complète (perception et production) durait environ 25 minutes.

II.4.3 Résultats

Le traitement des données a consisté à analyser en fonction de l'âge le respect du principe d'isochronie pour la perception visuelle et la production de *e*. Ce principe a été testé comme pour les ellipses, à partir d'une fonction de puissance entre les longueurs de la trajectoire et les durées de mouvement qu'il s'agisse des durées choisies ou produites. La

¹⁵ La fréquence d'échantillonnage de la tablette graphique étant de 200 Hz. Chaque enregistrement de la position du stylo a lieu toutes les 5 ms.

formalisation utilisée est une adaptation de celle de Viviani & Schneider (1991). On considère que $T = T_0 * L^\gamma$ où T représente le temps de mouvement, T0 le temps de référence c'est-à-dire le temps de base du sujet, L la longueur de la trajectoire et γ l'exposant de la fonction indiquant le degré d'isochronie. Pour chaque tâche, et chaque sujet, l'analyse a porté sur 10 paires de valeurs correspondant à l'association entre les dix longueurs de trajectoires et les dix temps de mouvements (produits ou choisis). La figure 15 donne une illustration du calcul de la fonction de puissance pour un sujet.

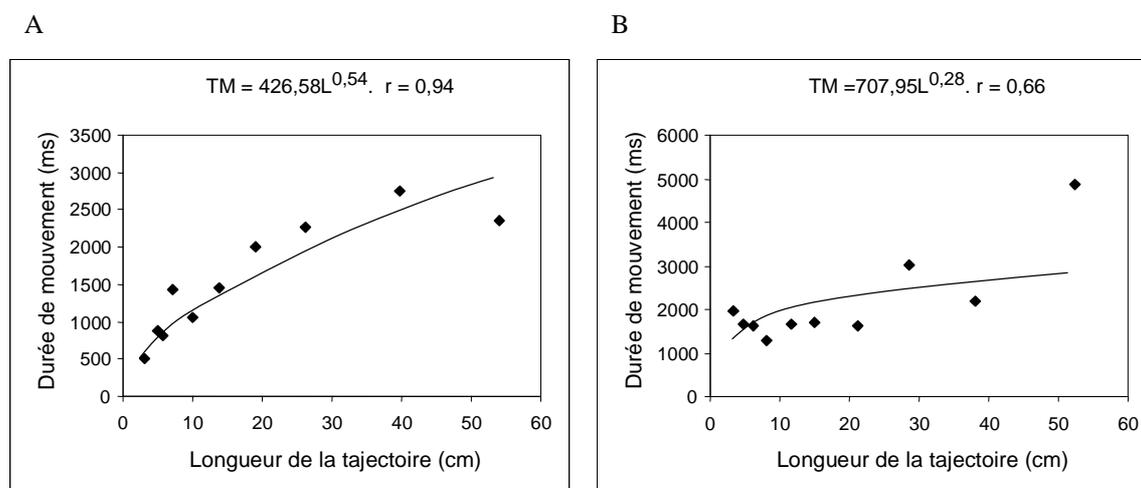


Figure 15: Exemple pour un sujet de la méthode d'analyse utilisée pour les tâches de production (A) et de perception visuelle (B). Dans chaque cas, une approximation de puissance est effectuée $T = T_0 * L^\gamma$. L'analyse porte sur le coefficient de corrélation (r), l'exposant (γ) et le temps de référence (T0).

Comme dans l'expérience I, l'analyse a consisté à étudier pour chaque tâche 1) la cohérence des données à partir de l'analyse des coefficients de corrélation (r), 2) le degré d'isochronie en évaluant la valeur de l'exposant γ de la fonction de puissance et 3) la vitesse moyenne (préférée ou produite) en analysant le temps de base (T0/P0) de la fonction de puissance. Les résultats moyens pour chaque groupe d'âge et chaque tâche sont présentés dans le tableau 4.

Tableau 4: Moyenne des coefficients de corrélation (r), des exposants (γ) et des temps de référence (T0 et P0) en fonction de l'âge (6, 8 et 10 ans) et de la tâche (production, perception). Les valeurs moyennes des coefficients de corrélation et des temps de référence ont été obtenues à partir de la transformation inverse des valeurs Z Fisher et des valeurs log T0 et log P0.

Age	Ecriture			Perception		
	6 ans	8 ans	10 ans	6 ans	8 ans	10 ans
r	0.92	0.92	0.94	0.75	0.72	0.78
γ	0.51	0.49	0.51	0.38	0.33	0.33
T0/P0	0.74	0.40	0.36	0.75	0.96	0.69

II.4.3.1 Cohérence des données : coefficients de corrélation

Pour les mouvements d'écriture l'analyse des coefficients de corrélation montre que 95.5 % des sujets présentent un coefficient de corrélation significatif ($r \geq 0.60$) ce qui indique une bonne approximation des données par une fonction de puissance. Les données présentant un coefficient de corrélation non significatif ont été éliminées de l'analyse. Par ailleurs, une ANOVA a permis de tester l'effet de l'âge sur ces coefficients de corrélation. Pour cette analyse nous avons utilisé les valeurs Z (Fisher) des coefficients de corrélation afin de respecter les conditions de normalité nécessaire à l'application d'une ANOVA (Kendall & Stuart, 1979). Les tests de Lilliefors et Levene pratiqués sur ces données indiquent un respect de l'homogénéité des variances ($F(2,40) < 1$) et de la loi normale ($p > 0.20$) et quel que soit l'âge des sujets, on observe une cohérence très importante entre la longueur des trajectoires et les temps de mouvement ($r = 0.92 \pm 0.46$).

En ce qui concerne la tâche de perception visuelle, l'analyse des coefficients de corrélation montre que 77 % des sujets étudiés présentent une corrélation significative ($r \geq 0.60$) ce qui montre également la bonne approximation des données par une relation de puissance. Comme précédemment, les données présentant des coefficients de corrélation non significatifs ont été éliminées de l'analyse. Nous avons ensuite analysé l'influence de l'âge sur l'approximation de puissance des résultats en utilisant les valeurs transformées Z (Fisher) des coefficients de corrélation afin de respecter les conditions de normalité nécessaire à une ANOVA. Les tests de Lilliefors et Levene pratiqués sur les données révèlent une homogénéité des variances ($F(2,32) = 2.08$, $p = ns$) et un suivi de la loi

normale ($p > 0.20$). L'analyse statistique montre une absence de différence en fonction de l'âge ($F(2,32) = 0.37$, $p = ns$). Comme en production, la cohérence des résultats est très importante quel que soit l'âge des sujets $r = 0.75 \pm 0.31$.

Enfin, la comparaison des résultats obtenus dans chaque tâche indique que les coefficients de corrélation sont plus élevés en production qu'en perception ($F(1,32) = 27.22$, $p < 0.001$).

II.4.3.2 Analyse du degré d'isochronie : étude de l'exposant γ

Pour les mouvements d'écriture les tests de Lilliefors et Levene pratiqués indiquent une homogénéité des variances ($F(2,40) < 1$) et un respect de la loi normale ($p > 0.20$). L'analyse statistique révèle une absence de différence concernant l'exposant γ de la fonction de puissance ($F(2,40) < 1$, $p = ns$). La valeur moyenne est de 0.50 ± 0.12 ce qui manifeste le suivi d'un principe d'isochronie.

Concernant la tâche de perception visuelle les tests de Lilliefors et Levene révèlent une homogénéité des variances ($F(2,32) = 1.19$, $p = ns$) et un respect de la loi normale ($p > 0.20$). L'analyse statistique montre une absence de différence en fonction de l'âge ($F(2,32) = 0.54$, $p = ns$). L'exposant γ a une valeur moyenne de 0.34 ± 0.13 correspondant donc au respect du principe d'isochronie.

Enfin, on constate que les exposants sont plus élevés en production qu'en perception. ($F(1,32) = 13.76$, $p < 0.001$).

II.4.3.3 Analyse de la vitesse moyenne de mouvement : Etude de T_0 et P_0

Pour ces analyses les valeurs T_0 et P_0 ont été transformées en log afin de respecter les conditions de normalité nécessaire à l'application d'une ANOVA.

Concernant la tâche d'écriture les tests de Lilliefors et Levene pratiqués indiquent une homogénéité des variances ($F(2,40) < 1$) et un respect de la loi normale pour chaque paramètre ($p > 0.20$). L'analyse statistique révèle l'existence d'une différence significative en fonction de l'âge ($F(2,40) = 20.91$, $p < 0.001$). Plus l'âge augmente et plus les sujets ont un temps de référence rapide. On observe en particulier une nette diminution du temps de référence entre 6 et 8 ans suivi d'une stabilisation entre 8 et 10 ans $F(1,40) = 41.03$, $p < 0.001$ avec un résidu non significatif ($F(1,40) < 1$).

Concernant la tâche de perception visuelle, les tests de Lilliefors et Levene révèlent une homogénéité des variances ($F(2,32) < 1$, $p = ns$) et un respect de la loi normale ($p > 0.20$). L'analyse statistique montre une absence de différence en fonction de l'âge ($F(2,32) = 1.14$, $p = ns$).

Enfin, les temps de référence sont plus rapides en production qu'en perception ($F(1,32) = 15.75$, $p < 0.001$). De plus, on observe un effet d'interaction ($F(2,32) = 6.95$, $p < 0.01$): la différence entre production et perception augmente entre 6 et 8 ans puis diminue entre 8 et 10 ans.

II.4.4 Conclusion

Cette expérience avait pour but de comparer chez l'enfant les relations espace-temps lors de la production et du jugement visuel de mouvements d'écriture de différentes amplitudes. Elle a permis de mettre en évidence plusieurs résultats importants.

En production, l'évolution des durées de mouvements en fonction de la longueur des trajectoires met en évidence la présence d'un principe d'isochronie dès l'âge de 6 ans. Ce principe se caractérise par une relation de puissance avec un exposant moyen de 0.50.

En perception visuelle, chez les mêmes enfants, l'évolution des durées de mouvements préférées des sujets en fonction de la longueur de trajectoire est également déterminée par un principe d'isochronie dès l'âge de 6 ans. Celui-ci se manifeste par le suivi d'une relation de puissance avec un exposant moyen de 0.36.

La comparaison approfondie des résultats indique une différence tant au niveau de la cohérence des données qu'au niveau de la valeur de l'exposant ou de celle des temps de référence. Ainsi, on observe une cohérence plus importante et des temps de référence plus rapides en production qu'en perception mais un degré d'isochronie plus faible. Ainsi, bien que le principe d'isochronie soit présent en production et en perception il ne « s'exprime » pas de la même façon dans les deux tâches. En outre, la réduction des temps de référence en fonction de l'âge observée pour la tâche de production ne se manifeste pas en perception.

L'ensemble de ces résultats indique une différenciation importante entre les tâches de production et de perception pour les mouvements d'écriture. Si le principe d'isochronie est bien observé dans les deux tâches, l'intervention directe du système moteur pour guider les choix perceptifs des sujets est remise en cause. En outre, la pratique motrice des sujets liée à l'âge n'influence pas les résultats observés en perception. Il semble cohabiter deux

types d'isochronie « une isochronie motrice » et une « isochronie perceptive ». L'utilisation d'un déterminateur commun entre ces deux principes n'est cependant pas à exclure d'autant que les analyses indiquent pour les temps de référence une augmentation de la différence entre les deux tâches avec l'âge.

L'expérience suivante a pour objectif d'apporter de nouvelles données comparatives entre les principes guidant la production et la perception des mouvements humains. Cette fois, la relation espace-temps sera étudiée pour des mouvements elliptiques chez des patients atteints de la forme idiopathique de la maladie de Parkinson. L'analyse consistera principalement à étudier l'effet du handicap moteur des sujets sur les jugements perceptifs.

Résumé

Cette expérience visait à comparer les performances motrices et perceptives d'enfants de différentes classes d'âge (6, 8 et 10 ans) concernant les mouvements d'écriture. Plus spécifiquement, nous voulions tester dans quelle mesure la pratique motrice des enfants influençait leurs préférences perceptives. Pour cela, nous avons testé 1) le respect du principe d'isochronie pour réguler les relations espace-temps en production comme en perception et 2) l'évolution des performances pour ces deux tâches. Si les préférences perceptives des sujets sont dépendantes de la pratique motrice, nous devrions observer l'utilisation des mêmes principes et une évolution identique dans les deux tâches. 15 enfants de chaque classe d'âge ont eu à produire 10 *e* d'amplitudes variables et à ajuster la vitesse de production des dix mêmes *e* sur un écran. Pour chaque tâche, l'analyse a porté sur la cohérence des données, le degré d'isochronie et la période de base des mouvements. Les résultats indiquent un suivi du principe d'isochronie pour réguler les relations espace-temps pour la tâche de production et de perception des mouvements d'écriture. Cependant, nous constatons une dissociation entre l'évolution des performances motrices et perceptives ce qui semble indiquer une relative indépendance entre les deux tâches.

II.5 PRODUCTION ET PERCEPTION DES MOUVEMENTS D'ELLIPSE CHEZ DES PATIENTS ATTEINTS DE LA FORME IDIOPATHIQUE DE LA MALADIE DE PARKINSON

II.5.1 Introduction

Dans le cadre de l'étude des relations entre la perception et la production de mouvements humains, la maladie de Parkinson semble particulièrement bien adaptée. En effet, depuis quelques années l'efficacité des traitements pharmacologiques ou chirurgicaux a permis d'améliorer ou de contrôler le niveau moteur des patients. Ainsi, il est possible d'étudier les préférences perceptives des malades pour différents niveaux de compétence motrice. Avant d'entrer plus spécifiquement dans les détails expérimentaux de cette étude, nous nous proposons de résumer succinctement les aspects cliniques, l'origine des troubles moteurs et les traitements de cette maladie (pour une revue voir, Samii, Nutt, & Ransom, 2004).

II.5.1.1 *Aspects cliniques*

Les trois symptômes caractéristiques de la maladie de Parkinson sont le tremblement au repos (asymétrique dans la majorité des cas), la rigidité (augmentation de la résistance des articulations lors du déplacement passif des membres) et la bradykinésie ou akinésie (ralentissement ou perte du mouvement volontaire). Celle-ci se manifeste par des difficultés dans les tâches motrices fines tels que l'écriture ou le pointage de cible (i.e., Becker et al., 2002; Seidler, Alberts, & Stelmach, 2001). Plus généralement c'est la capacité des patients à programmer des forces musculaires qui est atteinte provoquant une augmentation des temps de réaction, des profils de vitesse irréguliers (i.e., Castiello, Bennett, Adler, & Stelmach, 1993) et une augmentation globale des temps de mouvements (i.e., Sheridan, Flowers, & Hurrell, 1987). L'instabilité posturale qui est parfois également considérée comme un symptôme caractéristique est en fait très souvent absente au début de la maladie surtout si le patient est jeune. Bien que les troubles moteurs définissent la maladie, d'autres symptômes sont typiquement rencontrés tel que des troubles végétatifs (constipation, fuite urinaires, hypotension), des troubles psychiatriques (démence, dépression) et des perturbations du

sommeil. Dans 20% des cas, on observe également des troubles cognitifs comme le ralentissement de la pensée.

II.5.1.2 Origine neurophysiologique des troubles moteurs

Les troubles du mouvement qui dominent le tableau clinique de la maladie de Parkinson, résultent d'une dégénérescence des neurones dopaminergiques situés dans l'un des noyaux gris centraux du cerveau (îlot de substance grise situé à l'intérieur de la substance blanche de l'encéphale) qu'on appelle le locus niger (ou substance noire). C'est seulement lorsque la perte atteint 70 à 80 % des cellules que la maladie se déclare.

Les noyaux gris centraux ou ganglions de la base constituent une partie du cerveau regroupant le noyau caudé, le putamen, le globus pallidus et le noyau sous-thalamique. La substance noire, une structure mésencéphalique richement connectée aux ganglions de la base, bien que ne faisant pas à proprement parler partie de ces derniers, leur est souvent associée. Les ganglions de la base sont impliqués dans une boucle complexe qui les lie à plusieurs aires corticales. L'influx en provenance des aires frontales, préfrontales et pariétales du cortex traverse les ganglions de la base et se projettent sur l'aire motrice supplémentaire (AMS) via le thalamus. Les ganglions de la base exerceraient ainsi une action facilitatrice sur le mouvement en focalisant les informations en provenance de différentes régions corticales sur l'AMS. Ils sont aussi susceptibles d'agir comme un filtre bloquant la réalisation des mouvements lorsque ceux-ci sont inadaptés. Le fonctionnement des ganglions de la base est organisé en plusieurs boucles parallèles prenant en charge les fonctions oculomotrice, motrice, associative et limbique. La figure 16 présente un schéma du fonctionnement des boucles motrices.

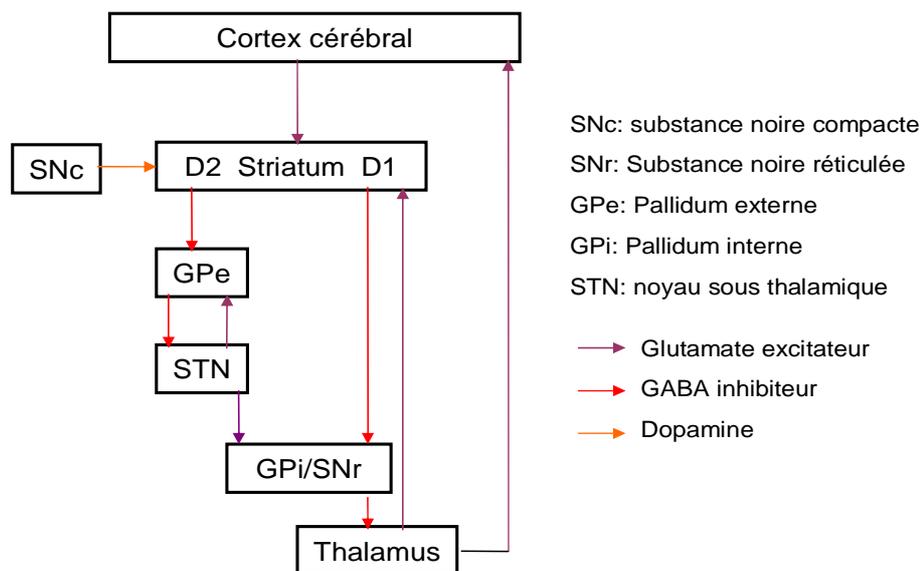


Figure 16: Organisation des noyaux gris centraux d'après Albin et al. 1989 (Albin, Young, & Penney, 1989).

Ce circuit moteur est le mieux connu et comporte deux voies de sortie principales. L'une est directe, part des neurones striataux, GABAergiques, portent des récepteurs dopaminergiques D1, et projettent sur le pallidum interne et la substance noire réticulée (SNr). L'autre voie appelée voie indirecte comporte des neurones striataux, GABAergiques qui portent des récepteurs dopaminergiques D2, et projettent sur le pallidum interne et la SNr via le pallidum externe et le noyau sous-thalamique (STN). Au niveau du striatum, les neurones GABAergiques de la voie directe sont activés par la dopamine (récepteur D1), alors que les neurones GABAergiques de la voie indirecte sont inhibés par la dopamine (récepteur D2). Ainsi, la projection du pallidum externe sur le STN est GABAergique, inhibitrice tandis que la projection du STN sur le pallidum interne est glutamatergique, excitatrice. La voie directe serait inhibitrice et la voie indirecte excitatrice pour le pallidum interne / SNr. Classiquement, il est supposé que la maladie de Parkinson entraîne la disparition des neurones dopaminergiques et donc la réduction de l'arrivée de dopamine au niveau du striatum provoquant une hyperactivité des neurones situés dans des circuits nerveux placés en aval des lésions dans le noyau sous-thalamique. C'est cette perturbation des boucles cortico-basales qui serait à l'origine de l'akinésie observée chez les sujets parkinsoniens (i.e., Bernheimer, Birkmayer, Hornykiewicz, Jellinger, & Seitelberger, 1973).

