



HAL
open science

Perception spatiale et compétences motrice : approche développement et neuropsychologique

Aurélien Richez

► **To cite this version:**

Aurélien Richez. Perception spatiale et compétences motrice : approche développement et neuropsychologique. Psychologie. Université Charles de Gaulle - Lille III, 2014. Français. NNT : 2014LIL30054 . tel-01176959

HAL Id: tel-01176959

<https://theses.hal.science/tel-01176959>

Submitted on 16 Jul 2015

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 Charles-de-Gaule, Lille 3

École Doctorale Science de l'Homme et de la Société (USR 3185)

Unité de Recherche en Sciences Cognitives et Affectives (URECA - EA 1059)

<p>PERCEPTION SPATIALE ET COMPÉTENCES MOTRICES : APPROCHE DÉVELOPPEMENTALE</p>

**Thèse présentée en vue d'obtenir le grade de
Docteur de l'université Université Charles-de-Gaule, Lille 3
discipline: Psychologie**

soutenue par: Aurélien RICHEZ

Sous la direction de

Yann COELLO

Composition du jury

Pr Michèle MOLINA	Université de Caen Basse-Normandie	Rapporteur
Dr CNRS Christine ASSAIANTE	Aix-Marseille Université	Rapporteur
Dr Richard PALLUEL-GERMAIN	Université Pierre Mendès-France, Grenoble	Examineur
CR CNRS Solène Kalenine	Université Charles-de-Gaule, Lille 3	Examineur
Pr Yann COELLO	Université Charles-de-Gaule, Lille 3	Directeur

REMERCIEMENTS

Merci à mon directeur Yann Coello de m'avoir permis de faire ce travail de thèse.

Merci à Christine Assaiante, Michèle Molina, Solène Kanlenine et Richard Palluel-Germain, rapporteurs et membre du jury, d'avoir pris le temps de s'intéresser à ce travail afin de l'évaluer. Merci également à Gérard Olivier.

Merci aux institutions (la région Nord-Pas-de-Calais, la Maison Européenne des Sciences Humaines et Sociales - MESHs-, le laboratoire URECA, l'UFR de psychologie et l'université Charles de Gaulle Lille 3, qui m'ont permis d'être financé en tant que moniteur-allocataire puis ATER.

Merci aux écoles ayant accepté de participer aux différentes études pour leur accueil, leur intérêt, et le libre accès à la cafetière pendant ces journées de passation.

Merci à tous les membres, nomades ou sédentaires du laboratoire, titulaires, étudiants, doctorants et post-doctorants pour les conseils, le soutien et ces 5 années passées à l'URECA en leur compagnie. Merci aussi aux membres de l'UFR de psychologie de Nice, pour les mêmes raisons. En vrac et de manière non exhaustive merci à : Emmanuelle Fournier, Séverine Casalis, Laurent Sparrow, Yvonne Delevoye-Turrell, Angèle Brunelière, Jean-Louis Nandrino, Pierre Théroüane, Isabelle Millabet, Sylvane Faure, et aussi à Jérémy, Guillaume, Daniel, Xavier, Ewa (voisine!), Karinne, Lucie, Eve, Laurent, Nora, Pauline, Marion, Céline, Antoine, Christelle, Ophélie, Nelly, Orianne, François (et tous les autres...)

Merci à mes relecteurs, infatigables traqueurs d'incohérences grammaticales et de fautes d'orthographe.

Merci à mes amis, juste pour être là: Alex, Jérôme, Patrice, Olivier, Pierre, Maryne, Elise, Audrey, Phillippe, Patrick, Arnaud, Greg, Lucie, Lorraine, Bob ("vieux branché"), Mandine, et Edwige pour ceux qui n'ont pas trouvé leur place avant, et bien sûr tous les autres qui ne sont pas cités ici.

Merci à ma famille, mes parents, mes frères et sœurs et mes 4 adorables petits neveux.