II.5.1.3 Les traitements

II.5.1.3.1 Traitement médicamenteux

Le traitement habituel des symptômes de la maladie de Parkinson se faisait jusqu'à présent par une administration médicamenteuse. Celle-ci est principalement basée sur la prise d'un précurseur de la dopamine la lévodopa (L-Dopa). Cette substance est connue depuis environ trente ans et est surtout efficace pour traiter la maladie de Parkinson qualifiée de « lente » c'est-à-dire caractérisée par une lenteur des mouvements et une raideur musculaire. La prise de ce médicament entraîne une réduction nette des symptômes pouvant durer de quelques mois à une trentaine d'années (cette période est appelée « lune de miel »). Cependant, avec le temps, on assiste pour quatre patients sur cinq à des phénomènes « on-off » se manifestant par une réapparition brutale des symptômes avec des moments de blocage complet des mouvements volontaires (akinésie) alterné avec des phases comportant des mouvements anormaux comme une marche rapide associée à des secousses musculaires (dyskinésie). Nous pouvons noter que d'autres types de médicaments comme les agonistes de la dopamine ou les anticholinergiques sont également utilisés.

II.5.1.3.2 Traitement chirurgical

Une option alternative au traitement médicamenteux est apparue il y a une quinzaine d'année. Il s'agit d'une stimulation électrique profonde du cerveau (ou ESB, i.e., Dewar, Passaro, Fried, & Engel, 1996) qui permet de traiter dans 88 % des cas les tremblements et les douleurs chroniques associés à une maladie de Parkinson. L'implantation du système électronique se fait sous anesthésie locale par une équipe de neurospécialistes composés de radiologues, de physiologistes et de chirurgiens. Grâce au scanner ou à l'IRM le neurochirurgien insère une électrode au niveau des zones du cerveau concernées (globus pallidus ou noyau sous-thalamique). Pendant cette partie de l'intervention le patient est éveillé de façon à juger de l'efficacité du système. Cela permet également de signaler des éventuels effets secondaires. Dans un deuxième temps, une deuxième incision est effectuée au niveau de la clavicule ou du plexus du patient permettant l'implantation sous la peau du neuro-stimulateur dont le rôle sera de stimuler les électrodes placées dans le cerveau. Ce neuro-stimulateur peut être mis en position « on » ou « off » grâce à un boîtier de contrôle. Il est nécessaire de le remplacer tous les trois à cinq ans.

En résumé, l'étude de patients atteints de la maladie de Parkinson présente un grand intérêt pour analyser les relations existant entre la perception et la production de mouvements humains. En effet, si l'on considère qu'il existe une intervention directe du système moteur dans la perception des mouvements humains, les malades parkinsoniens, du fait de leurs difficultés motrices devraient présenter des difficultés similaires sur le plan perceptif. De plus, le fait de pouvoir intervenir sur les capacités motrices des sujets par les traitements médicamenteux ou chirurgicaux permet d'étudier directement, par l'arrêt momentané du traitement (L-Dopa ou stimulation électrique), l'effet de la compétence motrice sur la perception.

Plusieurs expériences ont été réalisées en collaboration avec le professeur P. Pollack à l'unité INSERM U 318 de l'hôpital de Grenoble (troubles du mouvement). Nous ne présenterons ici que les résultats concernant la production et la perception de mouvements elliptiques.

Le but de cette expérience était de comparer la production et la perception des mouvements d'ellipse chez des patients parkinsoniens sous différentes conditions de traitement (avec ou sans L-Dopa et avec ou sans stimulation du noyau sous-thalamique). Nous voulions d'une part comparer les performances des sujets parkinsoniens par rapport à des sujets contrôle de même âge pour des tâches motrices et perceptives et d'autre part étudier l'efficacité des traitements sur les relations perception-motricité. Si la perception des mouvements humains est liée à l'état du système moteur, on devrait observer une chute des performances motrices et perceptives dans les conditions « off » c'est-à-dire sans traitement.

II.5.2 Méthode

II.5.2.1 Sujets

Sept sujets droitiers (moyenne d'âge 50 ans) présentant la forme idiopathique de la maladie de Parkinson ont donné leur accord pour participer à cette étude dont le protocole a été préalablement approuvé par un comité d'éthique (loi Huriet). Conformément aux critères d'inclusion, les sujets présentaient une absence de démence (échelle de la démence de Mattis > 130) ou de dépression (inventaire de dépression de Beck < 24). Ils répondaient également aux critères d'inclusion pour un traitement neurochirurgical par stimulation électrique du noyau sous-thalamique (pour ces critères, i.e., Lozano, 2003). Sept sujets

contrôle appariés sur l'âge ont également participé à l'expérience. Ces sujets ne présentaient pas de troubles moteurs, démentiels ou dépressifs particuliers. Tous les sujets (parkinsoniens ou contrôle) avaient une vue normale ou corrigée vers la normale. Tous étaient naïfs vis-à-vis des hypothèses précises testées dans cette expérience.

II.5.2.2 Matériel et procédure

Chaque sujet effectuait une tâche de production et une tâche de perception visuelle de mouvements elliptiques.

II.5.2.2.1 Tâche de perception visuelle

Les stimuli, la procédure et l'analyse des résultats sont identiques à ce qui a été présenté dans l'expérience I pour la condition de cinématique naturelle.

- *Préparation et présentation des stimuli*

Les stimuli utilisés ont été élaborés pour figurer des mouvements de tracés d'ellipse. La forme de l'ellipse (voir fig. 17A) était définie par 400 coordonnées (X,Y) qui suivaient les équations $x = a \cos \theta$ et $y = b \sin \theta$ où θ variait linéairement entre $-\pi$ et π et où a et b correspondaient aux semi axes de l'ellipse. Le rapport b/a était de 0.425 et l'excentricité de l'ellipse Σ de 0.9. La cinématique de cette ellipse correspondait à ce qui est normalement observé lors de la production de ce type de mouvement (voir fig.17B). Ainsi, la relation entre la vitesse tangentielle du mouvement ($V(t)$) et le rayon de courbure de la trajectoire ($R(t)$) respectait la fonction de puissance $V(t) = K * R(t)^{1/3}$ communément appelée loi de puissance 1/3 (Lacquaniti et al., 1983). Dans cette loi, le paramètre K représente le gain de vitesse, il dépend ici de la période (durée d'un cycle complet, P en secondes) de la série de 400 coordonnées (X,Y).

Les stimuli étaient présentés sur un écran d'ordinateur (17", résolution 1024*768 pixels, fréquence d'échantillonnage 85 Hz). Ils consistaient en un point noir ($\emptyset = 0.4$ cm) se déplaçant sur un fond blanc (22*22 cm) décrivant en continu la trajectoire elliptique selon le profil de vitesse défini préalablement. L'ellipse était toujours présentée avec une orientation de -45° par rapport à l'horizontale (voir fig. 17A). Le programme de présentation des stimuli permettait de faire varier indépendamment le périmètre de l'ellipse (P) et la période (P_f) (c'est-à-dire la durée d'un cycle) sans modifier le profil de vitesse et les caractéristiques

géométriques du stimulus de départ. Dix valeurs ont été choisies aléatoirement (3.4 ; 4.62 ; 6.29 ; 8.55 ; 11.62 ; 15.8 ; 21.49 ; 29.22 ; 39.73 et 54.02 cm). Dans chaque cas le stimulus apparaissait avec une période initiale définie aléatoirement (équipartition entre 0.1 et 5.1 s).

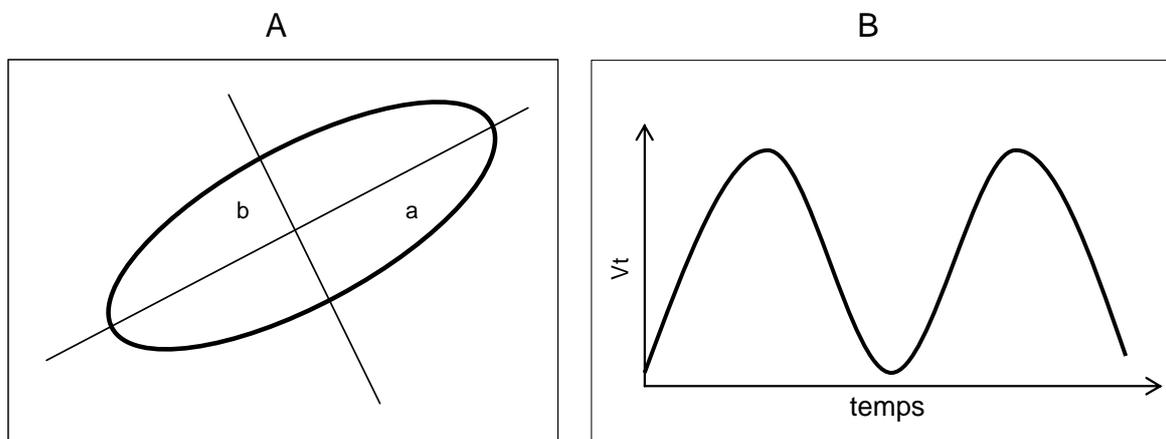


Figure 17: Forme (A) et profil de vitesse tangentielle (B) de l'ellipse. L'ellipse est orientée à -45° par rapport à l'horizontale. Le rapport b/a et l'excentricité sont respectivement égales à 0.425 et 0.9 quelle que soit la longueur de la trajectoire. Le profil de vitesse tangentielle respecte la loi de puissance $2/3$.

- *Procédure*

L'expérience se déroulait dans une pièce isolée et calme. Le sujet était assis à environ 50 cm de l'écran d'ordinateur (voir fig. 18). L'expérience comprenait dix essais correspondant aux dix longueurs de trajectoire préalablement définies présentées dans un ordre aléatoire. Comme dans les expériences précédentes, les sujets avaient pour tâche de trouver leur vitesse préférée c'est à dire une vitesse qu'ils jugeaient comme « normale, ni trop lente, ni trop rapide ». Les sujets étaient encouragés à faire un choix spontané. Pour cela, ils pouvaient faire varier la vitesse du stimulus en utilisant les flèches du clavier. Les flèches de gauche et de droite permettaient respectivement d'augmenter ou de diminuer la vitesse de mouvement. Chaque pression sur une des flèches faisait évoluer en plus ou en moins la période de mouvement de 25 ms. Aucune limite de temps n'était imposée pour réaliser la tâche. Une fois leur choix effectué, les sujets appuyaient sur le bouton « entrée » du clavier et déclenchaient l'essai suivant, ceci avec un délai aléatoire compris entre 0.5 et 2.5 s.

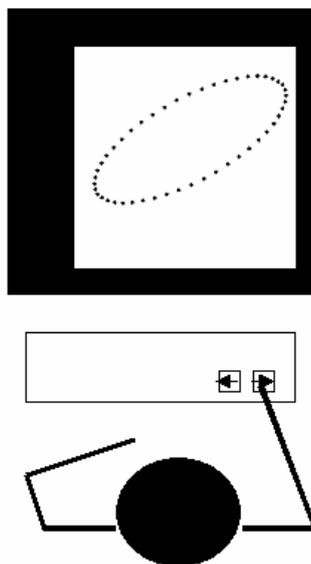


Figure 18 : Dispositif expérimental. Le sujet est assis à environ 50 cm d'un écran d'ordinateur. Le stimulus décrit une forme ellipsoïdale. Le sujet appuie sur la flèche droite ou gauche du clavier pour diminuer ou augmenter la vitesse de mouvement jusqu'à ce qu'il est trouvé la vitesse qu'il préfère.

II.5.2.3 Tâche de production

- *Enregistrement des mouvements*

Dix modèles d'ellipse dessinés sur une feuille de papier ont été présentés aux sujets. Ils avaient la même forme et les mêmes tailles que les ellipses présentées dans la tâche de perception visuelle.

Le sujet devait dessiner sur une tablette graphique (Wacom ® IntuosTM A3 ; échantillonnage 200 HZ, précision spatiale 0.2 mm) des ellipses en continu à une vitesse « naturelle, spontanée », ceci à l'aide d'un stylo électronique. Le stylo ne laissait pas de trace. On indiquait aux sujets que les modèles étaient donnés pour se faire une idée de la forme et de l'amplitude du mouvement mais qu'il ne s'agissait pas d'en réaliser une reproduction exacte. Le déplacement du stylo était enregistré pendant un délai variable correspondant au minimum à dix cycles de mouvement. L'essai était recommencé si pour une raison quelconque ce minimum n'était pas atteint.

- *Analyse des mouvements*

L'estimation de la durée des périodes et de la longueur de trajectoire des tracés d'ellipse ont été effectués à partir des coordonnées (X,Y) enregistrées par la tablette. Dans un premier temps, l'ensemble des paires de coordonnées résumant la trajectoire du mouvement était centré sur 0. La distance entre chaque position mesurée (définie par les coordonnées X,Y) et le centre de la distribution des points O (0,0) était estimée par le vecteur $\sqrt{(x^2 + y^2)}$. Les coordonnées associées à la valeur maximale des vecteurs calculés donnent les extrémités inférieures et supérieures des ellipses. Les paires de coordonnées comprises entre trois maximums définissent un cycle de mouvement. Ensuite, le temps de mouvement et la longueur de trajectoire de chaque cycle étaient estimés. Le temps de mouvement est donné par le nombre de paires de coordonnées (x,y) * 5 ms¹⁶ et la longueur de trajectoire, quant à elle, est estimée par la somme des distances entre deux paires de coordonnées (x,y) en cm. L'exemplaire qui minimise l'erreur de longueur de trajectoire (par rapport au modèle utilisé) était sélectionné.

II.5.2.4 Plan d'expérience

Les patients dans les différentes tâches composant l'étude ont été évalués à 1 an d'intervalle (avant et après l'opération chirurgicale) avec ou sans traitement (L-Dopa ou stimulation).

Chaque patient réalisait les deux tâches (perception et production d'ellipse) dans un ordre contrebalancé. En revanche, ces tâches étaient réalisées sous différentes conditions de traitement apparaissant toujours dans le même ordre. Les patients passaient d'abord les deux épreuves en condition Off-L-Dopa (sans traitement depuis la veille au soir). Ensuite, l'infirmière administrait au patient une dose subliminaire de L-dopa (définie en accord avec le médecin en charge du patient). En attendant l'effet du médicament (délai variable entre 20 min et 1h), les sujets se reposaient dans leur chambre et prenaient un petit déjeuner. Ensuite, le patient effectuait à nouveau les deux tâches mais cette fois-ci en condition On-L-Dopa.

¹⁶ La fréquence d'échantillonnage de la tablette graphique étant de 200 Hz, nous avons un enregistrement de la position du stylo tous les 5 ms.

Un an après, les patients opérés (implantation d'une électrode au niveau du noyau sous-thalamique) réalisaient la phase 2 de l'expérience. Les épreuves perceptives et motrices étaient effectuées dans un premier temps en condition On-stim (c'est-à-dire avec une stimulation du noyau sous-thalamique). Ensuite, les épreuves étaient réalisées en condition Off-stim (c'est-à-dire sans stimulation du noyau sous-thalamique). Un médecin arrêta la stimulation en utilisant le neuro-modulateur et les épreuves avaient lieu après un délai compris entre 10 et 30 minutes. En résumé, l'expérience se déroulait en quatre sessions constituant pour les patients parkinsoniens quatre conditions expérimentales (Off-L-Dopa, On-L-Dopa, On-Stim et Off-Stim). Pour les sujets contrôle, quatre sessions étaient également réalisées deux par deux à 6 mois d'intervalle. Un délai d'une demi-heure séparait les sessions 1-2 et 3-4 respectivement. Au total, chaque sujet (contrôle ou Parkinsonien) réalisait 4 * 10 ajustements perceptifs et 4 * 10 tracés d'ellipse.

II.5.3 Résultats

L'analyse a consisté à étudier les relations espace-temps en perception et en production et à étudier l'existence d'un principe d'isochronie. Pour cela nous avons utilisé comme dans les expériences précédentes une formalisation adaptée de celle de Viviani & Schneider (1991) permettant d'approximer par une fonction de puissance le lien existant entre la durée du mouvement et la longueur de la trajectoire. Nous rappelons que cette formalisation s'exprime par la fonction $T = T_0 * P^\gamma$. Comme dans les expériences précédentes nous analyserons la cohérence des données (calcul des coefficients de corrélation), le degré d'isochronie (γ) et les temps de base des sujets (T_0). Les résultats moyens pour chaque groupe et chaque tâche sont présentés dans le tableau 5.

Pour chaque sujet et chaque session, nous disposons de dix paires de valeurs (10 périodes de mouvement * 10 longueurs de trajectoire) en production et en perception. Nous avons comparé pour chaque tâche et chaque paramètre les résultats des sujets contrôle et parkinsoniens. Pour ces calculs nous utiliserons les valeurs Z Fisher des coefficients de corrélation et les logarithmes des périodes de référence ($\log T_0$) afin de respecter les conditions de normalité nécessaires à l'application d'une ANOVA. Les conditions de normalité et d'homogénéité des variances ont été vérifiées sur chaque indice, chaque session et chaque tâche. Le test de Lilliefors indique un respect de la normalité pour tous les

paramètres ($p > 0.20$). Le test de Levene indique une homogénéité des variances dans tous les cas ($F(1,10) < 4.80$, $p > 0.05$) excepté en production pour la session 1, pour le log de la période de référence. Dans ces conditions nous avons quand même appliqué une ANOVA pour tester les différences existant entre les sujets contrôle et les patients.

Quel que soit le groupe étudié, les coefficients de corrélation observés sont significatifs (dans 88 % des cas) ce qui confirme l'adéquation d'une fonction de puissance pour approximer le lien entre les périodes de mouvement (produite ou choisies) et les longueurs de trajectoire. Lorsque les durées de mouvements étaient trop éloignées de la régression, elles étaient remplacées par des valeurs aléatoires qui tenaient compte de l'intervalle de confiance autour de la régression. Un sujet contrôle et un sujet parkinsonien ont été retirés de l'analyse car ils présentaient des valeurs trop éloignées de la distribution des données (> 2 écarts-type).

Tableau 5: Moyenne des coefficients de corrélation (r), des exposants (γ) et des périodes de référence (T0, P0) pour les sujets contrôle et les sujets parkinsoniens en fonction de la session (1-2-3-4) et de la tâche (perception, production). Les valeurs moyennes des coefficients de corrélation et des temps de référence ont été obtenues à partir de la transformation inverse des valeurs Z Fisher et des valeurs log T0 et log P0.

Session	Contrôle				Parkinsonien			
	1	2	3	4	Off-Dopa	On-Dopa	On-Stim	Off-Stim
r								
Production	0.97	0.97	0.98	0.98	0.91	0.95	0.96	0.96
Perception	0.81	0.85	0.81	0.85	0.91	0.97	0.91	0.88
γ								
Production	0.5	0.52	0.58	0.57	0.42	0.54	0.58	0.62
Perception	0.3	0.35	0.28	0.32	0.47	0.52	0.41	0.43
T0/P0								
Production	0.24	0.24	0.23	0.23	0.53	0.35	0.3	0.39
Perception	1.04	0.79	1	0.89	0.95	0.43	0.47	0.61

II.5.3.1 Cohérence des données : coefficients de corrélation

Pour les sujets contrôle, on observe des coefficients de corrélation plus élevés en production qu'en perception ($F(1,5) = 9.84, p < 0.05$) mais aucune différence entre les sessions ($F(3,15) < 1, p = ns$ pour les deux tâches) et aucune interaction ($F(3,15) = 1.26, p = ns$).

Pour les sujets parkinsoniens, les coefficients de corrélation sont équivalents dans les deux tâches ($F(1,5) = 2.06, p = ns$). Par ailleurs, on observe des différences entre les sessions « on » et les sessions « off » avec un effet bénéfique de la prise de médicament ou de la stimulation ($F(3,15) = 4.23, p < 0.05$) se manifestant par une augmentation de la cohérence.

Enfin, on observe un effet d'interaction ($F(1,10) = 16.66, p < 0.01$) entre le groupe et la tâche avec des coefficients de corrélation plus faibles en production et plus élevés en perception pour les sujets parkinsoniens par rapport aux sujets contrôle. On peut noter également qu'en production, les coefficients de corrélation des sujets parkinsoniens sont équivalents à ceux des sujets contrôle sauf en situation Off-dopa ($F(1,10) = 7.14, p < 0.05$).

II.5.3.2 Degré d'isochronie : analyse de γ

Pour les sujets contrôle, on observe des exposants plus élevés en production qu'en perception ce qui indique une augmentation du degré d'isochronie en perception ($F(1,5) = 264.21, p < 0.001$). Par ailleurs, aucune différence n'est observée en fonction des sessions ($F(3,15) < 1, p = ns$) et il n'y a pas d'interaction ($F(3,15) < 1, p = ns$).

Pour les sujets parkinsoniens, on observe comme chez les sujets contrôle des exposants plus élevés en production qu'en perception ($F(1,5) = 6.55, p < 0.05$). Concernant l'effet de la session, nous n'obtenons pas de différence significative ($F(3,15) = 1.35, p = ns$). Quelle que soit la session l'exposant moyen est situé autour de 0.50 ± 0.15 ce qui permet de penser que les médicaments n'ont aucun effet sur le degré d'isochronie. On peut noter néanmoins l'existence d'un effet d'interaction entre les sessions et la tâche ($F(3,30) = 4.24, p < 0.01$).

Enfin, si l'on compare les sujets contrôle et parkinsoniens on observe une diminution du degré d'isochronie chez les parkinsoniens ($F(1,10) = 9.88, p < 0.05$) et une tendance à l'interaction se manifestant par une diminution de l'écart entre production et perception chez les patients ($F(1,10) = 3.40, p = 0.09$). Nous pouvons noter que la diminution du degré

d'isochronie chez les patients parkinsoniens n'est pas liée à leurs difficultés motrices car les exposants sont équivalents en production dans les deux groupes ($F(1,10) < 1$, $p = ns$).

II.5.3.3 Analyse de la vitesse moyenne de mouvement : étude de T0 et P0

Pour les sujets contrôle, on observe des temps de base plus rapides en production qu'en perception ($F(1,5) = 39.99$, $p < 0.01$). Par ailleurs il n'y a aucun effet de la session ($F(3,15) < 1$, $p = ns$), ni aucun effet d'interaction ($F(3,15) < 1$, $p = ns$).

Pour les sujets parkinsoniens, on a comme pour les sujets contrôle des temps de base plus rapides en production qu'en perception ($F(1,5) = 13.33$, $p < 0.05$). D'autre part, on obtient un effet bénéfique des traitements avec des temps de base plus rapides pour les sessions 2 et 3 que pour les sessions 1 et 4 ($F(1,5) = 7.24$, $p < 0.05$). Cependant, c'est la session 1 qui semble poser le plus de problème avec une diminution importante de la vitesse ($F(1,5) = 6.66$, $p < 0.05$).

Enfin, globalement, si l'on compare les deux groupes on observe un important effet d'interaction ($F(1,10) = 46.50$, $p < 0.001$) : les patients ont des temps de référence plus lents que les sujets contrôle en production ($F(1,10) = 10.99$, $p < 0.01$) mais plus rapides en perception ($F(1,10) = 7.41$, $p < 0.05$) ce qui manifeste une certaine indépendance entre les capacités motrices et perceptives.

II.5.4 Conclusion

Cette expérience avait pour but de comparer chez des sujets atteints de la forme idiopathique de la maladie de Parkinson les relations espace-temps guidant la production et la perception de mouvements elliptiques sous différentes conditions de traitement. Elle a permis de mettre en évidence plusieurs résultats.

D'abord, une comparaison avec des sujets contrôle de même âge a permis de confirmer les difficultés motrices existant chez les sujets atteints de la maladie de Parkinson. Ainsi, nous avons observé des temps de mouvements plus élevés et une cohérence des données plus faible. Cependant, le principe général guidant le lien entre la durée de mouvement et la longueur de trajectoire (principe d'isochronie) semble préserver ce qui suggère qu'une atteinte des ganglions de la base n'est pas déterminante dans le respect du principe d'isochronie motrice.

En revanche, au niveau perceptif, les résultats des sujets parkinsoniens semblent surpasser ceux des sujets contrôle avec une cohérence plus importante et des périodes de mouvements préférées plus rapides. Seul l'exposant, indique un degré d'isochronie plus faible chez les sujets parkinsoniens tout en restant dans la moyenne de ceux observés dans les expériences précédentes (Bidet-Ildei et al., Sous-presse). Ceci suggère une modération des troubles de la perception visuelle chez ces sujets. Néanmoins, l'exposant indique un degré d'isochronie plus faible chez les sujets parkinsoniens. Ce dernier résultat ne peut pas être expliqué par les difficultés motrices des patients, les exposants étant équivalents à ceux des sujets contrôle dans la tâche de production. Ceci pourrait refléter des difficultés spécifiquement liées à une atteinte des ganglions de la base.

Ensuite, les données ont permis de mettre en évidence un effet bénéfique des traitements qu'ils soient médicamenteux ou chirurgicaux avec une augmentation de la cohérence des mouvements et une diminution du temps de mouvements en condition « on » dans les tâches de production comme de perception. Cependant, le respect du principe d'isochronie n'est pas influencé par le niveau moteur des patients (équivalent quelle que soit la session).

Enfin, l'analyse des sujets parkinsoniens comme celle des sujets contrôle confirme la distinction existant entre les tâches de production et de perception de mouvements humains. Même si de façon générale les données peuvent être approximées par une même fonction de puissance, l'analyse fine des paramètres indique clairement une différence entre ces deux tâches. Dans ce contexte, on peut se demander si l'effet des médicaments (à vocation motrice) sur les tâches perceptives ne serait pas lié à l'implication des noyaux gris centraux dans la perception des mouvements humains. En effet, en plus des fonctions motrices citées précédemment (cf p 83-84), plusieurs expériences ont mis en évidence le rôle des ganglions de la base dans la perception du temps. Ainsi, le putamen, le globus pallidus et le noyau caudé seraient activés lors de tâches de perception temporelle comme les tâches de synchronisation ou de discrimination rythmique (i.e., Riecker, Wildgruber, Mathiak, Grodd, & Ackermann, 2003). De plus, il a été démontré que le jugement temporel de stimuli visuels impliquait l'activation spécifique de la partie antérieure de l'aire motrice supplémentaire mais aussi une partie du striatum au niveau sous cortical (i.e., Coull, Vidal, Nazarian, & Macar, 2004). En conséquence, l'administration de L-Dopa ou la stimulation cérébrale

pourrait agir sur les boucles cortico-basales et améliorer les capacités d'estimation temporelle des sujets indépendamment des bénéfiques moteurs.

Résumé

Le but de cette expérience était d'étudier l'impact de l'intégrité du système moteur sur les préférences perceptives. Pour cela, nous avons comparé les performances motrices et perceptives de sujets présentant la forme idiopathique de la maladie de Parkinson sous différentes conditions de traitement. Plus particulièrement, nous nous sommes intéressés au respect du principe d'isochronie lors de la production et du jugement visuel d'ellipses d'amplitude variables. Si les préférences perceptives font intervenir le système moteur, nous devrions observer des difficultés perceptives pour les sujets parkinsoniens en rapport avec leurs difficultés motrices. De plus, les bénéfiques moteurs liés au traitement devraient avoir un impact sur les jugements perceptifs. Ainsi, 7 patients et 7 sujets contrôle (appariés sur l'âge) ont eu à produire et à ajuster la vitesse de 10 ellipses de taille variable dans différentes conditions. L'analyse a porté sur la cohérence des données, le degré d'isochronie et la période de base des sujets. Les données indiquent un effet bénéfique des traitements sur les tâches motrices et perceptives concernant la cohérence des données et la période de base des sujets. Cependant, le jugement visuel des ellipses est similaire chez les patients qu'ils soient ou non sous traitement. Les données permettent de relativiser l'utilisation du système moteur pour expliquer les préférences perceptives concernant les mouvements d'ellipses et l'effet des traitements en perception semble davantage lié aux fonctions perceptives des ganglions de la base plutôt qu'à l'amélioration des performances motrices des sujets.

PARTIE III DISCUSSION GENERALE

Les recherches présentées dans cette thèse étaient destinées à analyser le rôle de la motricité dans la perception visuelle des mouvements humains. Pour cela, nous nous sommes intéressés aux préférences perceptives concernant les relations espace-temps telle qu'elles s'expriment notamment dans les mouvements morphocinétiques (principe d'isochronie) et topocinétiques (loi de Fitts).

Le but des expériences était de montrer que la correspondance entre les performances motrices et les jugements perceptifs n'est pas forcément due à l'intervention directe du système moteur. Pour cela, les expériences ont consisté à analyser les préférences perceptives pour des mouvements ne respectant plus les règles motrices habituelles et à analyser le rôle de la maîtrise du geste moteur sur les préférences perceptives.

La première expérience montre que les préférences perceptives concernant les mouvements elliptiques sont similaires quel que soit la cinématique associée au mouvement. Le principe d'isochronie est présent même pour les mouvements non simulables.

Les résultats de la seconde expérience sur les mouvements de pointage de cible vont dans le même sens. Les préférences perceptives sont conformes à la loi de Fitts : elles ne sont pas influencées par la nature du stimulus (cinématique naturelle ou non naturelle).

La troisième expérience, quant à elle, était destinée à comparer les préférences perceptives des mouvements de pointage et d'écriture. On constate que la cinématique du mouvement a un effet plus important sur les mouvements d'écriture que sur les mouvements de pointage. De plus, les préférences perceptives s'orientent vers un principe commun de covariation espace-temps quand la cinématique du mouvement est très éloignée (cinématique inverse) des mouvements naturels.

Cet ensemble de données montre donc que les préférences perceptives peuvent être conformes aux lois motrices sans pour autant nécessiter l'intervention du système moteur.

Les deux dernières expériences avaient pour but d'analyser le rôle plus général des compétences motrices sur les préférences perceptives.

L'expérience sur l'enfant a permis de mettre en évidence le respect d'un principe d'isochronie dans les tâches de production et de perception visuelle des mouvements d'écriture dès l'âge de 6 ans. Cependant, les valeurs des différents paramètres varient selon la tâche. On observe une cohérence moins importante, un degré d'isochronie plus élevé et des temps de mouvements plus lents pour la tâche de perception. De plus, la diminution des

temps de mouvement avec l'âge observée lors de la tâche motrice ne se retrouve pas en perception et les décalages entre les deux tâches s'accroissent avec l'âge.

La dernière expérience sur les patients parkinsoniens indique un respect du principe d'isochronie lors de la production ou de la perception visuelle de mouvements elliptiques et ceci que les patients soient ou non sous traitement (Dopa ou stimulation). L'atteinte des ganglions de la base n'est donc pas déterminante dans le respect du principe d'isochronie. Il est intéressant de noter qu'on observe une diminution du degré d'isochronie en perception indépendamment des performances motrices des sujets ce qui suggère une certaine dissociation entre motricité et perception.

Ces derniers résultats obtenus chez l'enfant et le patient parkinsonien mettent donc en évidence une certaine indépendance entre l'évolution des compétences motrices et les préférences perceptives des sujets.

Toutefois, il nous faut signaler, sans remettre en cause nos résultats, quelques limites méthodologiques.

La première concerne la variabilité des performances motrices. En effet, on sait que la production de mouvements spontanés présente une certaine variabilité et que celle-ci est corrélée négativement avec la vitesse du mouvement (Meary, 2003). Ainsi, si le système moteur intervient dans les choix perceptifs, la variabilité du mouvement pourrait intervenir lors du choix de la vitesse préférée. Puisque la variabilité est nulle dans les tâches perceptives, on peut penser que le sujet choisit des durées de mouvement plus importantes pour permettre une plus grande précision. Pour vérifier cette hypothèse nous avons comparé (expérience en cours) les préférences perceptives de sujets dans deux conditions de variabilité (nulle ou naturelle). Les données (provisaires) indiquent une tendance à être plus lent dans la condition de variabilité nulle que dans la condition de variabilité naturelle. Ces données suggèrent que la variabilité peut effectivement expliquer les décalages observés pour les temps de base entre la production et la perception des mouvements humains. Cependant, elle n'est pas à même d'expliquer les décalages observés pour les coefficients de corrélation et les degrés d'isochronie.

Une deuxième limite concerne les décalages de plan entre la tâche motrice (plan horizontal) et la tâche perceptive (plan vertical). Plusieurs auteurs ont montré que les temps de production d'un mouvement dépendaient du plan dans lequel était réalisé ce mouvement.

Ces différences de durée seraient dues à une modification des référentiels sur lesquels s'appuient la planification et le contrôle du mouvement (i.e., Desmurget, Jordan, Prablanc, & Jeannerod, 1997). Ainsi, cette différence de plan entre la tâche de tracé et la tâche de perception visuelle pourrait expliquer en partie les décalages entre les durées produites et les durées préférées. De plus, indépendamment du plan d'exécution du mouvement, la présence d'un écran pourrait également être à l'origine d'une augmentation du temps de mouvement (i.e., Palluel-Germain, Boy, Orliaguet, & Coello, 2004).

Ces limites méthodologiques peuvent expliquer dans une certaine mesure les décalages observés entre la production et la perception visuelle des mouvements. Cependant, elles ne permettent pas notamment d'expliquer les différences concernant la cohérence et le degré d'isochronie, ainsi que les différences d'évolution des compétences perceptives avec les compétences motrices. Dans la mesure où les relations motricité-perception n'apparaissent pas systématiquement on peut se demander quels sont les facteurs pouvant avoir une influence sur l'affaiblissement ou le renforcement de ces relations.

Au vu de nos résultats, la nature du stimulus semble jouer un rôle important. C'est le cas par exemple en ce qui concerne le type de mouvement présenté aux sujets. En effet, les résultats sont différents selon qu'il s'agit de mouvements morphocinétiques (écriture, dessin) ou de mouvements topocinétiques (pointage de cible). Ainsi, lors de la troisième expérience, on constate que l'effet de la cinématique dépend du type de mouvement considéré. En effet, les jugements perceptifs concernant les mouvements d'écriture sont davantage affectés par une cinématique non naturelle que les mouvements de pointage de cible. Par ailleurs plusieurs recherches (i.e., Decety, 1993; Meary et al., 2005) ont montré que les sujets étaient capables de fournir la règle déterminant leurs préférences pour les mouvements de pointage (augmentation du temps de mouvement avec la longueur de la trajectoire). En revanche, ils n'ont aucun accès conscient aux principes déterminant leurs préférences pour les mouvements morphocinétiques, c'est-à-dire au principe d'isochronie.

Cet ensemble de différences suggère que les jugements perceptifs sollicitent des stratégies différentes en fonction du type de mouvement considéré. Ainsi, pour les mouvements d'écriture, les jugements perceptifs pourraient solliciter l'activation de schémas moteurs pré-établis, ce qui expliquerait la difficulté à s'extraire du système moteur. Dans ce cas, on comprend que la perception visuelle de mouvements morphocinétiques dont

la cinématique n'est pas conforme aux règles motrices, perturbe les sujets. Ceci se manifeste, par l'abandon du principe d'isochronie et le suivi d'un principe général de covariation espace-temps notamment dans la situation où la cinématique du mouvement est inversée. Il faut toutefois noter que lorsque la vitesse est constante, c'est-à-dire correspond à une moindre perturbation, le principe d'isochronie est respecté. Cette différence pourrait être expliquée par les illusions géométriques auxquelles sont confrontés les sujets lorsque la cinématique est très éloignée de celle des mouvements naturels, au point de modifier la forme de la trajectoire (Viviani et al., 1997; Viviani & Stucchi, 1989). Dans le cas de la vitesse inversée, il se peut donc que le e ne soit plus reconnu en tant que tel et donc que les préférences perceptives ne puissent plus être guidées par les règles motrices de l'écriture. En revanche, les mouvements d'atteinte de cible ne feraient pas, quant à eux, systématiquement intervenir le système moteur. Les sujets auraient la possibilité de s'extraire de la cinématique et d'utiliser une règle générale de covariation espace-temps, n'impliquant pas la simulation du mouvement, mais un simple calcul spatial (la durée du mouvement augmente avec l'augmentation de la taille).

Plusieurs études de cas vont dans le même sens. Elles montrent effectivement que l'intervention du système moteur est plus impliquée lorsque les tâches perceptives portent sur des mouvements morphocinétiques que topocinétiques. Ainsi, chez la patiente dysgraphique DC dont le cas a été décrit précédemment (cf p 23), on a pu montrer que les difficultés d'écriture entraînaient une chute correspondante des préférences perceptives. En revanche, nous avons pu constater chez un patient apraxique (étude en cours) que ses difficultés à réaliser des séquences de pointage de cible n'avaient aucune incidence sur ses capacités d'anticipation perceptive et qu'il pouvait réussir l'épreuve sans faire référence aux règles de production du mouvement. Par exemple, il est capable de prédire qu'un mouvement de pointage sera plus lent lorsqu'il se dirige vers une petite cible, en faisant référence au ralentissement d'une voiture approchant d'un passage étroit.

Les propriétés des objets manipulés pourraient également jouer un rôle dans l'intervention du système moteur. Ainsi, on constate chez ce même patient apraxique que le pourcentage de réussite aux tâches d'anticipation perceptive est très important lorsque l'objet manipulé est un cylindre. En revanche, de façon surprenante, cette tâche est

complètement échouée lorsque l'objet est un verre. Dans cette deuxième situation, le patient expliquait qu'il ne peut réussir car il ne sait plus saisir un verre.

Des données obtenues chez le sujet normal (expérience en cours) montrent également le rôle des propriétés des objets. Ainsi, le taux d'anticipation correcte atteint les 90 % lorsque la tâche perceptive implique un verre alors qu'elle se limite à 70 % avec un cylindre. Des expériences utilisant l'imagerie cérébrale vont dans le même sens (i.e., Grafton et al., 1997; Grezes, Tucker, Armony, Ellis, & Passingham, 2003). Ainsi, on a pu montrer que la perception visuelle d'un objet souvent manipulé (i.e., verre, balle, tournevis) implique une activation des aires motrices alors que ce n'est pas le cas pour des objets rarement manipulés (i.e., armoire, table).

Enfin, l'intervention du système moteur pourrait être modulée par l'intention du sujet lors de la résolution de la tâche. Ainsi, Decety et al. (1997) ont montré que la perception visuelle d'un mouvement dans le but de l'imiter impliquait les aires motrices alors que ce n'est pas systématiquement le cas lorsque les sujets cherchent simplement à reconnaître le mouvement. Ceci pourrait expliquer les raisons pour lesquelles on observe une intervention du système moteur dans certaines tâches impliquant explicitement une représentation de l'action (Chaminade et al., 2001; Pozzo, Papaxanthis, Petit, Schweighofer, & Stucchi, 2006) alors que d'autres tâches peuvent être réalisées sans une intervention systématique du système moteur.

En résumé, le système moteur intervient donc pour déterminer les préférences perceptives mais cette intervention n'est pas systématique et dépend notamment de la nature du stimulus et de l'intention du sujet. Ainsi les liens motricité-perception pourraient être plus ou moins forts en fonction des contraintes de la tâche (type de mouvement, propriétés de l'objet manipulé, intention des sujets).