Merci à Franck Herbert, Stephen Hawking, Isaac Asimov, Donal Hebb, (sir) Terry Pratchett, Douglas Adams, Carl Barks et Don Rosa, Jean-philippe Jaworsky, Akira Kurosawa, Fritz Lang, Terry Gilliam, Godfrey Ho, Denis Gerfaud, John Tolkien, Jean Giraud et Pierre Dubois (parmi tant d'autres), pour m'avoir accompagné, émerveillé, surpris, fait rire et réfléchir et surtout m'avoir appris à me poser des questions, ne plus m'en faire et aimer ça.

I must not fear.

Fear is the mind-killer.

Fear is the little-death that brings total obliteration.

I will face my fear. I will permit it to pass over me and through me.

And when it has gone past I will turn the inner eye to see its path.

Where the fear has gone there will be nothing. Only I will remain.

Frank Herbert, Litanie contre la peur Bene Gesserit

I love deadlines. I like the whooshing sound they make as they fly by.

Douglas Adams

Nothing shocks me. I'm a scientist.

Henry "Indy" Jones Jr

Gods does not play dice with the univers. He plays an ineffable game of his own devising, which might be compared, from the perspective of any of the other players, to being involved in an obscure and complex version of poker in a pitch dark room, with blank cards, for infinite stakes, with a dealer who won't tell you the rules, and who smiles all the time.

Terry Pratchett, Small Gods.

Résumé

Les théories qui modélisent la perception spatiale chez l'adulte s'accordent à postuler l'existence de liens forts entre la perception et l'action (James, 1892 ; Poincaré, 1902 ; Gibson, 1979 ; Noe, 2004). Une vaste collection de données montre également que ces liens sont présents dans le développement ontogénétique. Ce travail de thèse vise à examiner les implications de tels liens dans le développement de la perception spatiale et d'en identifier les déterminants chez l'enfant. Nous avons mené une série d'expériences, basée sur l'utilisation des paradigmes d'atteignabilité et d'amorçage visuomoteur, autour de la problématique de l'élaboration et l'utilisation des représentations perceptives et sensorimotrices dans la perception spatiale. Nous avons mené ces expériences chez une population d'adultes et d'enfants âgées de 7 à 13 ans avec l'objectif d'évaluer la trajectoire développementale de la perception spatiale. Les résultats obtenus mettent en évidence des discontinuités dans les trajectoires développementales des différentes tâches proposées. Nous avons mis en évidence les marqueurs de ces changements développementaux dans les performances des tâches d'atteignabilité, d'imagerie motrice et également d'amorçage visuomoteur. Nous interprétons ces résultats comme relevant d'un changement qualitatif de la perception spatiale durant cette période. D'une manière générale, les travaux présentés dans cette thèse apportent des données nouvelles sur le développement de la perception spatiale chez l'enfant, et sont mis en relation avec la littérature en psychologie et en neurosciences du développement.

Liste des publications associées à la thèse

Articles

Représentations de l'espace péripersonnel chez les enfants de 7 à 14 ans. Richez & Coello. *Psychologie Française, en révision.*

Relations entre perception des limites de l'espace d'action et imagerie motrice chez l'enfant. Richez & Coello. *En préparation.*

Distance effect on action selection and execution in a Stimulus-Response-Compatibility task. Richez, Ott, Coutté, Olivier & Coello. *En préparation*

Independent influences of manual and amplitude compatibility effects during a perceptual decision task. Coutté, Richez, Coello & Olivier. *Vision cognition, Soumis.*

Stimulus-Response-Compatibility, effect of irrelevant perceived distance: a developmental study. Richez, Olivier & Coello, *en préparation.*

Communications affichées

Covert actions and the perceived boundaries of peripersonal space in children. Richez & Coello. *Présenté au European Congress on Visual Perception (ECVP) 2010, Lausanne.*

Catégorisation spatiale et simulation mentale de l'action chez l'enfant. Richez & Coello. *Présenté au congrès de la Société Française de Psychologie (SFP) 2010, Lille.*