Pour conclure, l'ensemble des résultats présentés dans cette thèse montre qu'une intervention du système moteur n'est pas nécessaire pour rendre compte du respect des règles motrices dans la perception visuelle des mouvements humains. Des recherches complémentaires sont toutefois nécessaires. Au final, cette étude pose davantage de questions qu'elle n'en résout. Son intérêt principal étant de nuancer la façon dont on conçoit l'intervention du système moteur dans la perception des mouvements humains.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Albin, R. L., Young, A. B., & Penney, J. B. (1989). The functional anatomy of basal ganglia disorders, *Trends in Neurosciences*, 12(10), 366-375.
- Avikainen, S., Forss, N., & Hari, R. (2002). Modulated activation of the human SI and SII cortices during observation of hand actions, *Neuroimage*, 15(3), 640-646.
- Babcock, M. K., & Freyd, J. J. (1988). Perception of dynamic information in static handwritten forms, *The American Journal of Psychology*, 101(1), 111-130.
- Baizer, J. S., Ungerleider, L. G., & Desimone, R. (1991). Organization of visual inputs to the inferior temporal and posterior parietal cortex in macaques, *Journal of Neuroscience*, 11(1), 168-190.
- Bara, F., Gentaz, E., Colé, P., & Sprenger-Charolles, L. (2004). The visuo-haptic and haptic exploration of letters increases the kindergarten-children's understanding of the alphabetic principle, *Cognitive Development*, 19, 433-449.
- Beardsworth, T., & Buckner, T. (1981). The ability to recognize oneself from a video recording of one's movements without seeing one's body, *Bulletin of the Psychonomic Society*, 8, 19-22.
- Becker, G., Muller, A., Braune, S., Buttner, T., Benecke, R., Greulich, W., et al. (2002). Early diagnosis of Parkinson's disease, *Journal of Neurology*, 249 Suppl 3, III/40-48.
- Belsley, D. A., Kuh, E., & Welsch, R. E. (1980). Regression diagnostics: Identifying influential data and sources of Collinearity: New York: John Wiley & Sons.
- Benguérel, A. P., & Cowan, H. A. (1974). Coarticulation of upper lip protrusion in french, *Phonetica*, 30, 41-55.
- Bernheimer, H., Birkmayer, W., Hornykiewicz, O., Jellinger, K., & Seitelberger, F. (1973). Brain dopamine and the syndromes of Parkinson and Huntington. Clinical, morphological and neurochemical correlations, *Journal of the Neurological Sciences*, 20(4), 415-455.
- Bertenthal, B. I. (1996). Origins and early development of perception, action, and representation, *Annual Review of Psychology*, 47, 431-459.
- Bertenthal, B. I., Proffitt, D. R., & Cutting, J. E. (1984). Infant sensitivity to figural coherence in biomechanical motions, *Journal of Experimental Child Psychology*, 37(2), 213-230.
- Bidet-Ildei, C., Méary, D., & Orliaguet, J-P. (Sous-pressé). Visual perception of elliptic movements in 7-to-11 year old children: Evidence of motor-perceptual interactions.
- Bidet-Ildei, C., Orliaguet, J-P., Sokolov, A., & Pavlova, M. (2006). Perception of biological motion of elliptic form, *Perception*, 1137-1147.
- Binet, A., & Courtier, J. (1893). Sur la vitesse des gestes graphiques, *Revue Philosophique*, 35, 664-671.
- Blakemore, S. J., & Frith, C. (2005). The role of motor contagion in the prediction of action, *Neuropsychologia*, 43(2), 260-267.
- Bonda, E., Petrides, M., Ostry, D., & Evans, A. (1996). Specific involvement of human parietal systems and the amygdala in the perception of biological motion, *Journal of Neuroscience*, 16(11), 3737-3744.
- Booth, A. E., Bertenthal, B. I., & Pinto, J. (2002). Perception of the symmetrical patterning of human gait by infants, *Developmental Psychology*, 38(4), 554-563.
- Casile, A., & Giese, M. A. (2006). Nonvisual motor training influences biological motion perception, *Current Biology*, 16(1), 69-74.
- Castiello, U., Bennett, K. M., Adler, C. H., & Stelmach, G. E. (1993). Perturbation of the grasp component of a prehension movement in a subject with hemiParkinson's disease, *Neuropsychologia*, 31(7), 717-723.

- Chaminade, T., Meary, D., Orliaguet, J. P., & Decety, J. (2001). Is perceptual anticipation a motor simulation? A PET study, *Neuroreport*, 12(17), 3669-3674.
- Chary, C., Meary, D., Orliaguet, J. P., David, D., Moreaud, O., & Kandel, S. (2004). Influence of motor disorders on the visual perception of human movements in a case of peripheral dysgraphia, *Neurocase*, 10(3), 223-232.
- Cochin, S., Barthelemy, C., Roux, S., & Martineau, J. (2001). Electroencephalographic activity during perception of motion in childhood, *European Journal of Neuroscience*, 13(9), 1791-1796.
- Coull, J. T., Vidal, F., Nazarian, B., & Macar, F. (2004). Functional Anatomy of the attentional modulation of time estimation, *Science*, 303, 1506-1508.
- Cutting, J. E., & Kozlowski, L. (1977). Recognizing friends by their walk: Gait perception without familiarity cues, *Bulletin of the Psychonomic Society*, 9, 353-356.
- Decety, J. (1993). Analysis of actual and mental movement times in graphic tasks, *Acta Psychologica (Amst)*, 82(1-3), 367-372.
- Decety, J., Grezes, J., Costes, N., Perani, D., Jeannerod, M., Procyk, E., et al. (1997). Brain activity during observation of actions. Influence of action content and subject's strategy, *Brain*, 120 (Pt 10), 1763-1777.
- Delay, D., Nougier, V., Orliaguet, J.-P., & Coello, Y. (1997). Movement control in golf putting, *Human Movement Science*, 16, 597-619.
- Desjardins, R. N., Rogers, J., & Werker, J. F. (1997). An exploration of why preschoolers perform differently than do adults in audiovisual speech perception tasks, *Journal of Experimental Child Psychology*, 66(1), 85-110.
- Desmurget, M., Jordan, M., Prablanc, C., & Jeannerod, M. (1997). Constrained and unconstrained movements involve different control strategies, *Journal of Neurophysiology*, 77(3), 1644-1650.
- de'Sperati, C., & Viviani, P. (1997). The relationship between curvature and velocity in two-dimensional smooth pursuit eye movements, *Journal of Neuroscience*, 17(10), 3932-3945.
- Dewar, S., Passaro, E., Fried, I., & Engel, J., Jr. (1996). Intracranial electrode monitoring for seizure localization: indications, methods and the prevention of complications, *Journal of Neuroscience Nursing*, 28(5), 280-284, 289-292.
- Di Pellegrino, G., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., & Rizzolatti, G. (1992). Understanding motor events: A neurophysiological study, *Experimental Brain Research*, 91, 176-180.
- Fadiga, L., Fogassi, L., Pavesi, G., & Rizzolatti, G. (1995). Motor facilitation during action observation: a magnetic stimulation study, *Journal of Neurophysiology*, 73(6), 2608-2611.
- Ferrari, P. F., Rozzi, S., & Fogassi, L. (2005). Mirror neurons responding to observation of actions made with tools in monkey ventral premotor cortex, *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17(2), 212-226.
- Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement, *Journal of Experimental Psychology*, 47(6), 381-391.
- Fitts, P. M., & Peterson, J. R. (1964). Information Capacity of Discrete Motor Responses, *Journal of Experimental Psychology*, 67, 103-112.
- Flores d'Arcais, G. B. (1994). Order of strokes writing as a cue for retrieval in reading chinese character, *European Journal of Cognitive Psychology*, 6, 337-355.
- Fogassi, L., Ferrari, P. F., Gesierich, B., Rozzi, S., Chersi, F., & Rizzolatti, G. (2005). Parietal lobe: from action organization to intention understanding, *Science*, 308(5722), 662-667.

- Fox, R., & McDaniel, C. (1982). The perception of biological motion by human infants, *Science*, 218(4571), 486-487.
- Freyd, J. J. (1983). Representing the dynamics of a static form, *Memory & Cognition*, 11(4), 342-346.
- Freyd, J. J. (1993). Five hunches about perceptual processes and dynamic representations. In D. Meyer & S. Kornblum (Eds.), *Attention and performance XIX: Synergies in experimental psychology, artificial intelligence, and cognitive neuroscience. A silver jubilee*. Cambridge: MA: MIT Press.
- Freyd, J. J., & Finke, R. A. (1984). Representational momentum, *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 10, 126-132.
- Funk, M., Shiffrar, M., & Brugger, P. (2005). Hand movement observation by individuals born without hands: phantom limb experience constrains visual limb perception, *Experimental Brain Research*, 164(3), 341-346.
- Giese, M. A., & Poggio, T. (2003). Neural mechanisms for the recognition of biological movements, *Nature Reviews. Neuroscience*, 4(3), 179-192.
- Grafton, S. T., Fadiga, L., Arbib, M. A., & Rizzolatti, G. (1997). Premotor cortex activation during observation and naming of familiar tools, *Neuroimage*, 6(4), 231-236.
- Grezes, J., Fonlupt, P., & Decety, J. (2000). Equivalence fonctionnelle: mythe cognitif ou réalité neurologique? *Psychologie Française*, 45(4), 319-332.
- Grezes, J., Tucker, M., Armony, J., Ellis, R., & Passingham, R. E. (2003). Objects automatically potentiate action: an fMRI study of implicit processing, *The European Journal of Neuroscience*, 17(12), 2735-2740.
- Grossman, E., & Blake, R. (2002). Brain Areas Active during Visual Perception of Biological Motion, *Neuron*, 35(6), 1167-1175.
- Grossman, E., Donnelly, M., Price, R., Pickens, D., Morgan, V., Neighbor, G., et al. (2000). Brain areas involved in perception of biological motion, *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(5), 711-720.
- Hamilton, A. F., Wolpert, D. M., Frith, U., & Grafton, S. T. (2006). Where does your own action influence your perception of another person's action in the brain? *Neuroimage*, 29(2), 524-535.
- Hamker, F. H. (2003). The reentry hypothesis: linking eye movements to visual perception, *Journal of Vision*, 3(11), 808-816.
- Hari, R., Forss, N., Avikainen, S., Kirveskari, E., Salenius, S., & Rizzolatti, G. (1998). Activation of human primary motor cortex during action observation: a neuromagnetic study, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 95(25), 15061-15065.
- Heilman, K. M., Rothi, L. J., & Valenstein, E. (1982). Two forms of ideomotor apraxia, *Neurology*, 32(4), 342-346.
- Herman, L. M., Morrel-Samuels, P., & Pack, A. A. (1990). Bottlenosed dolphin and human recognition of veridical and degraded video displays of an artificial gestural language, *Journal of Experimental Psychology. General*, 119(2), 215-230.
- Hicheur, H., Vieilledent, S., Richardson, M. J., Flash, T., & Berthoz, A. (2005). Velocity and curvature in human locomotion along complex curved paths: a comparison with hand movements, *Experimental Brain Research*, 162(2), 145-154.
- Hirai, M., Senju, A., Fukushima, H., & Hiraki, K. (2005). Active processing of biological motion perception: an ERP study, *Brain research. Cognitive Brain Research*, 23(2-3), 387-396.

- Hommel, B., Musseler, J., Aschersleben, G., & Prinz, W. (2001). The Theory of Event Coding (TEC): a framework for perception and action planning, *Behavioral and Brain Sciences*, 24(5), 849-878; discussion 878-937.
- Jeannerod, M. (1984). The timing of natural prehension movements, *Journal of Motor Behavior*, 16, 235-254.
- Jeannerod, M. (1999). The 25th Bartlett Lecture. To act or not to act: perspectives on the representation of actions, *The Quarterly Journal of Experimental Psychology. A, Human Experimental Psychology*, 52(1), 1-29.
- Jeannerod, M. (2001). Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition, *Neuroimage*, 14(1 Pt 2), S103-109.
- Johansson, G. (1973). Visual perception of biological motion and a model for its analysis, *Perception & Psychophysics*, 14, 201-211.
- Johansson, G. (1975). Visual motion perception, *Scientific American*, 232(6), 76-88.
- Johansson, G. (1976). Spatio-temporal differentiation and integration in visual motion perception, *Psychological Review*, 38, 379-393.
- Jokisch, D., & Troje, N. F. (2003). Biological motion as a cue for the perception of size, *Journal of Vision*, 3(4), 252-264.
- Kandel, S., Orliaguet, J. P., & Boe, L. J. (2000). Detecting anticipatory events in handwriting movements, *Perception*, 29(8), 953-964.
- Kandel, S., Orliaguet, J. P., & Viviani, P. (2000). Perceptual anticipation in handwriting: the role of implicit motor competence, *Perception & Psychophysics*, 62(4), 706-716.
- Kendall, M., & Stuart, A. (1979). *The advanced theory of statistics* (Vol. 2). London: Charles Griffin.
- Kerr, B. A., & Langolf, G. D. (1977). Speed of aiming movements, *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 29, 475-481.
- Korte, A. (1915). Kinematoskopische Untersuchungen, *Zeitschrift für Psychologie*, 72, 194-296.
- Kozlowski, L., & Cutting, J. E. (1977). Recognizing the sex of a walker from dynamic point-light displays, *Perception & Psychophysics*, 21, 575-580.
- Lacquaniti, F., Terzuolo, C., & Viviani, P. (1983). The law relating the kinematic and figural aspects of drawing movements, *Acta Psychologica (Amst)*, 54(1-3), 115-130.
- Lange, J., & Lappe, M. (2006). A model of biological motion perception from configural form cues, *Journal of Neuroscience*, 26(11), 2894-2906.
- Leigh, R. J., Huebner, W. P., & Gordon, J. L. (1994). Supplementation of the human vestibulo-ocular reflex by visual fixation and smooth pursuit, *Journal of Vestibular Research: Equilibrium & Orientation*, 4(5), 347-353.
- Longcamp, M., Anton, J. L., Roth, M., & Velay, J. L. (2003). Visual presentation of single letters activates a premotor area involved in writing, *Neuroimage*, 19(4), 1492-1500.
- Longcamp, M., Anton, J. L., Roth, M., & Velay, J. L. (2005). Premotor activations in response to visually presented single letters depend on the hand used to write: a study on left-handers, *Neuropsychologia*, 43(12), 1801-1809.
- Longcamp, M., Zerbato-Poudou, M. T., & Velay, J. L. (2005). The influence of writing practice on letter recognition in preschool children: a comparison between handwriting and typing, *Acta Psychologica (Amst)*, 119(1), 67-79.
- Louis-Dam, A., Kandel, S., & Orliaguet, J.-P. (2000). Anticipation motrice et anticipation perceptive, *Psychologie Française*, 45, 333-342.
- Louis-Dam, A., Orliaguet, J.-P., & Coello, Y. (1999). Perceptual anticipation in grasping movement: When does it become possible? In M. G. Grealy & J. A. Thomson (Eds.), *Studies in Perception and Action*. London: Lawrence Erlbaum Associates.

- Loula, F., Prasad, S., Harber, K., & Shiffrar, M. (2005). Recognizing people from their movement, *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 31(1), 210-220.
- Lozano, A. M. (2003). Surgery for Parkinson's disease, the five W's: why, who, what, where, and when, *Advances in Neurology*, 91, 303-307.
- Martineau, J., & Cochin, S. (2003). Visual perception in children: human, animal and virtual movement activates different cortical areas, *International Journal of Psychophysiology*, 51(1), 37-44.
- Martins, I., Olivera, A., & Amorim, M. A. (2005). Mental rotation of hands: Comparing motor able and cerebral palsy subjects. Paper presented at the Fechner Day 2005. *Proceedings of the Twenty-first Annual Meeting of the International Society for Psychophysics*, pp193-199.
- Mather, G., & West, S. (1993). Recognition of animal locomotion from dynamic point-light displays, *Perception*, 22(7), 759-766.
- Meary, D. (2003). Perception visuelle des mouvements humains: Analyse comportementale, neuroimagerie et neuropathologie. Psychologie Cognitive, Université Pierre Mendès France, Grenoble.
- Meary, D., Chary, C., Palluel-Germain, R., & Orliaguet, J. P. (2005). Visual perception of writing and pointing movements, *Perception*, 34(9), 1061-1067.
- Meyer, D. E., Smit, J.E.K., Kornblum, S., Abrams, R.A., Wright, C.E. (1990). Speed-accuracy tradeoffs in aimed movements: Toward a theory of rapid voluntary action. *In Attention and Performance XIII*: Eds M. Jeannerod (Hillsdale, N.J., Lawrence Erlbaum) (pp. 173-226).
- Michels, L., Lappe, M., & Vaina, L. M. (2005). Visual areas involved in the perception of human movement from dynamic form analysis, *Neuroreport*, 16(10), 1037-1041.
- Nishitani, N., & Hari, R. (2000). Temporal dynamics of cortical representation for action, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97(2), 913-918.
- O'Regan, J. K., & Noë, A. (2001). A sensorimotor account of vision and visual consciousness, *Behavioral and Brain Sciences*, 24, 939-1031.
- Orliaguet, J. P., Kandel, S., & Boe, L. J. (1997). Visual perception of motor anticipation in cursive handwriting: influence of spatial and movement information on the prediction of forthcoming letters, *Perception*, 26(7), 905-912.
- Pack, C., Grossberg, S., & Mingolla, E. (2001). A neural model of smooth pursuit control and motion perception by cortical area MST, *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13(1), 102-120.
- Palluel-Germain, R., Boy, F., Orliaguet, J. P., & Coello, Y. (2004). Visual and motor constraints on trajectory planning in pointing movements, *Neuroscience Letters*, 372(3), 235-239.
- Pavlova, M., Krageloh-Mann, I., Sokolov, A., & Birbaumer, N. (2001). Recognition of point-light biological motion displays by young children, *Perception*, 30(8), 925-933.
- Pavlova, M., Lutzenberger, W., Sokolov, A., & Birbaumer, N. (2004). Dissociable cortical processing of recognizable and non-recognizable biological movement: analysing gamma MEG activity, *Cerebral Cortex*, 14(2), 181-188.
- Pavlova, M., & Sokolov, A. (2000). Orientation specificity in biological motion perception, *Perception & Psychophysics*, 62(5), 889-899.

- Pavlova, M., Staudt, M., Sokolov, A., Birbaumer, N., & Krageloh-Mann, I. (2003). Perception and production of biological movement in patients with early periventricular brain lesions, *Brain*, 126(Pt 3), 692-701.
- Peuskens, H., Vanrie, J., Verfaillie, K., & Orban, G. A. (2005). Specificity of regions processing biological motion, *The European Journal of Neuroscience*, 21(10), 2864-2875.
- Pozzo, T., Papaxanthis, C., Petit, J. L., Schweighofer, N., & Stucchi, N. (2006). Kinematic features of movement tunes perception and action coupling, *Behavioral Brain Research*, 169(1), 75-82.
- Prinz, W. (1997). Perception and action planning. *European Journal of Cognitive Psychology*, 9, 129-154.
- Riecker, A., Wildgruber, D., Mathiak, K., Grodd, W., & Ackermann, H. (2003). Parametric analysis of rate-dependent hemodynamic response functions of cortical and subcortical brain structures during auditorily cued finger tapping: a fMRI study, *Neuroimage*, 18(3), 731-739.
- Rizzolatti, G., & Craighero, L. (2004). The mirror-neuron system, *Annual Review of Neuroscience*, 27, 169-192.
- Rizzolatti, G., Fadiga, L., Fogassi, L., & Gallese, V. (1999). Resonance behaviors and mirror neurons, *Archives Italiennes de Biologie*, 137(2-3), 85-100.
- Rizzolatti, G., Fadiga, L., Gallese, V., & Fogassi, L. (1996). Premotor cortex and the recognition of motor actions, *Brain research. Cognitive Brain Research*, 3(2), 131-141.
- Runeson, S. (1974). Constant velocity--not perceived as such, *Psychological Research*, 37(1), 3-23.
- Runeson, S., & Frykholm, G. (1981). Visual perception of lifted weight, *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 7(4), 733-740.
- Samii, A., Nutt, J. G., & Ransom, B. R. (2004). Parkinson's disease, *The Lancet*, 363(9423), 1783-1793.
- Saygin, A. P., Wilson, S. M., Hagler, D. J., Jr., Bates, E., & Sereno, M. I. (2004). Point-light biological motion perception activates human premotor cortex, *Journal of Neuroscience*, 24(27), 6181-6188.
- Seidler, R. D., Alberts, J. L., & Stelmach, G. E. (2001). Multijoint movement control in Parkinson's disease, *Experimental Brain Research*, 140(3), 335-344.
- Servos, P., Osu, R., Santi, A., & Kawato, M. (2002). The neural substrates of biological motion perception: an fMRI study, *Cerebral Cortex*, 12(7), 772-782.
- Sheridan, M. R., Flowers, K. A., & Hurrell, J. (1987). Programming and execution of movement in Parkinson's disease, *Brain*, 110 (Pt 5), 1247-1271.
- Shiffrar, M., & Freyd, J. J. (1990). Apparent motion of the human body, *Psychological Science*, 1, 257-264.
- Shiffrar, M., & Freyd, J. J. (1993). Timing and apparent motion path choice with human body photographs, *Psychological Science*, 4(6), 379-384.
- Sirigu, A., Cohen, L., Duhamel, J. R., Pillon, B., Dubois, B., & Agid, Y. (1995). A selective impairment of hand posture for object utilization in apraxia, *Cortex*, 31(1), 41-55.
- Sparrow, W. A., Shinkfield, A. J., Day, R. H., & Zerman, L. (1999). Visual perception of human activity and gender in biological-motion displays by individuals with mental retardation, *American Journal of Mental Retardation*, 104(3), 215-226.
- Stevens, J. A., Fonlupt, P., Shiffrar, M., & Decety, J. (2000). New aspects of motion perception: selective neural encoding of apparent human movements, *Neuroreport*, 11(1), 109-115.

- Tai, Y. F., Scherfler, C., Brooks, D. J., Sawamoto, N., & Castiello, U. (2004). The human premotor cortex is 'mirror' only for biological actions, *Current Biology*, 14(2), 117-120.
- Thomassen, A. J. W. M., & Teulings, H. L. (1985). Time, size and shape in handwriting: Exploring spatio-temporal relationships at different levels. In *Time, Mind & Behavior*, J.A. Michon, J.B. Jackson (eds.) (Heidelberg: Springer) (pp. 253-263).
- Thompson, J. C., Clarke, M., Stewart, T., & Puce, A. (2005). Configural processing of biological motion in human superior temporal sulcus, *Journal of Neuroscience*, 25(39), 9059-9066.
- Ungerleider, L. G., & Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. In D. J. Ingle, M. A. Goodale & R. J. Mansfield (Eds.), *Analysis of visual behavior* Cambridge Mass : MIT press. (pp. 549-580).
- Vaina, L. M., Solomon, J., Chowdhury, S., Sinha, P., & Belliveau, J. W. (2001). Functional neuroanatomy of biological motion perception in humans, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98(20), 11656-11661.
- Vallortigara, G., Regolin, L., & Marconato, F. (2005). Visually inexperienced chicks exhibit spontaneous preference for biological motion patterns, *PLoS Biology*, 3(7), e208.
- Viviani, P. (1998). La dynamique de la perception, *Sciences & Vie*, Hors série, 204, 122-132.
- Viviani, P. (2002). Motor competence in the perception of dynamic events. In *Attention and performance XIX: Common mechanisms in perception and action*, W. Prinz. & B. Hommel (eds.), (NY: Oxford University Press), (pp. 406-442).
- Viviani, P., Baud-Bovy, G., & Redolfi, M. (1997). Perceiving and tracking kinesthetic stimuli: further evidence of motor-perceptual interactions, *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 23(4), 1232-1252.
- Viviani, P., & Flash, T. (1995). Minimum-jerk, two-thirds power law, and isochrony: converging approaches to movement planning, *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 21(1), 32-53.
- Viviani, P., & McCollum, G. (1983). The relation between linear extent and velocity in drawing movements, *Neuroscience*, 10(1), 211-218.
- Viviani, P., & Mounoud, P. (1990). Perceptuomotor compatibility in pursuit tracking of two-dimensional movements, *Journal of Motor Behavior*, 22(3), 407-443.
- Viviani, P., & Schneider, R. (1991). A developmental study of the relationship between geometry and kinematics in drawing movements, *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 17(1), 198-218.
- Viviani, P., & Stucchi, N. (1989). The effect of movement velocity on form perception: geometric illusions in dynamic displays, *Perception & Psychophysics*, 46(3), 266-274.
- Viviani, P., & Stucchi, N. (1992). Biological movements look uniform: evidence of motor-perceptual interactions, *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 18(3), 603-623.
- Viviani, P., & Terzuolo, C. (1982). The organisation of movement in handwriting and typing. In B. Butterworth (Ed.), *Language production (Vol. 2): Production of language in non-speech modalities*. London: Academic Press.
- Woodworth, R. S. (1899). The accuracy of voluntary movement, *Psychological Review Monograph Supplements*, 3, 1-119.

ANNEXES

ANNEXE I : MODIFICATION DU PROFIL DE VITESSE D'UNE ELLIPSE

III.1.1.1.1 Notations

La lettre d précise qu'il s'agit de valeurs d'origine

La lettre t correspond à un point de l'ellipse à un instant déterminé

La lettre i correspond au nombre de coordonnées choisies

La lettre n précise qu'il s'agit de valeurs recalculées

III.1.1.1.2 Données de départ

- Recueil des coordonnées de production de l'ellipse ($X_d(t)$, $Y_d(t)$)
- Calcul de l'évolution de la vitesse ($V_{xd}(t)$ et $V_{yd}(t)$) et de l'accélération sur X et sur Y ($A_{xd}(t)$ et $A_{yd}(t)$)
 - o $V_{xd}(t) = (X_d(t) - X_d(t-1)) / 0,005$ et $V_{yd}(t) = (Y_d(t) - Y_d(t-1)) / 0,005$
 - o $A_{xd}(t) = (V_{xd}(t) - V_{xd}(t-1)) / 0,005$ et $A_{yd}(t) = (V_{yd}(t) - V_{yd}(t-1)) / 0,005$
- Calcul du profil de vitesse $V_d(t) = \sqrt{(V_{xd}(t)^2 + V_{yd}(t)^2)}$
- Calcul du rayon de courbure $R_d(t) = (V_{xd}(t)^2 + V_{yd}(t)^2)^{3/2} / [(V_{xd}(t) * A_{yd}(t)) - (V_{yd}(t) * A_{xd}(t))]^2$

III.1.1.1.3 Procédure

1) Calcul de la nouvelle évolution de la cinématique $V_n(t)$ avec une autre valeur de l'exposant $1-\beta$ (par exemple -0,33) sans changer le rayon de courbure.

$$\text{Pour } 1 < t < i, V_n(t) = K * R_d(t)^{1-\beta}$$

2) Calcul de l'évolution de la trajectoire pour ce nouvel exposant en commençant de 0 et en considérant 1 point toutes les 5 ms.

$$\text{Pour } 1 < t < i, E_n(t) = E_n(t-1) + V_n(t) * 0,005$$

3) Ajustement de la nouvelle évolution de trajectoire sur celle de départ.

$$\text{Pour } 1 < t < i, E_n(t) = E_n(t) * \max E_d(t) / \max E_n(t)$$

4) Repérage pour chaque valeur de $E_n(t)$ les valeurs $E_d(t)$ et $E_d(t+1)$ et les coordonnées $X_d(t)$, $Y_d(t)$, $X_d(t+1)$ et $Y_d(t+1)$ associées.

5) Calcul des nouvelles coordonnées ($X_n(t)$; $Y_n(t)$) de l'ellipse par interpolation linéaire

$$X_n(t) = X_d(t) + \{(E_n(t) - E_d(t)) / (E_d(t+1) - E_d(t)) * (X_d(t+1) - X_d(t))\}$$

$$Y_n(t) = Y_d(t) + \{(E_n(t) - E_d(t)) / (E_d(t+1) - E_d(t)) * (Y_d(t+1) - Y_d(t))\}$$

ANNEXE II : INVERSION DU PROFIL DE VITESSE D'UN MOUVEMENT DONNE

III.1.1.1.4 Données de départ

- Recueil des coordonnées (Xd (t), Yd (t))
- Calcul de l'évolution de la vitesse $V_{xd}(t) = (X_d(t) - X_d(t-1)) / 0.005$ et $V_{yd}(t) = (Y_d(t) - Y_d(t-1)) / 0.005$
- Calcul du profil de vitesse $V_d(t) = \sqrt{V_{xd}(t)^2 + V_{yd}(t)^2}$
- Calcul de l'évolution de la trajectoire $E_d(t) = E_d(t-1) + V_d(t) * 0.005$

III.1.1.1.5 Procédure

- 1) Inversion point par point le profil de vitesse de départ

$$V_n(t) = (-1 * (V_d(t)) - \text{moyenne } V_d) + \text{moyenne } V_d$$

- 2) Calcul de l'évolution de la trajectoire associée à ce nouveau profil de vitesse

$$E_n(t) = E_n(t-1) + V_n(t) * 0.005$$

- 3) Pour chaque $E_n(t)$ on retrouve le $E_d(t)$ et $E_d(t+1)$ qui l'entourent ainsi que les $X_d(t)$

$Y_d(t)$, $X_d(t+1)$ et $Y_d(t+1)$.

- 4) Calcul des nouvelles coordonnées (X_n, Y_n) par interpolation linéaire.

$$X_n(t) = X_d(t) + \{(E_n(t) - E_d(t)) / (E_d(t+1) - E_d(t)) * (X_d(t+1) - X_d(t))\}$$

$$Y_n(t) = Y_d(t) + \{(E_n(t) - E_d(t)) / (E_d(t+1) - E_d(t)) * (Y_d(t+1) - Y_d(t))\}$$

ANNEXE III : ARTICLES PUBLIES OU EN COURS DE PUBLICATION

- 1- Bidet-Ildei, C., Orliaguet, J-P., Sokolov, A. & Pavlova, M. (2006). Perception of elliptic biological motion, *Perception*, 35(8), 1137-1147.
- 2- Bidet-Ildei, C., Méary, D. & Orliaguet, J-P. (sous-presse). Visual perception of elliptic movements in 7-to-11-year-old children: Evidence of motor-perceptual interactions, *Current Psychology letters*.

Perception advance online publication

DOI:10.1068/p5482

Perception of elliptic biological motion

Christel Bidet-Ildei ¶ §, Jean-Pierre Orliaguet §, Alexander N Sokolov #, Marina Pavlova ¶*

¶ Developmental Cognitive and Social Neuroscience Unit, Department of Paediatric Neurology and Child Development, Children's Hospital, University of Tübingen, Hoppe-Seyler-Strasse 1, D 72076 Tübingen, Germany; e-mail: marina.pavlova@uni-tuebingen.de; § Laboratory of Psychology and Neurocognition, CNRS UMR 5105, Université Pierre Mendès-France, F 38040 Grenoble Cedex 9, France; # Center for Neuroscience and Learning and Department of Psychiatry, University of Ulm Medical School, Leimgrubenweg 12-14, D 89075 Ulm, Germany

Received 26 July 2005, in revised form 27 November 2005; published online 21 July 2006

Abstract. We tested the ability of the mature visual system for discrimination between types of elliptic biological motion on the basis of event kinematics. Healthy adult volunteers were presented with point-light displays depicting elliptic motion when only a single dot, a moving point-light arm, or a whole point-light human figure was visible. The displays were created in accordance with the two-thirds power kinematic law (*natural* motion), whereas the control displays violated this principle (*unnatural* motion). On each trial, participants judged whether the display represented natural or unnatural motion. The findings indicate that adults are highly sensitive to violation of the two-thirds power kinematic law. Notably, participants can easily discriminate between natural and unnatural motions without recognising the stimuli, which suggests that people implicitly use kinematic information. Most intriguing, event recognition seems to diminish the capacity to judge whether event kinematics is unnatural. We discuss possible ways for a cross-talk between perception and production of biological movement, and the brain mechanisms involved in biological motion processing.

1 Introduction

More than three decades ago, Gunnar Johansson, a distinguished researcher at the Uppsala University in Sweden, introduced point-light displays depicting different types of human locomotion (Johansson 1973). Since that time, one of the most robust and replicable findings is that the visual system is exquisitely tuned to biological motion produced by living organisms, and in a number of studies attempts have been made to clarify possible accounts of this extraordinary tuning.

The sensitivity to point-light biological motion emerges early in perceptual development. Fox and McDaniel (1982) demonstrated that 8-week-old infants exhibit a preference for a point-light walker over dynamic noise or the same configuration inverted 180° in the image plane. By 3–5 months of age, infants discriminate a point-light walker from displays with perturbed local rigidity (Berthenthal et al 1987) or with scrambled spatial relations between the dots (Berthenthal et al 1984). Although recent data suggest that a preference for semirigid biological motion may be pre-disposed in the brain of vertebrates (Vallortigara et al 2005), it appears that visual experience and perceptual learning beneficially affect performance on a variety of biological motion tasks (eg Grossman et al 2004; Hiris et al 2005; Jacobs et al 2004). For example, spontaneous recognition of point-light displays representing human and animal figures improves substantially during the first five years of life (Pavlova et al 2001). Perception of human locomotion is more accurate than of social and instrumental actions that are less frequent in the daily repertoire (Dittrich 1993).

One possible account for the high sensitivity to biological motion is provided by the visual–motor linkage hypothesis. This view assumes that perceivers use their own motor knowledge for the visual perception and interpretation of biological movement.

* Author to whom all correspondence should be addressed.

In accord with this, it is reported that observers better recognise point-light displays representing their own movement for which they have implicit motor programs than movements of their friends of which they have only visual experience (Loula et al 2005). Human infants also exhibit a kind of complementary link in the development of motor skills and abilities to perceive biological movement (Bertenthal 1996; Booth et al 2002). Louis-Dam with colleagues (2000) have shown that performance in a perceptual handwriting–anticipation task is closely related to the motor abilities for handwriting. By contrast, adolescents with impaired locomotion that has been disrupted from the very beginning can exhibit high sensitivity to a point-light walker (Pavlova et al 2003). Yet, because of the fundamental evolutionary and social significance of human locomotion, a hard-wired schema for perception of this type of biological motion might be inherent for the brain. This conjecture agrees with the findings in patient AZ with congenitally absent limbs (Brugger et al 2000). Despite complete absence of motor experience, the perceptual judgments of AZ, as in healthy controls, obey the biomechanical constraints (see also Funk et al 2005).

Psychophysical data indicate that visual processing of body movements is substantially affected by the biomechanical properties inherent for these movements (eg Pavlova and Sokolov 2000; Shiffrar and Freyd 1993). In particular, spatial and kinematic constraints are of immense value for successful recognition. Display inversion in the image plane dramatically impedes veridical perception of a point-light walker (Pavlova and Sokolov 2000), presumably because of altered information about dynamic gravity-inertial force vectors (Pavlova and Sokolov 2003; Shipley 2003). Prior information about display inversion facilitates biological motion recognition only when it is complemented by contextual elements (Pavlova and Sokolov 2003). This inversion effect is diminished for biomechanically impossible body poses (Reed et al 2003).

The role of kinematic constraints in biological-motion processing is revealed by the findings indicating that humans can distinguish and recognise events on the basis of velocity distributions along a motion path (eg Bingham et al 1995; Muchisky and Bingham 2002). Kinematic constraints are also reflected in the two-thirds power law pointing to a specific link between the tangential velocity and the trajectory path (Lacquaniti et al 1983). This law is defined by the equation: $V(t) = K(t)\{R(t)/[1 + \alpha R(t)]\}^{1-\beta}$, where $V(t)$ is the tangential velocity, $R(t)$ is the radius of curvature of the trajectory in time t , K is a velocity gain factor dependent on the movement tempo, α is a coefficient dependent on the inflection point on the trajectory, and β is an exponent which has a value very close to $2/3$ from puberty onwards (Viviani and Schneider 1991). Humans are sensitive to this motor rule, exhibiting difficulties in following with eyes or hand an elliptic path with a velocity profile which does not obey the two-thirds power law (de'Sperati and Viviani 1997). Motion corresponding to the two-thirds power law can cause rather strong perceptual illusions (Viviani and Stucchi 1989, 1992). For example, when a dot moves along a circular trajectory with an instantaneous velocity corresponding to the two-thirds power law (ie with kinematic characteristics corresponding to an elliptic path) participants perceive an elliptic trajectory instead of a circular one. Yet, violations of the law appear to be irrelevant for imagery processes in a motion-extrapolation task (Actis-Grosso et al 2001).

In the present work, we investigated the ability of the mature visual system to discriminate between elliptic motions on the basis of their kinematics that either correspond to the two-thirds power law (*natural*) or violate it (*unnatural* condition). In particular, we address the following issues: (i) whether the visual system is tuned to specific changes in the distribution of velocity, and (ii) whether recognition of events is an obligatory prerequisite for discrimination between *natural* and *unnatural* event kinematics. With this purpose in mind, we presented healthy adult volunteers with point-light displays depicting elliptic motion when only a single dot, a moving point-light arm,

or a whole point-light human figure was visible. In other words, the displays varied in the amount of information that might promote event recognition.

2 Method

2.1 Subjects

Twelve right-handed adults [seven males, five females, aged between 19 and 43 years, mean age 27.5 (± 5.47) years], with normal or corrected-to-normal vision participated in the study. Nobody had a history of neurological or psychiatric disorders. Participants did not have any previous experience with biological motion stimuli, and were unfamiliar with the purpose of the study. They were recruited as volunteers among the international community from the University Hospital of Tübingen, Germany.

2.2 Stimuli

We used three types of point-light displays depicting an elliptic motion (figure 1): a point-light human figure, a point-light arm, and a single-dot display. The first stimulus depicted an elliptic movement produced by the left rigid arm of a human figure represented by 14 dots placed on the main joints (shoulders, elbows, hands, hips, knees, and feet), the pelvis, and the head. The whole figure was static except for the left shoulder, elbow, and hand. The elliptic arm movement was represented by 9 dots placed on the head, shoulder, elbow, wrist, and index finger of an actor viewed from above. Elliptic motion spontaneously produced by the left hand of the actor holding a pencil was filmed by the 3-D ultrasound Zebris system that allows recording spatial and temporal parameters of movement (spatial resolution, 0.2 mm; temporal resolution, 200 Hz). The third type of stimuli depicted an elliptic motion of a single dot placed on the index finger of the left arm. The single-dot and human-figure displays were computer-generated. All displays consisted of bright dots moving against a dark background (figure 1). The elliptic motion of all three types of stimuli follows the two-thirds power law with β of $2/3$ that gives an exponent $1 - \beta$ equal to $1/3$. We consider this condition as a natural motion. For each type of stimulus, control displays were created by violating this kinematic law. Namely, in the equation given above we changed the exponent β to $4/3$ ($1 - \beta = -1/3$) to obtain an inverse velocity profile that gave an impression of abrupt alterations of accelerations and decelerations. Dots in all displays moved along the elliptic trajectory with a mean velocity of $60 \text{ cycles min}^{-1}$; one cycle corresponds to 40 frames with frame duration of 25 ms. The perimeter of

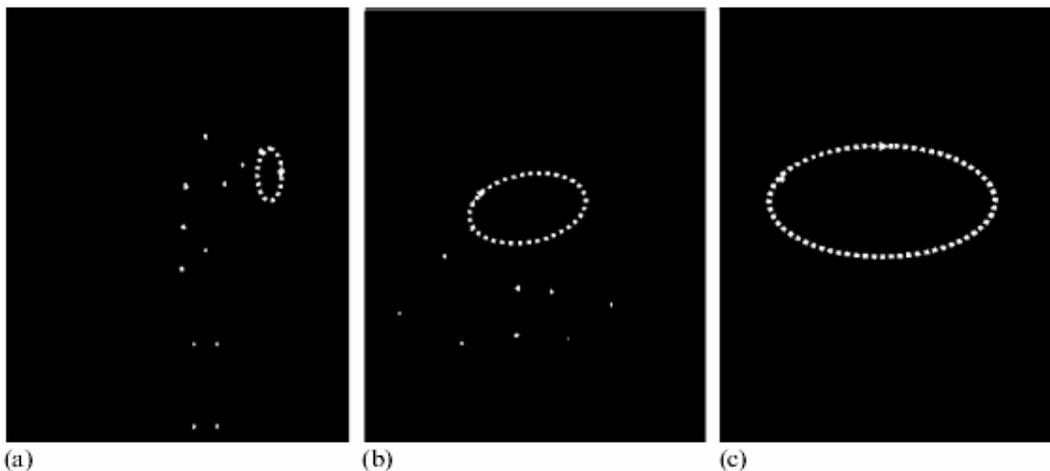


Figure 1. Static representation of the point-light displays: (a) a human figure, front view; (b) an arm, view from above; and (c) a single dot, front view. Light arrows indicate direction of motion. All displays consisted of bright dots moving against a dark background.

the elliptic form was 19.31, 10.41, and 3.87 cm for the single-dot, the arm, and the human-figure display, respectively.

2.3 Procedure

Participants were seated at a distance of 70 cm in front of the computer screen (800 × 600 pixels, 60 Hz) in a dimly illuminated room. On each run, fifty trials were presented for each display type and condition (natural/unnatural) in a randomised order. On each trial, participants judged as quickly as possible whether the display depicted natural or unnatural movement. They were told that both accuracy and response time were important. Participants pressed two response keys on a panel indicating either natural or unnatural motion. They used the right hand for their responses. The assignment of response keys (left – right for natural and unnatural motion) was counterbalanced across participants. After the whole experimental run was completed, the participants were asked to briefly describe what they saw and to indicate any stimulus interpretation they might have had. The whole experimental session took about 20–25 min.