Spatial perception and motor skills in children. Richez & Coello. *Présenté au European Congress on Visual Perception (ECVP) 2011, Toulouse.*

Représentation spatiale chez l'enfant. Richez & Coello. *Présenté au congrès de la Société Française de Psychologie (SFP) 2011, Metz.*

Objects afford kinematic properties of potential action. Richez, Coello & Olivier. *Présenté au European Congress on Visual Perception (ECVP) 2012, Alghero.*

Compatibilité stimulus-réponse de la distance perçue: une étude développementale. Richez & Coello. *Présenté au congrès de la Société Française de Psychologie (SFP) 2012, Lyon.*

Communications orales

La catégorisation spatiale chez l'enfant. Richez & Coello. *Présenté au congrès de la Société Française de Psychologie (SFP) 2010, Lille.*

Spatial perception and Motor skills in children. Richez & Coello. *Présenté à l'Iberian Conference of Perception, Palma de Majorque.*

Motor Imagery and scaling of the peripersonal space in children. Richez & Coello. *Présenté au congrès de la Société Canadienne d'Apprentissage Psychomoteur et de Psychologie du Sport, Winnipeg.*

Amorçage visuomoteur d'un geste d'atteinte dans l'espace péripersonnel. *Présenté à la 7e Journée Scientifique des Jeunes Chercheurs en Psychologie (JSJCP7), Lille.*

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	i
Résumé	ii
Liste des publications	iv
Table des matières	1
Partie 1 : Introduction théorique	3
Préambule	3
I. Cadre théorique général : L'apport des neurosciences développementales	8
I. 1. Principes et définition	8
I. 2. Mécanismes développementaux	11
I. 3. Le modèle des compétences dynamiques	14
II. Ontogenèse de la perception spatiale	25
II. 1. Formulation classique du problème : la question de Molyneux	25
II. 2. Espace perçu, espace incarné, espace représenté	27
II. 2. 1. Schéma corporel	27
II. 2. 2. Différents modèles de ségrégation de l'espace	33
II. 2. 3. Les travaux de Previc	36
II. 3. La perception de l'espace péripersonnel	40
II. 3. 1. Aspects comportementaux	40
II. 3.2. Aspects neurophysiologiques	48
II. 3.3. Aspects développementaux	51
III. Discontinuités et synchronies développementales du système visuomoteur	56
III. 1. Aspects visuomoteurs	56
III. 1.1. Le développement du système visuel	56
III. 1.2. Le développement du système moteur	60
III. 1.3. Développement de l'intégration sensorielle	67
III. 1.4. La représentation de l'action	70
III. 2. La compatibilité stimulus-réponse	81
III. 3. Définition de la période d'intérêt	85

Partie 2 : Partie expérimentale	87
IV. Études expérimentales	87
IV. 1. Présentation	87
IV. 1.1. Plan de recherche et objectifs des expériences	87
IV. 1.2. Précisions méthodologiques	88
IV. 2. Étude 1 : Représentations de l'espace péripersonnel chez les enfants de 7 à 14 ans	90
IV. 3. Etude 2 : Relation entre perception des limites de l'espace d'action et imagerie motrice chez l'enfant	111
IV. 4. Étude 3 et 4: Exploration des liens perception-action au travers des liens de compatibilité stimulus-réponse, l'effet d'une localisation spatiale non pertinente	144
IV. 4. 1. Étude 3 : Effet de Compatibilité Stimulus Réponse de la distance sur la sélection et l'exécution des réponses.	144
IV. 4. 2. Étude 4 : Effets de compatibilités manuelle et d'amplitude dans une tâche de décision perceptive	174
IV. 5. Étude 5: Compatibilité Stimulus Réponse, effet de la distance perçue: étude développementale.	188
IV. 6. Perspective de recherche: Protocole de recherche clinique Compétence motrice et développement ontogénétique (COMODO)	209
IV. 5. 1. Objectifs du projet	209
IV. 5. 2. Descriptif du projet	210
Partie 3 : Conclusion	212
V. Discussion	212
V. 1. Résumé des principaux résultats obtenus	212
V. 2. Le jugement d'atteignabilité	214
V. 2.1. Mise en évidence d'une trajectoire développementale	214
V. 2.2. Évolution de la perception de l'espace péripersonnel	218
V. 3. Les représentations motrices	220
V. 3.1. Le codage spatial des objets et des actions	220
V. 3.2. L'imagerie motrice	223
V. 4. Intégration des résultats avec le modèle des compétences dynamiques	224
Partie 4 : Références bibliographiques	233
Partie 5 : Annexe	250
Annexe A: dossier du comité éthique interne au laboratoire URECA pour le protocole COMODO.	250