3 Results

For each subject and display type, a d' value, a standard measure of sensitivity in signal detection theory (Macmillan and Creelman 2005), was computed. As can be seen from figure 2, d' values for all types of stimuli are rather high (2.86, 4.71, and 2.71, for single dot, arm, and human figure, respectively). A one-way ANOVA with factor display type (single dot/arm/human figure) performed on individual d' values revealed significant differences in sensitivity between the stimulus types ($F_{2,22} = 8.38$, $p < 0.01$). Pairwise comparisons indicate that the sensitivity for the movement of a point-light arm is higher than for the single dot ($t_{11} = 3.39$, $p < 0.01$) or for the whole point-light figure ($t_{11} = 3.37$, $p < 0.01$). Despite the differences in the extent of motion path, no significant difference in sensitivity was found between the single-dot display and the human-figure display ($t_{11} = 0.32$, ns).

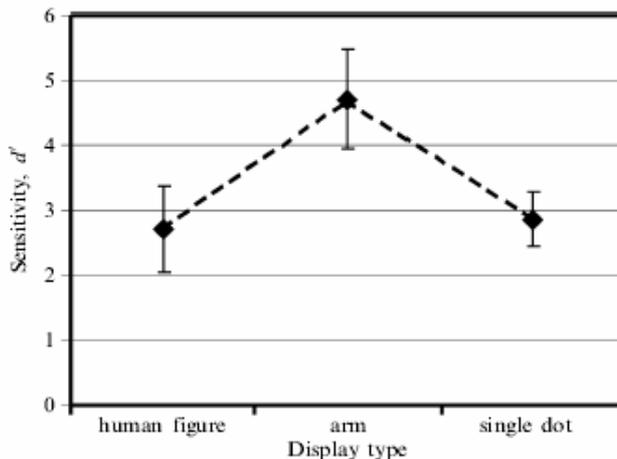


Figure 2. Sensitivity index, d' , for different display types. See text for details.

No difference in the cognitive decision criterion was found between the display representing the elliptic motion of the arm and the human-figure display ($t_{11} = 1.64$, ns), and between the arm and single-dot displays ($t_{11} = -1.74$, ns). This suggests that it is solely the difference in sensitivity that is responsible for the differences in performance between these types of displays. However, a significant difference in the decision criteria was found between the human-figure and single-dot displays ($t_{11} = -2.62$, $p < 0.05$). The decision criterion was much higher for the single-dot than for the human-figure display (2.09 and 0.48, respectively), indicating participants' tendency to assign natural response to the human-figure rather than to the single-dot display.

We computed the percentage of hits for each condition and for each type of display (figure 3). A two-way ANOVA with factors condition (natural/unnatural) and display type (arm/single point/human figure) performed on individual hit values revealed a highly significant main effect of both factors ($F_{1,11} = 10.88$ and $F_{2,22} = 13.21$, $p < 0.001$, respectively). Overall, participants gave many more hits in response to all types of displays under the natural (90.94%) than the unnatural condition (78.33%). This indicates that, when event kinematics violates the two-thirds power law, it is much more difficult to judge whether an elliptic motion is natural or not. However, displays created according to this motor rule are readily perceived as natural.

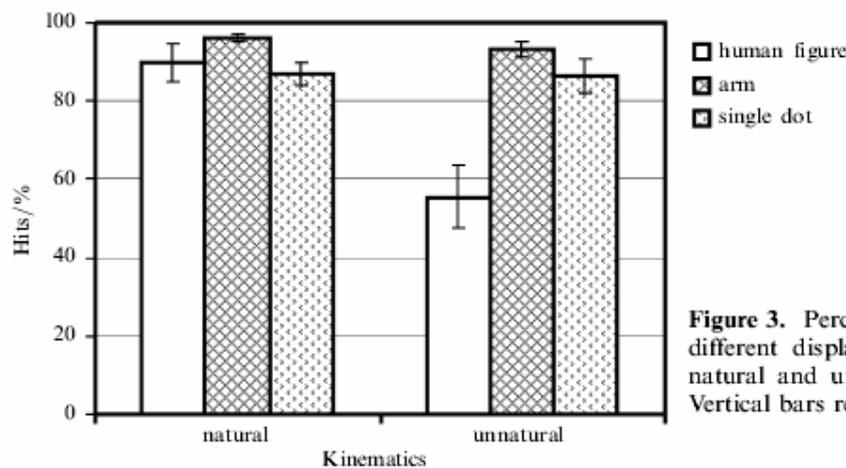


Figure 3. Percentage of hits for different display types under the natural and unnatural conditions. Vertical bars represent ± 1 SE.

For the single-dot and arm displays the percentage of hits was above chance both under the natural and unnatural conditions ($t_{11} = 40.63$, $t_{11} = 135.23$, under the natural, and $t_{11} = 26.74$, $t_{11} = 71.03$, $p < 0.001$, under the unnatural conditions, respectively). For the human-figure display, the percentage of hits was above chance only under the natural condition ($t_{11} = 26.78$, $p < 0.001$), and the number of hits significantly differed between the natural and unnatural conditions ($t_{11} = 4.13$, $p < 0.01$). For other types of stimuli, this difference was not significant ($t_{11} = 0.09$, $t_{11} = 1.49$, ns, for the single-dot and the arm display, respectively).

All participants recognised the display depicting a human point-light figure as a human being executing an elliptic motion by his/her hand. Only three out of twelve participants recognised an elliptic motion in the single-dot and arm displays. The majority of participants interpreted these displays as representing motion of dots without any event identification or naming. One participant interpreted the point-light arm display as somebody who is swimming, and one participant reported the elliptic-like motion of a leg. One participant interpreted the single-dot display as a flying mosquito. Poor recognisability of the arm display is in accord with the findings indicating that the recognition of point-light displays is affected by the presentation of stimuli in an unusual orientation or perceived from a non-canonical vantage point (eg Pavlova and Sokolov 2000, 2003; Verfaillie 1993, 2000).

As can be seen in figure 4, the percentage of hits under unnatural conditions for all display types is inversely related to display recognition: the most recognisable display of a human figure elicits the lowest number of hits. Such a relationship was not observed for the natural condition: for all display types, the percentage of hits was equally high (figure 3).

Figure 5 shows the response time for each display type under the natural and unnatural conditions. A two-way ANOVA with factors condition (natural/unnatural) and display type (single dot/arm/human figure) did not reveal any significant effects

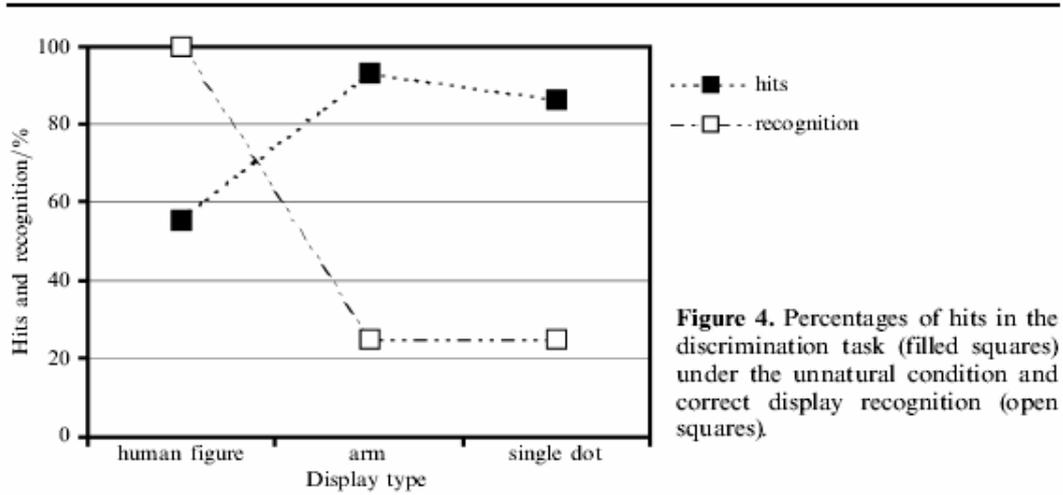


Figure 4. Percentages of hits in the discrimination task (filled squares) under the unnatural condition and correct display recognition (open squares).

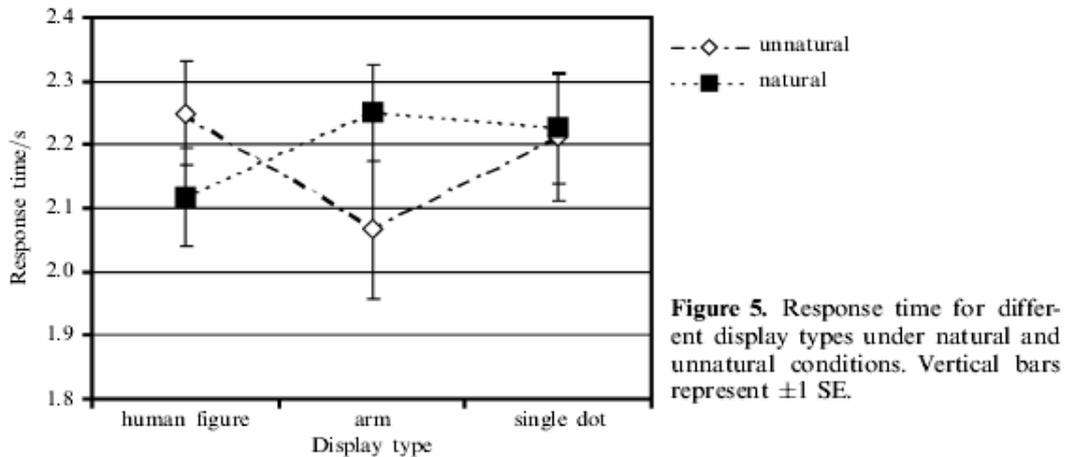


Figure 5. Response time for different display types under natural and unnatural conditions. Vertical bars represent ± 1 SE.

of condition ($F_{1,11} = 0.58$, ns) or display type ($F_{2,22} = 0.49$, ns). However, interaction between these factors was significant ($F_{2,22} = 7.52$, $p < 0.01$). Pairwise comparisons indicated a significant (although opposite) difference between the response time for the natural and unnatural conditions for the arm and human-figure displays ($t_{11} = 3.45$, $p < 0.005$, and $t_{11} = -2.32$, $p < 0.04$, respectively) but not for the single-dot display ($t_{11} = 0.26$, ns). Under the unnatural condition, the shorter response time for the arm display might be explained by the presence of additional information about the abrupt arm articulation.

4 Discussion

Here we addressed the issue whether the mature visual system is capable of discriminating between natural and unnatural types of elliptic motion on the basis of their kinematics. The findings clearly indicate that in healthy adults the visual system is highly tuned to kinematics of biological motion, and healthy adults can make their judgments solely on the basis of velocity distribution along motion trajectories. For all displays, d' values were higher than 2.5 indicating extremely good capability for discrimination. Notably, participants make substantially fewer errors when perceiving elliptic motion that corresponds to the principle of biological movement production. These findings appear to corroborate psychophysical, neuroimaging, and neuropsychological work revealing the link between production and perception of human movements. For example, Méary with colleagues (2005) have shown that perceptual judgments on handwriting and pointing depend on the motor rules that constrain each

type of motion. Similarly, when adults or children are choosing the next step in a perceived sequence of handwriting or reaching movements, they rely upon the motor anticipation rule that is determined by production of motor sequences (Kandel et al 2000b; Louis-Dam et al 2000). Positron emission tomography (PET) and functional magnetic resonance imaging (fMRI) data indicate that brain areas activated for the production and perception of biological motion are largely overlapping (Decety et al 1997; Hari et al 1998; Nishitani and Hari 2000; Rizzolatti et al 1996). For example, Broca's region and the precentral motor cortex are activated both during execution of hand actions and during observation of similar actions performed by other individuals (Rizzolatti et al 1996). Neuropsychological work with patients also indicates a close link between production and perception of motion. For example, a patient with dysgraphia exhibits correspondences between difficulties in the production and perception of handwriting movements (Chary et al 2004).

The other important finding of the present work is that discriminability of natural and unnatural kinematics is not necessarily linked to event recognition. Natural and unnatural kinematics of two out of three displays was highly discriminable, but almost all participants failed in spontaneous event recognition. One possible explanation of this finding is associated with the implicit use of motor knowledge in the perception of biological movements. In accord with this, Kandel with colleagues (2000a, 2000b) reported that in a handwriting-anticipation task perceivers are not able to explain or to give pertinent indications guiding their perceptual anticipation. An additional argument in favour of the implicit use of motor rules in biological-motion processing comes from the notion about the existence of two types of representation (Jeannerod 1994, 2001; Jeannerod and Jacob 2005). One of them, the pragmatic representation mode, corresponds to procedural capacities of the perceivers, and contains the representation of his/her motor abilities. This type of representation is very difficult to verbalise because it is based on implicit knowledge how to produce movements. The other, semantic mode contains explicit representations that are easy to verbalise. This notion is in accord with neuropsychological studies on agnosia pointing to dissociation between the explicit recognition of action and the capacity to produce this action (Behrmann and Kimchi 2003; Ferreira et al 1998; Milner 1997; Milner et al 1991).

The most intriguing finding is that event recognition seems to diminish the capacity to judge whether event kinematics is unnatural: when the display kinematics violates the two-thirds power law, the most recognisable human-figure display elicits the lowest percentage of hits. In other words, when a display is easily recognisable as a human figure, observers seem to be biased toward interpretations of this display as representing natural motion. This is in agreement with the findings that the perceived identity and previous experience associated with this identity can influence how that figure is perceived to move. For example, Brosgole and Whalen (1967) reported that an inducing object was more effective when it induced an airplane to move forward rather than backward. Another example might be that the recognition of point-light displays substantially diminishes the apparent-facing effect caused by reverse transformation of biological motion (Pavlova et al 2002). There is a bias to perceive forward locomotion, at the expense of proper interpretation of the underlying form in time-reversed biological motion films. An additional explanation of these findings is that a kind of perceptual conflict might occur between bias caused by display recognition to judge the motion kinematics as natural and sensitivity to unnatural motion kinematics. Such perceptual conflict might be reflected in a longer response time to the most recognisable human-figure display that has been observed in our study. Overall, it appears that knowledge about object nature helps one tolerate visual distortions, but it also can lead to erroneous perceptual interpretations. Although it is known that top-down influences can profoundly modulate visual sensitivity in static displays, there is only

limited evidence indicating that dynamic displays can also be affected. Future research, therefore, is required to investigate this phenomenon.

Recent brain imaging data in humans, single cell recording in the macaque monkey, and neuropsychological case studies suggest that biological motion processing engages a specialised neural network that differs from processing of other moving stimuli (Grossman and Blake 2002; Grossman et al 2004; Jellema et al 2004; Pavlova et al 2006b; Vaina and Gross 2004). Brain imaging repeatedly indicates that a gradient of activation during viewing of biological movement of a whole body and specific body parts (in particular, hand movements) under point-light and realistic conditions is located within regions of the superior temporal sulcus, STS (eg Beauchamp et al 2002, 2003; Pelphrey et al 2005; Puce and Perrett et al 2003; Wheaton et al 2004). Canonical point-light biological motion elicits greater activation over the STS than configurations with scrambled spatial or temporal relationships between the moving dots (Grossman et al 2000; Peuskens et al 2005) or disjointed mechanical figures (Pelphrey et al 2003). Moreover, the STS is less activated by inverted than by upright point-light biological motions of a whole body (Grossman and Blake 2001; Peuskens et al 2005). These findings are entirely restricted to localisation of cortical regions involved in biological motion processing, and have been substantially extended by magnetoencephalographic (MEG) data. A specific pattern of oscillatory gamma neuromagnetic response to canonical point-light walker rapidly unfolds in time over the left occipital (100 ms), bilateral parietal (130 ms), and right temporal (170 ms) lobes. This pattern of activity, however, is topographically restricted to the left occipital areas in response to an inverted walker, and is completely absent in response to a spatially scrambled display (Pavlova et al 2004, 2006a). Electroencephalographic (EEG) data reveal that point-light whole-body biological movement elicits negative peaks at latencies around 180–200 ms and between 230 and 360 ms. These peaks are more pronounced for canonical than for scrambled displays (Hirai et al 2003, 2005; Jokisch et al 2005). The later component is associated with the right occipitotemporal region and the superior temporal gyrus. Already in infants aged 8 months the averaged negative amplitude in the right hemisphere is greater in response to canonical than to scrambled biological motion (Hirai and Hiraki 2005). A further step toward uncovering the functional neuronatomy of biological motion processing would be a comparison of the time course and dynamic topography of brain activation in response to displays representing natural biologically plausible and unnatural kinematics of human movement.

Acknowledgments. We thank David Méary for assistance in display creation, Jürgen Dax for creating the program for stimulus presentation, and Ingeborg Krägeloh-Mann for general support. Christel Bidet-Ildei was a visiting PhD student in MP's laboratory. Her stay was supported by the "Aires Culturelles" Program of the French Research Ministry.