Partie 1 : Introduction théorique

Préambule

Dès l'antiquité l'étude de la fonction perceptive a été considérée comme d'une importance prédominante dans la compréhension des rapports qu'entretiennent les organismes vivants avec leur environnement, ainsi que dans l'acquisition de la connaissance et la représentation du monde (Aristote, in *Περὶ Ψυχῆς / Peri psychès, "L'âme"*). Comprendre comment le corps humain et le cerveau reçoivent et traitent les informations en provenance de l'environnement permet d'ouvrir une fenêtre sur le fonctionnement mental. L'allégorie de la caverne de Platon symbolise bien l'importance du monde sensible et du phénomène perceptif par lequel l'Homme accède à la connaissance ainsi que ces pièges et ces limites (Platon, in *Περὶ πολιτείας / Peri politeías " La république"*). Toutefois, en insistant déjà sur la différence fondamentale avec la sensation, Platon pose les bases d'une définition du phénomène perceptif qui ne peut être passif, seul et unique générateur de représentations sur le monde (Platon, in *Θεαίτητος / le Théétète, " La science "*). Les débuts de la psychologie expérimentale ont ensuite démontré l'importance de la perception dans le fonctionnement psychologique et ont été marqués par de nombreux travaux centrés sur l'étude de ce phénomène (James, 1892 ; Wundt, 1874 ; Fechner, 1960). Malgré les limitations techniques de la fin du 19^e siècle, la psychologie expérimentale et la psychophysique ont mis à jour un important corpus de données sur le fonctionnement du système cognitif par le biais de l'étude systématique de la perception. Avec les débuts du cognitivisme, le formalisme et la modélisation de la perception ont évolué, permettant d'y intégrer la nature nécessairement biologique sous-tendant ces comportements. La description par Shannon et Weaver d'une théorie mathématique de la communication (Shannon, 1948 ; Shannon & Weaver, 1949) a

permis de considérer la nature fonctionnelle du phénomène perceptif, en la définissant comme une série de processus visant à réduire l'incertitude des informations sensoriels (l'entropie). Leurs propositions ont également pris en compte la dimension structurelle de cette information, émise par une source, relayée par différents modules de transmission et se déplaçant le long d'un canal en se distinguant d'un bruit de fond. Il est ainsi possible d'établir un certain, mais fragile, consensus en définissant la perception comme l'ensemble des mécanismes permettant d'attribuer un sens aux informations sensorielles pour l'organisme, en diminuant l'entropie de cette information.

De la même manière, l'action apparaît comme un mode d'interactions privilégié avec l'environnement (James, 1892), permettant à la fois une optimisation de l'orientation comportementale et donc de la prise d'informations sur l'environnement par la perception, mais également en permettant une modification directe au sein de l'environnement (approche, évitement, prise de nourriture, observation des conséquences de l'action...). Le rôle de l'action dans la perception ne se limite toutefois pas à la valeur ajoutée d'une orientation des récepteurs sensoriels. Le cerveau est en effet capable d'agir de manière active, et proactive, dans son environnement. Cette adaptation est faite en fonction du contenu de la perception elle-même, de l'organisation de l'action dans l'environnement et de l'observation des retours sensoriels sur cette action. Ces éléments constituant alors eux-mêmes une source d'informations sur l'environnement. Cette interdépendance entre les systèmes perceptif et moteur a été mise en évidence dès la fin du 19^e et dans le début du 20^e siècle (voir James, 1892 ; Poincaré, 1902), et fût ensuite considérée selon divers champs théoriques, comme le behaviorisme, avec la théorie de la perception directe (Gibson, 1979), la psychologie génétique ou du développement (Piaget & Inhelder, 1966 ; Wallon, 1945), ou encore plus récemment par les théories de la cognition incarnée et de l'enaction (Varella, 1988 ; Olivier, 2012 ; Barsalou, 1999 ; Chemero, 2003). L'étude des liens perception-action a permis de