References

- Actis-Grosso R, de'Sperati C, Stucchi N, Viviani P, 2001 "Visual extrapolation of biological motion", in *Fechner Day 2001. Proceedings of the Seventeenth Annual Meeting of the International Society for Psychophysics* Eds E Sommerfeld, R Kompass, T Lachmann (Lengerich, Germany: Pabst Science Publishers) pp 261–266
- Beauchamp M S, Lee K E, Haxby J V, Martin A, 2002 "Parallel visual motion processing streams for manipulable object and human movements" *Neuron* **34** 149–159
- Beauchamp M S, Lee K E, Haxby J V, Martin A, 2003 "fMRI responses to video and point-light displays of moving humans and manipulable objects" *Journal of Cognitive Neuroscience* **15** 991–1001
- Behrmann M, Kimchi R, 2003 "What does visual agnosia tell us about perceptual organization and its relationship to object perception?" *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* **29** 19–42
- Bertenthal B I, 1996 "Origins and early development of perception, action, and representation" *Annual Review of Psychology* **47** 431–459

-
- Bertenthal B I, Proffitt D R, Cutting J E, 1984 "Infants sensitivity to figural coherence, in biomechanical motion" *Child Development* **37** 213–230
- Bertenthal B I, Proffitt D R, Kramer S, 1987 "Perception of biomechanical motion by infants: implementation of various processing constraints" *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* **4** 577–585
- Bingham G P, Rosenblum L D, Schmidt R C, 1995 "Dynamics and the orientation of kinematic forms in visual event recognition" *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* **21** 1473–1493
- Booth A E, Bertenthal B I, Pinto J, 2002 "Perception of the symmetrical patterning of human gait by infants" *Developmental Psychology* **38** 554–563
- Brosigole L, Whalen M, 1967 "The effect of meaning on the allocation of visually induced motion" *Perception & Psychophysics* **2** 275–277
- Brugger P, Kollias S S, Muri R M, Crelier G, Hepp-Reymond M C, Regard M, 2000 "Beyond remembering: phantom sensations of congenitally absent limbs" *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* **97** 6167–6172
- Chary C, Méary D, Orliaguet J-P, David D, Moreau O, Kandel S, 2004 "Influence of motor disorders on visual perception of human movements in a case of peripheral dysgraphia" *Neurocase* **10** 223–232
- Decety J, Grèzes J, Costes N, Perani D, Jeannerod M, Procyk E, Fazio F, 1997 "Brain activity during observation of actions. Influence of action content and subject's strategy" *Brain* **120** 1763–1777
- de'Sperati C, Viviani P, 1997 "The relationship between curvature and velocity in two-dimensional smooth pursuit eye movements" *Journal of Neuroscience* **17** 3932–3945
- Dittrich W H, 1993 "Action categories and the perception of biological motion" *Perception* **22** 15–22
- Ferreira C T, Ceccaldi M, Giusiano B, Poncet M, 1998 "Separate visual pathways for perception of actions and objects: evidence from a case of apperceptive agnosia" *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry* **65** 382–385
- Fox R, McDaniel C, 1982 "The perception of biological motion by human infants" *Science* **218** 486–487
- Funk M, Shiffrar M, Brugger P, 2005 "Hand movement observation by individuals born without hands: phantom limb experience constrains visual limb perception" *Experimental Brain Research* **164** 341–346
- Grossman E D, Blake R, 2001 "Brain activity is evoked by inverted and imagined biological motion" *Vision Research* **41** 1475–1482
- Grossman E D, Blake R, 2002 "Brain areas active during visual perception of biological motion" *Neuron* **35** 1167–1175
- Grossman E D, Blake R, Kim C Y, 2004 "Learning to see biological motion: brain activity parallels behavior" *Journal of Cognitive Neuroscience* **16** 1669–1679
- Grossman E, Donnelly M, Price R, Pickens D, Morgan V, Neighbor G, Blake R, 2000 "Brain areas involved in perception of biological motion" *Journal of Cognitive Neuroscience* **12** 711–720
- Hari R, Forss N, Avikainen S, Kirveskari E, Salenius S, Rizzolatti G, 1998 "Activation of human primary motor cortex during action observation: a neuromagnetic study" *Neurobiology* **95** 15061–15065
- Hirai M, Fukushima H, Hiraki K, 2003 "An event-related potentials study of biological motion perception in humans" *Neuroscience Letters* **19** 41–44
- Hirai M, Hiraki K, 2005 "An event-related potentials study of biological motion perception in human infants" *Cognitive Brain Research* **22** 301–304
- Hirai M, Senju A, Fukushima H, Hiraki K, 2005 "Active processing of biological motion perception: an ERP study" *Cognitive Brain Research* **23** 387–396
- Hiris E, Krebeck A, Edmonds J, Stout A, 2005 "What learning to see arbitrary motion tells us about biological motion perception" *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* **31** 1096–1106
- Jacobs A, Pinto J, Shiffrar M, 2004 "Experience, context and the visual perception of human movement" *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* **30** 1–14
- Jeannerod M, 1994 "The representing brain. Neural correlates of motor intention and imagery" *Behavioural and Brain Sciences* **17** 187–202
- Jeannerod M, 2001 "Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition" *NeuroImage* **14** S103–S109
- Jeannerod M, Jacob P, 2005 "Visual cognition: a new look at the two-visual systems model" *Neuropsychologia* **43** 301–312

- Jellema T, Maassen G, Perrett D I, 2004 "Single cell integration of animate form, motion and location in the superior temporal cortex of the macaque monkey" *Cerebral Cortex* **14** 781–790
- Jokisch D, Daum I, Suchan B, Troje N F, 2005 "Structural encoding and recognition of biological motion: evidence from event-related potentials and source analysis" *Behavioural Brain Research* **28** 195–204
- Johansson G, 1973 "Visual perception of biological motion and a model for its analysis" *Perception & Psychophysics* **14** 201–211
- Kandel S, Orliaguet J-P, Boe L-J, 2000a "Detecting anticipatory events in handwriting movements" *Perception* **29** 953–964
- Kandel S, Orliaguet J-P, Viviani P, 2000b "Perceptual anticipation in handwriting: the role of implicit motor competence" *Perception & Psychophysics* **62** 706–716
- Lacquaniti F, Terzuolo C A, Viviani P, 1983 "The law relating kinematic and figural aspects of drawing movement" *Acta Psychologica (Amsterdam)* **54** 115–130
- Louis-Dam A, Kandel S, Orliaguet J-P, 2000 "Anticipation motrice et anticipation perceptive" *Psychologie Française* **45** 333–342
- Loula F, Prasad S, Harber K, Shiffrar M, 2005 "Recognizing people from their movement" *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* **31** 210–220
- Macmillan N A, Creelman C D, 2005 *Detection Theory: A User's Guide* (Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates)
- Méary D, Chary C, Palluel R, Orliaguet J-P, 2005 "Visual perception of pointing and writing movements" *Perception* **34** 1061–1067
- Milner A D, 1997 "Vision without knowledge" *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B* **352** 1249–1256
- Milner A D, Perrett D I, Johnston R S, Benson P J, Jordan T R, Heeley D W, Bettucci D, Mortara F, Mutani R, Terazzi E, Davidson D L W, 1991 "Perception and action in visual form agnosia" *Brain* **114** 405–428
- Muchisky M M, Bingham G P, 2002 "Trajectory forms as a source of information about events" *Perception & Psychophysics* **64** 15–31
- Nishitani N, Hari R, 2000 "Temporal dynamics of cortical representation for action" *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* **97** 913–918
- Pavlova M, Birbaumer N, Sokolov A, 2006a "Attentional modulation of cortical neuromagnetic gamma response to biological movement" *Cerebral Cortex* **16** 321–327
- Pavlova M, Krägeloh-Mann I, Birbaumer N, Sokolov A, 2002 "Biological motion shown backwards: the apparent facing effect" *Perception* **31** 435–443
- Pavlova M, Krägeloh-Mann I, Sokolov A, Birbaumer N, 2001 "Recognition of point-light biological motion display by young children" *Perception* **30** 925–933
- Pavlova M, Lutzenberger W, Sokolov A, Birbaumer N, 2004 "Dissociable cortical processing of recognizable and non-recognizable biological movement: analysing gamma MEG activity" *Cerebral Cortex* **14** 181–188
- Pavlova M, Marconato F, Sokolov A, Braun C, Birbaumer N, Krägeloh-Mann I, 2006b "Periventricular leukomalacia specifically affects cortical MEG response to biological motion" *Annals of Neurology* **59** 415–419
- Pavlova M, Sokolov A, 2000 "Orientation specificity in biological motion perception" *Perception & Psychophysics* **62** 888–899
- Pavlova M, Sokolov A, 2003 "Prior knowledge about display inversion in biological motion perception" *Perception* **32** 937–946
- Pavlova M, Staudt M, Sokolov A, Birbaumer N, Krägeloh-Mann I, 2003 "Perception and production of biological movement in patients with early periventricular brain lesions" *Brain* **126** 692–701
- Pelphrey K A, Mitchell T V, McKeown M J, Goldstein J, Allison T, McCarthy G, 2003 "Brain activity evoked by the perception of human walking: controlling for meaningful coherent motion" *Journal of Neuroscience* **23** 6819–6825
- Pelphrey K A, Morris J P, Michelich C R, Allison T, McCarthy G, 2005 "Functional anatomy of biological motion perception in posterior temporal cortex: an fMRI study of eye, mouth and hand movement" *Cerebral Cortex* **15** 1866–1876
- Peuskens H, Vanrie J, Verfaillie K, Orban G A, 2005 "Specificity of regions processing biological motion" *European Journal of Neuroscience* **21** 2864–2875
- Puce A, Perrett D, 2003 "Electrophysiology and brain imaging of biological motion" *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B* **358** 435–445
- Reed C, Stone V E, Bozova S, Tanaka J, 2003 "The body-inversion effect" *Psychological Science* **14** 302–308

-
- Rizzolatti G, Fadiga L, Matelli M, Bettinardi V, Paulesu E, Perani D, Fazio F, 1996 "Localisation of grasp representation in humans by PET: observation vs execution" *Experimental Brain Research* **111** 246–252
- Shiffrar M, Freyd J J, 1993 "Timing and apparent motion path choice with human body photographs" *Psychological Science* **4** 379–384
- Shipley T F, 2003 "The effect of object and event orientation on perception of biological motion" *Psychological Science* **14** 377–380
- Vaina L M, Gross C G, 2004 "Perceptual deficits in patients with impaired recognition of biological motion after temporal lobe lesions" *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* **101** 16947–16951
- Vallortigara G, Regolin L, Marconato F, 2005 "Visually inexperienced chicks exhibit spontaneous preference for biological motion patterns" *Public Library of Science Biology* **3** e208
- Verfaillie K, 1993 "Orientation-dependent priming effects in the perception of biological motion" *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* **19** 992–1013
- Verfaillie K, 2000 "Perceiving human locomotion: priming effects in direction discrimination" *Brain and Cognition* **44** 192–213
- Viviani P, Schneider R, 1991 "A developmental study of the relationship between geometry and kinematics in drawing movements" *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* **17** 198–298
- Viviani P, Stucchi N, 1989 "The effect of movement velocity on form perception: geometric illusions in dynamic displays" *Perception & Psychophysics* **46** 266–274
- Viviani P, Stucchi N, 1992 "Biological motion looks uniform: evidence of motor–perceptual interactions" *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* **18** 603–623
- Wheaton K J, Thompson J C, Syngienotis A, Abbott D F, Puce A, 2004 "Viewing the motion of human body parts activates different regions of premotor, temporal, and parietal cortex" *NeuroImage* **22** 277–288

This article is an advance online publication. It will not change in content under normal circumstances but will be given full volume, issue, and page numbers in the final PDF version, which will be made available shortly before production of the printed version.

Conditions of use. This article may be downloaded from the Perception website for personal research by members of subscribing organisations. Authors are entitled to distribute their own article (in printed form or by e-mail) to up to 50 people. This PDF may not be placed on any website (or other online distribution system) without permission of the publisher.

Visual perception of elliptic movements in 7- to -11- year-old
children: Influence of motor rules

Christel Bidet-Ildei, David Méary and Jean-Pierre Orliaguet

Laboratory of Psychology and Neurocognition CNRS, UMR 5105,

Université Pierre Mendès France

38040 Grenoble Cedex 9, France.

Phone: 00 33 (0)4 76 82 58 60

Fax: 00 33 (0)4 76 82 78 34

Corresponding author: Christel Bidet-Ildei. Email: christel.ildei@upmf-grenoble.fr

RESUME

Cette recherche porte sur la perception visuelle des mouvements humains chez l'enfant. Le but est de vérifier si le principe d'isochronie (tendance à maintenir le temps de mouvement constant quelle que soit son amplitude) que l'on observe sur le plan moteur est également présent sur le plan perceptif. On présentait sur un écran un point décrivant une trajectoire elliptique. La taille de l'ellipse variait de 2.94 à 53 cm. Des enfants âgés de 7 à 11 ans devaient ajuster selon leur préférence la vitesse (période) du mouvement. Les résultats montrent que la relation entre la période choisie et la taille de l'ellipse correspond à celle observée lors de la réalisation du mouvement (Viviani et Schneider, 1991) : dès 7 ans les ajustements perceptifs sont conformes au principe d'isochronie. Ces résultats permettent de discuter les liens motricité-perception.

Mots clés : perception visuelle, mouvement humain, principe d'isochronie, interactions visuo-motrices.

ABSTRACT

The aim of the present study is to analyse the visual perception of human movements in children. We evaluated whether the isochrony motor principle (that is the tendency to maintain constant the duration of movement across change of movement amplitude) is at work in a perceptive task. Children, aged 7 to 11 years, had to adjust the velocity (the period) of a dot depicting an elliptic motion. The size of the ellipse varied from 2.94 to 53 cm. Results showed that the relation between the chosen period and the size of the ellipse corresponded to that observed in motor production (Viviani & Schneider, 1991) : From 7-year-old perceptual adjustments were in agreement with the isochrony principle. The results are discussed in terms of motor-perception relationships.

Key words: visual perception, human movement, isochrony principle, motor-perceptual interactions

INTRODUCTION

The human visual system is extremely sensitive to human motion. In the past, several studies showed that, even when movement is represented by a simplified point-light display, observers can discriminate human body movements from moving objects (Bingham, Schmidt, & Rosenblum, 1995). They identify actions such as walking or dancing (Johansson, 1973, 1975), the gender and the identity of a person (Cutting & Kozlowski, 1977; Kozlowski & Cutting, 1977) and even the properties of handled objects such as the weight of a lifted object (Runeson & Frykholm, 1981, 1983). Other results showed that when subjects have to visually evaluate the velocity of human movements (i.e., pointing movement, handwriting, drawing an ellipse) they prefer those that conformed to motor laws (Meary, Chary, Palluel-Germain, & Orliaguet, 2005; Viviani & Stucchi, 1989). For example when a subject is asked to adjust the velocity of a reaching movement, a writing movement or an elliptic movement, he/she tends to choose durations of movement which are respectively in line with the Fitts' Law, the isochrony principle and the two-third power law. To explain this high sensibility to human movement, it has been suggested that visual identification of human movement could be not only based on visual experience but also on motor experience (i.e., Jeannerod, 2001; Jeannerod & Frak, 1999). In others words the recognition of human movements would be the result of motor-perceptual interactions. Several results are in accord with this view. Observers better recognise point-light displays representing their own movement than movements of their friends (Beardsworth & Buckner, 1981; Loula, Prasad, Harber, & Shiffrar, 2005). Patients with motor deficits often have difficulties to recognise human movements as this is the case for dysgraphic (Chary et al., 2004) and apraxic (Heilman, Rothi, & Valenstein, 1982) patients. Finally, neuroimaging studies show that both observation and execution of movements activate common brain regions (Hari et al., 1998; Peuskens, Vanrie, Verfaillie, & Orban, 2005; Saygin, Wilson, Hagler, Bates, & Sereno, 2004).

Some developmental studies also indicate that the motor competence of the observer could be involved, at least in part, in the visual perception of human movements. For example, children with articulatory disorders (i.e., d/b confusion) have more difficulties in lips reading than children without such motor difficulties (Desjardins, Rogers, & Werker, 1997). In the same way, reading deficits is often associated with motor disorders

(Felmingham & Jakobson, 1995). Finally, an experiment carried out by Louis-Dam, Kandel and Orliaguet (2000) showed that in children the ability to visually anticipate the forthcoming movement in a motor sequence is directly influenced by their level of motor competence.

In this theoretical context, the aim of the present research is to bring additional evidence that, in children, visual perception of human movement is influenced by motor rules. To this end, 7 to 11 year-old children were asked to evaluate and to adjust the velocity of a dot depicting an elliptic movement. In motor production, Viviani and Schneider (1991) showed that from 7 years, the duration of elliptic movements conforms to the isochrony principle: the duration of the movement tended to be constant irrespective of the perimeter of the ellipse. If, as showed by former studies that visual perception of human movement tends to conform to motor rules, the visual evaluation of time movement will also tend to conform to the isochrony principle from 7 years of age.

METHOD

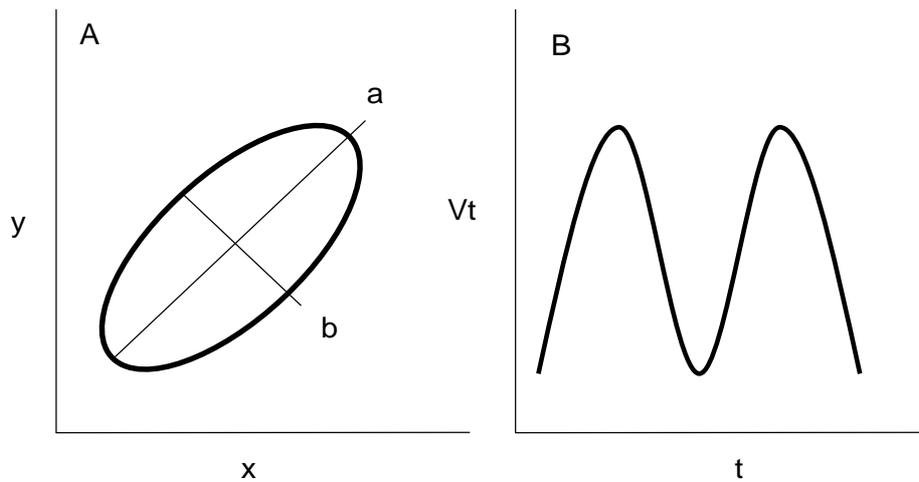
Participants

Forty-five children participated in the experiment. They were divided into 3 age groups of 15 children each: 7 years (mean age 6 years 11 months), 9 years (mean age 8 years 9 months) and 11 years (mean age 10 years 9 months). A group of 15 adults, students at the university, was used as control. All subjects were right-handed and had normal or corrected to normal vision.

Stimuli

The visual stimuli consisted of 6 elliptic movements. The perimeter of the ellipse was respectively 2.94, 5.25, 9.36, 16.69, 29.74 or 53 cm long. The semi axis ratio b/a (0.425) and the eccentricity of the ellipse \sum (0.9) were constant whatever the perimeter of the ellipse (see figure 1). The major semi axis of the ellipse a was rotated by 45 degrees counter-clockwise. A software permitted to modify the trajectory perimeter (P_e) or the movement period (P). For all period values, the velocity profile of the movement respected the two-third power law (covariation velocity-curvature) observed in the production of movement (Lacquaniti, Terzuolo, & Viviani, 1983).

Figure 19: Kinematic characteristics of the stimulus. A) Form of the elliptic trajectory. B) Velocity profile for one period (one cycle) with V_t corresponding to the tangential velocity and t to the movement time.

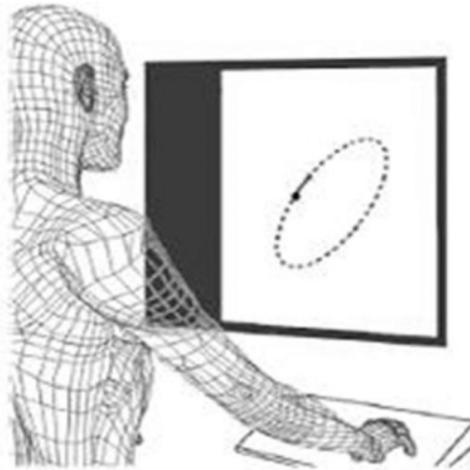


Procedure

Participants seated at a distance of 50 cm from a computer screen (17', resolution 1024*768 pixels, sampling rate 85 Hz) in a dimly illuminated room (see figure 2). Each trial consisted in the presentation of a black spot ($\varnothing = 0.4$ cm) depicting an elliptic movement on a white background area (22*22 cm). Participants were asked to adjust the period of movement (that is to find their "preferred velocity") by pressing the arrows (\leftarrow or \rightarrow) of the keyboard. The adjustments allowed increasing or decreasing of the duration of the period by step of 25 ms.

The experiment was run in a single session including 6 blocks of trials. Each block comprised 6 trials corresponding to each perimeter of the ellipse. Therefore each subject performed 36 trials. The order of presentation of blocks and trials, and the initial period value of each trial (P_i) were randomized. Short periods of rest separated each block of trial.

Figure 20: Experimental set up. Subject was in front of a screen. A dot depicted an elliptic trajectory. The task consisted in adjusting the velocity by using the arrows of the keyboard.

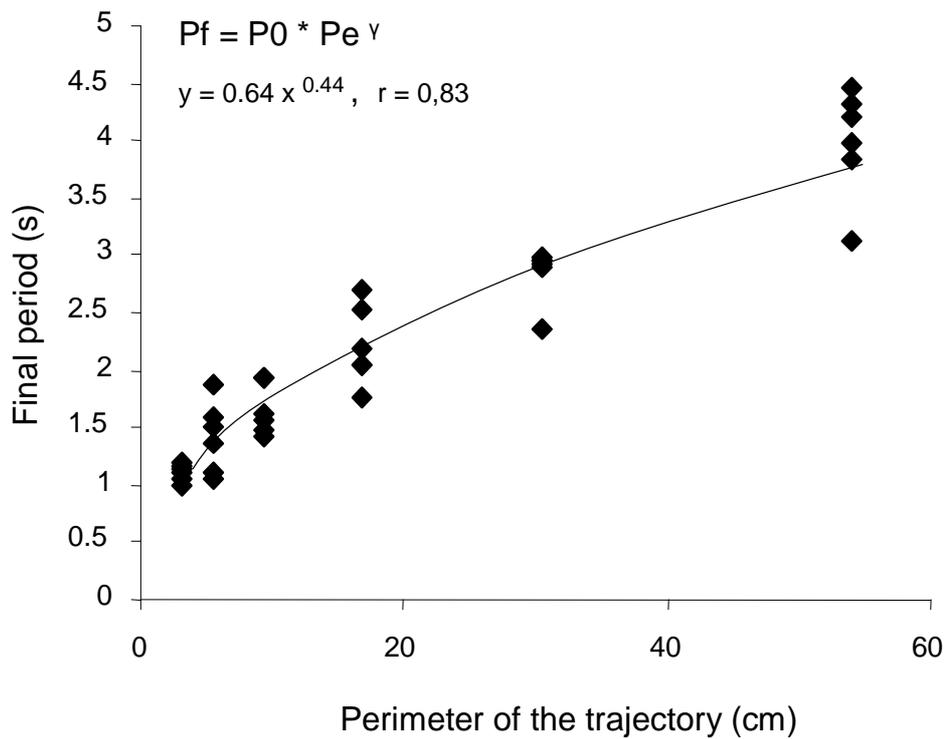


III.1.1.2

Data analysis

The results were analysed by using the same formalisation and the same procedure than those used in Viviani & Schneider's experiment (1991). The relation between the perimeter of the ellipse (P_e) and the final period (P_f) chosen by the participants was formalised by the power function $P_f = P_0 * P_e^\gamma$ where γ represents the exponent of the function and P_0 a baseline period which depends of each subject (see figure 3). Then, we evaluated for each subject the coherence of the results, the degree of isochrony and the movement speed by measuring the correlation coefficient (r), the exponent (γ) and the baseline period (P_0) according to age.

Figure 3: Example of the power approximation $P_f = P_0 * P_e^\gamma$ for one participant chosen randomly in the adult group.

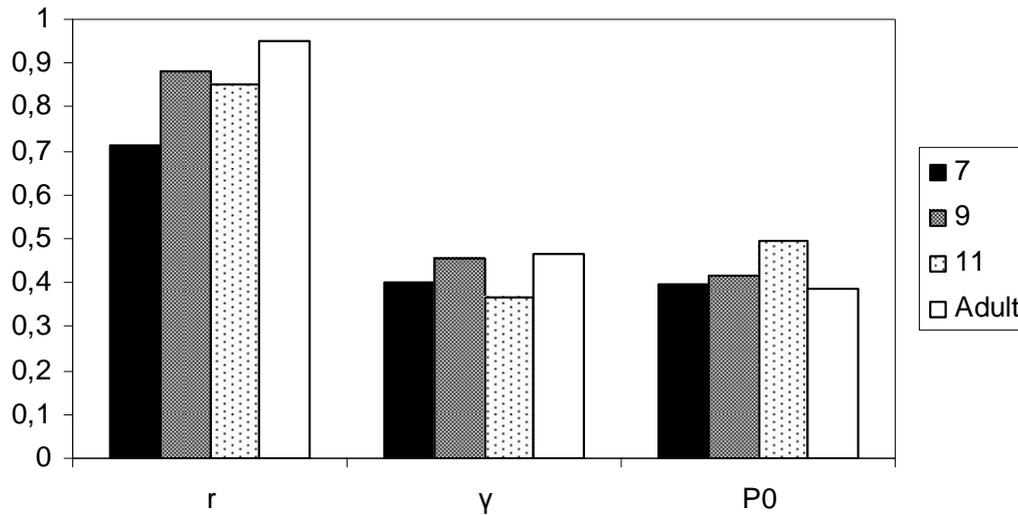


RESULTS

The mean of the correlation coefficient, of the exponent, and of the baseline period were calculated and statistically evaluated with an ANOVA with age as between factor.

Because the correlation coefficients and the baseline period ($P0$) did not follow a normal distribution, data has been transformed. For the coefficients of correlation we used the Fisher hyperbolic tangent transform (Kendall & Stuart, 1979) and the baseline period was analysed by using the logarithm of $P0$. Results obtained in children and in adults were analysed separately.

Figure 4: Mean of the correlation coefficients (r), of the exponents (γ) and the baseline periods ($P0$) as a function of age.



Correlation coefficient (r): the statistical analysis revealed a significant effect of age [F (2,42) = 6.09, $p < 0.01$]. We observed an increase of r value between 7 (0.71) and 9 years (0.88), a stabilisation between 9 and 11 years (0.85) and again an increase between 11 year-old children and adults (0.95) [t (28) = 3.67, $p < 0.01$]. This result indicates that the within variability is higher at 7 years and tends to decrease with age. However, it should be noted that whatever the age, the values of the coefficient correlations are very high. This result shows that the link between the final period and the perimeter of the ellipse is well approximated by the power function.

Exponent (γ): there was no effect of age [F (2,42) = 1.54, $p = 0.22$]. It is noteworthy that the mean value of γ (0.41 ± 0.14) is not different from the value (0.44) obtained by Viviani and Schneider (1991) in the motor task [t (44) = 1.61, $p = 0.11$]. In addition, we did not observe any significant difference between children (0.41 ± 0.14) and adults (0.46 ± 0.19) [t (58) = 0.98, $p = 0.33$].

Baseline period (P0): age has no effect on the performances [F (2,42) = 0.40, $p = 0.67$]. Whatever the age, the mean baseline period was 0.43 s and no significant difference was observed between children (0.42 ± 0.29) and adults (0.37 ± 0.20) [t (58) = 0.73, $p = 0.46$].

DISCUSSION

The purpose of this experiment was to know if the visual perception of human movements was influenced by the rules of motor production. Our results showed a very high similarity between the performances observed in the visual perception of elliptic movements and those obtained by Viviani & Schneider in the motor production of ellipses (1991). Indeed the exponents of the power function which defines the relation between perimeter and time movement (the final period chosen by the subject) are not different in the perceptive (0.41) and motor tasks (0.44). Therefore these findings indicate that in children, from 7 year-old, the isochrony principle is observable both in production and in perception. Though the perimeter was multiplied by 18 (2.53 to 53 cm), the final period chosen by the participant was only multiplied by 3 (930 to 2606 ms). Therefore, these findings demonstrate that a similar principle determines motor and perceptual performances and suggest that the perceptual abilities of children may depend on their level of motor development.

Such similarities between perceptual and motor behaviours may be interpreted within the motor simulation theory (Jeannerod, 2001). According to this theory, the motor system is considered at a covert stage as a simulation system that is activated in self-intended action and also in the recognition of others' action. At this covert stage, action is not executed but the way to reach the goal and the consequences of the action on both the organism and the external world are simulated. Therefore it can be hypothesised that when perceiving a movement, children based their decision on an internalized simulation of the ellipse movement that leads to prefer stimuli that share common kinematic properties with their own motor productions, that is those which conform to the isochrony principle. This assumption is in accordance with clinical observations showing the role of motor competence in the visual perception of human movement (i.e., Chary et al., 2004) and with neuroimaging studies showing the activation of neuronal motor structures during the visual perception of human movements (Chaminade, Meary, Orliaguet, & Decety, 2001; Decety et al., 1997; Hari et al., 1998; Nishitani & Hari, 2000; Rizzolatti et al., 1996).

Though, the numerous evidences for a connection between perception and action, few authors consider that the visual perception of dynamic events could be determined by general invariants which have emerged from evolution of species and which would be present from the beginning of the development, that is long before the emergence of motor competences (Shepard & Zare, 1983; Vallortigara, Regolin, & Marconato, 2005). This

hypothesis is supported by some results obtained in infants and in patients with impaired motor functions. Fox and McDaniel (1982) demonstrated that 8 week-old infants exhibit a preference for a point-light walker over the same configuration inverted 180 degrees. Moreover it has been showed that by 3-5 months of age, infants discriminate a point-light walker from displays with perturbed local rigidity (Bertenthal, Proffitt, & Kramer, 1987) or with scrambled spatial relations between the dots (Bertenthal, Proffitt, & Cutting, 1984). In addition Pavlova and her colleagues (2003) have shown that adolescents with congenitally impaired locomotion can exhibit high sensitivity to a point-light walker. Therefore these results show that motor competences are not necessary to perceive and recognize human movements.

Animal studies point to a similar conclusion by suggesting that the perception of biological movement could be an intrinsic capacity of the vertebrate visual system. For example, Vallortigara et al (2005) reported that chicks, hatched and reared in darkness, exhibit a preference to biological movements from the first presentation of the stimuli after birth. They tend to prefer the biological movement of a hen than a rigid or random motion. It is noteworthy that a similar behaviour is observed when the stimuli represent the movement of a cat. This latter result suggests that the preference for biological motion in newborn chick is not species-specific and therefore does not depend on motor ability.

Taken together these results suggest that the isochrony principle observed in visual perception could be explained either by an activation of the motor system or by a genetic predisposition. Our experiment carried out in 7-to-11-year-old children does not permit to conclude, though it seems hardly plausible that all the motor rules are available at birth. It however demonstrates that in children visual perception of an elliptic movement is directly influenced by some intrinsic properties of the motor system, i.e., the isochrony principle.

REFERENCES

- Beardsworth, T., & Buckner, T. (1981). The ability to recognize oneself from a video recording of one's movements without seeing one's body. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 8, 19-22.
- Bertenthal, B. I., Proffitt, D. R., & Cutting, J. E. (1984). Infant sensitivity to figural coherence in biomechanical motions. *Journal of Experimental Child Psychology*, 37(2), 213-230.
- Bertenthal, B. I., Proffitt, D. R., & Kramer, S. J. (1987). Perception of biomechanical motions by infants: implementation of various processing constraints. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13(4), 577-585.
- Bingham, G. P., Schmidt, R. C., & Rosenblum, L. D. (1995). Dynamics and the orientation of kinematic forms in visual event recognition. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(6), 1473-1493.
- Chaminade, T., Meary, D., Orliaguet, J. P., & Decety, J. (2001). Is perceptual anticipation a motor simulation? A PET study. *Neuroreport*, 12(17), 3669-3674.
- Chary, C., Meary, D., Orliaguet, J. P., David, D., Moreaud, O., & Kandel, S. (2004). Influence of motor disorders on the visual perception of human movements in a case of peripheral dysgraphia. *Neurocase*, 10(3), 223-232.
- Cutting, J. E., & Kozlowski, L. (1977). Recognizing friends by their walk: Gait perception without familiarity cues. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 9, 353-356.
- Decety, J., Grezes, J., Costes, N., Perani, D., Jeannerod, M., Procyk, E., et al. (1997). Brain activity during observation of actions. Influence of action content and subject's strategy. *Brain*, 120(Pt 10), 1763-1777.
- Desjardins, R. N., Rogers, J., & Werker, J. F. (1997). An exploration of why preschoolers perform differently than do adults in audiovisual speech perception tasks. *Journal of Experimental Child Psychology*, 66(1), 85-110.
- Felmingham, K. L., & Jakobson, L. S. (1995). Visual and visuomotor performance in dyslexic children. *Experimental Brain Research*, 106(3), 467-474.
- Fox, R., & McDaniel, C. (1982). The perception of biological motion by human infants. *Science*, 218(4571), 486-487.

Hari, R., Forss, N., Avikainen, S., Kirveskari, E., Salenius, S., & Rizzolatti, G. (1998). Activation of human primary motor cortex during action observation: a neuromagnetic study. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 95(25), 15061-15065.

Heilman, K. M., Rothi, L. J., & Valenstein, E. (1982). Two forms of ideomotor apraxia. *Neurology*, 32(4), 342-346.

Jeannerod, M. (2001). Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition. *Neuroimage*, 14(1 Pt 2), S103-109.

Jeannerod, M., & Frak, V. (1999). Mental imaging of motor activity in humans. *Current Opinion in Neurobiology*, 9(6), 735-739.

Johansson, G. (1973). Visual perception of biological motion and a model for its analysis. *Perception & Psychophysics*, 14, 201-211.

Johansson, G. (1975). Visual motion perception. *Scientific American*, 232(6), 76-88.

Kendall, M., & Stuart, A. (1979). *The advanced theory of statistics (Vol. 2)*. London: Charles Griffin.

Kozlowski, L., & Cutting, J. E. (1977). Recognizing the sex of a walker from dynamic point-light displays. *Perception & Psychophysics*, 21, 575-580.

Lacquaniti, F., Terzuolo, C., & Viviani, P. (1983). The law relating the kinematic and figural aspects of drawing movements. *Acta Psychologica (Amst)*, 54(1-3), 115-130.

Louis-Dam, A., Kandel, S., & Orliaguet, J.-P. (2000). Anticipation motrice et anticipation perceptive. *Psychologie Française*, 45, 333-342.

Loula, F., Prasad, S., Harber, K., & Shiffrar, M. (2005). Recognizing people from their movement. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31(1), 210-220.

Meary, D., Chary, C., Palluel-Germain, R., & Orliaguet, J. P. (2005). Visual perception of writing and pointing movements. *Perception*, 34(9), 1061-1067.

Nishitani, N., & Hari, R. (2000). Temporal dynamics of cortical representation for action. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97(2), 913-918.

Pavlova, M., Staudt, M., Sokolov, A., Birbaumer, N., & Krageloh-Mann, I. (2003). Perception and production of biological movement in patients with early periventricular brain lesions. *Brain*, 126(Pt 3), 692-701.

Peuskens, H., Vanrie, J., Verfaillie, K., & Orban, G. A. (2005). Specificity of regions processing biological motion. *European Journal of Neuroscience*, 21(10), 2864-2875.

Rizzolatti, G., Fadiga, L., Matelli, M., Bettinardi, V., Paulesu, E., Perani, D., et al. (1996). Localization of grasp representations in humans by PET: 1. Observation versus execution. *Experimental Brain Research*, 111(2), 246-252.

Runeson, S., & Frykholm, G. (1981). Visual perception of lifted weight. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 7(4), 733-740.

Runeson, S., & Frykholm, G. (1983). Kinematic specification of dynamics as an informational basis for person and action perception: Expectation, gender recognition, and deceptive intention. *Journal of Experimental Psychology: General*, 112, 585-615.

Saygin, A. P., Wilson, S. M., Hagler, D. J., Jr., Bates, E., & Sereno, M. I. (2004). Point-light biological motion perception activates human premotor cortex. *Journal of Neuroscience*, 24(27), 6181-6188.

Shepard, R. N., & Zare, S. L. (1983). Path-guided apparent motion. *Science*, 220(4597), 632-634.

Vallortigara, G., Regolin, L., & Marconato, F. (2005). Visually inexperienced chicks exhibit spontaneous preference for biological motion patterns. *PLoS Biology*, 3(7), e208.

Viviani, P., & Schneider, R. (1991). A developmental study of the relationship between geometry and kinematics in drawing movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 17(1), 198-218.

Viviani, P., & Stucchi, N. (1989). The effect of movement velocity on form perception: geometric illusions in dynamic displays. *Perception & Psychophysics*, 46(3), 266-274.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

<i>Figure 1: Représentation schématique des stimuli présentés par Shiffrar & Freyd (1990), emprunté à Viviani (1998).</i>	13
<i>Figure 2: Configurations utilisées (a et c) et chemins possibles (b et d) dans la tâche de Stevens et al. (2000).</i> ...	26
<i>Figure 3: Caractéristiques géométriques et profils de vitesse des stimuli.</i>	45
<i>Figure 4: Dispositif expérimental.</i>	46
<i>Figure 5 : Exemple de la méthode d'analyse utilisée pour un sujet.</i>	48
<i>Figure 6: Caractéristiques géométriques et cinématiques des stimuli.</i>	55
<i>Figure 7: Dispositif expérimental.</i>	56
<i>Figure 8: Exemple pour un sujet de la régression linéaire effectuée entre les indices de difficulté et la durée de mouvement préférée.</i>	57
<i>Figure 9: Caractéristiques et profil de vitesse des stimuli dans la condition écriture (A) et dans la condition pointage (B).</i>	62
<i>Figure 10: Dispositif expérimental.</i>	64
<i>Figure 11: Médiane des durées de mouvement jugées comme "trop lente" (TL), "trop rapide" (TR) et « ni trop lente ni trop rapide » (NLNR)</i>	65
<i>Figure 12: Durée de mouvement moyenne pour les vitesses considérées comme "ni trop lente ni trop rapide" ..</i>	67
<i>Figure 13: Forme (A) et allure du profil de vitesse (B) du utilisé comme stimulus.</i>	74
<i>Figure 14 : Dispositif expérimental.</i>	75
<i>Figure 15: Exemple pour un sujet de la méthode d'analyse utilisée pour les tâches de production (A) et de perception visuelle (B).</i>	77
<i>Figure 16: Organisation des noyaux gris centraux d'après Albin et al. 1989 (Albin, Young, & Penney, 1989).</i> ...	84
<i>Figure 17: Forme (A) et profil de vitesse tangentielle (B) de l'ellipse.</i>	88
<i>Figure 18 : Dispositif expérimental.</i>	89

<i>Tableau 1: Valeurs moyennes du coefficient de corrélation, de l'exposant et de la période de référence dans chaque condition.</i>	49
<i>Tableau 2 : Valeurs moyennes du coefficient de corrélation (r), de la pente et de l'ordonnée à l'origine dans chaque condition (naturelle et constante).</i>	57
<i>Tableau 3: Moyenne des paramètres pour chaque condition et chaque type de mouvement.</i>	68
<i>Tableau 4: Moyenne des coefficients de corrélation (r), des exposants (γ) et des temps de référence (T0 et P0) en fonction de l'âge (6, 8 et 10 ans) et de la tâche (production, perception).</i>	78
<i>Tableau 5: Moyenne des coefficients de corrélation (r), des exposants (γ) et des périodes de référence (T0, P0) pour les sujets contrôle et les sujets parkinsoniens en fonction de la session (1-2-3-4) et de la tâche (perception, production).</i>	92

RESUME

Cette thèse est consacrée à l'étude du rôle de la motricité dans la perception visuelle des mouvements humains. L'objectif est de montrer que les correspondances entre les performances motrices et les jugements perceptifs, contrairement à ce qui est postulé par les théories motrices de la perception, ne sont pas forcément dues à l'intervention du système moteur. Pour cela nous avons analysé d'une part les jugements perceptifs pour des stimuli dont la cinématique ne respecte plus les règles de production motrices et d'autre part les liens existant entre les capacités motrices et perceptives chez des populations présentant un niveau de développement moteur variable (enfants, patients atteints de la maladie de Parkinson). Ces travaux ont concerné uniquement les relations espace-temps telles qu'elles s'expriment dans les mouvements morphocinétiques (principe d'isochronie) et topocinétiques (loi de Fitts). Les résultats indiquent que la modification de la cinématique des mouvements n'empêche pas le respect des règles motrices lors du jugement perceptif de mouvements d'ellipse ou de pointage de cible. Par contre, une perturbation très importante de la cinématique entraîne une modification du jugement des mouvements d'écriture. D'autre part, on observe des décalages entre les compétences motrices et les compétences perceptives chez les enfants et les patients parkinsoniens. Ces résultats suggèrent que la perception visuelle des mouvements humains n'implique pas systématiquement une intervention du système moteur. On constate en particulier que le type de mouvement (écriture vs mouvement d'atteinte de cible) et les propriétés des objets manipulés (verre vs cylindre) ont un effet très important sur le degré d'intervention du système moteur lors du jugement visuel de mouvements humains.

Mots clefs : Perception visuelle des mouvements humains, préférences perceptives, relation motricité-perception, écriture, mouvement elliptique, mouvement d'atteinte de cibles, mouvements non naturels, enfant, maladie de Parkinson.

This dissertation aims at analysing the role of motor-perceptual interactions in the visual perception of human movements. Most of studies showed that recognition of human movements was influenced by motor competences and then validated the motor theories of perception. The aim of our research was to demonstrate that visual perception of human movement does not necessarily depend on motor abilities and does not imply motor-perceptual interactions. The experiments consisted in analysing 1) the visual preferences for human movements which does not conform to the motor rules (unnatural movements) and 2) the influence of the level of motor competences on visual performances, in children and in patients presenting motor impairments (Parkinson's disease). Researches only focused on space-time relations which were observed in the morphocinetic (isochrony principle) and topocinetic (Fitts' law) movements. The results indicate that the violation of the kinematics does not influence the visual judgement of elliptic or reaching movements. However, a significant disturbance of velocity profile modifies the visual preference in handwriting. In addition, we observed that the visual performances of children and those of patients with a Parkinson's disease are not totally dependent of motor competence. Taken together, the findings suggest that the motor system is not systematically involved in the visual perception of human movements. Particularly, the type of the movement (handwriting vs reaching movement) or the properties of the handled object (glass vs cylinder) has an influence on the implication of the motor system in visual judgements of human motions.

Key words: Visual perception of human movements, perceptual preferences, motor-perceptual interaction, handwriting, elliptic movement, reaching movement, unnatural movements, child, Parkinson's disease.