montrer une interdépendance à la fois fonctionnelle et structurale entre ces 2 systèmes (Milner & Goodale, 1995) notamment dans le cadre de la perception spatiale. Notre cerveau perçoit l'espace qui nous entoure en évaluant ses aspects moteurs en termes d'actions potentielles, ainsi que de coûts et de bénéfices pour l'organisme (Poincaré, 1902). D'un point de vue phylogénétique, ce fonctionnement interdépendant entre perception et action apparaît comme essentiel chez toutes les espèces qui ont à réguler des comportements dans un environnement en 3 dimensions et à organiser des déplacements au sein de celui-ci. L'intégration de l'information visuelle et sensori-motrice permet aux organismes d'élaborer et de mettre en place des comportements réactifs et proactifs face à l'environnement et aux problématiques qu'il oppose. L'aspect dynamique de ces interactions permet une adaptation et des ajustements fins face aux contraintes d'un environnement en constant changement. Ces ajustements permettent par exemple d'expliquer au niveau ontogénétique l'adaptation de ces systèmes durant la croissance de l'organisme, de l'utilisation d'outils et de l'adaptation à des contraintes temporaires au niveau microgénétique. Ce champ de recherche a permis d'établir non seulement que les structures cérébrales impliquées dans la perception et l'action sont très connectées, voire partiellement confondues, mais également que les traitements visuels pour l'action reposent sur des systèmes anatomiques différents de ceux pour la catégorisation et la reconnaissance d'objet par exemple. Ces réseaux impliquent une voie dorsale occipito-pariétale, et entretiennent de nombreuses connexions et similarités avec des aires corticales et sous-corticales dédiées au contrôle moteur. On retrouve bien évidemment des indices comportementaux des relations en interactions de ces systèmes, de la perception des affordances dans l'environnement aux effets de facilitations et d'interférences des mouvements oculaires et manuels.

Dans la première partie de cette thèse, nous nous proposons d'étudier le développement ontogénétique des relations perception-action dans le cadre de la perception spatiale. Nous

présenterons le contexte théorique général ayant guidé ce travail de thèse et nous ferons une présentation des neurosciences développementales et du modèle des compétences dynamiques. Nous présenterons ensuite la notion de perception spatiale, son intégration dans le modèle des compétences dynamiques et nous focaliserons davantage sur l'espace péripersonnel. Enfin nous effectuerons une revue de la littérature sur le développement perceptif et moteur afin de repérer les discontinuités dans les trajectoires développementales de ces fonctions, et de caractériser la période d'intérêt choisie pour les études de ce travail de thèse.

Dans la seconde partie, nous présenterons les études expérimentales réalisées dans le cadre de ce doctorat. Nous rappellerons les enjeux théoriques ainsi que le cadre méthodologique de ces études avant de présenter les publications qui s'y rapportent dans lesquels sera présenté l'ensemble des données recueilli durant ce travail de thèse.

Enfin, dans la troisième partie nous tenterons d'apporter une conclusion sur la problématique du développement de la perception spatiale en discutant de ces résultats et de leurs apports à la littérature existante dans le domaine.

Dans l'ensemble de ce travail de thèse, nous effectuerons un va-et-vient d'une part entre les données comportementales et neurobiologiques, et d'autre part entre les arguments théoriques et expérimentaux obtenus chez l'adulte et chez l'enfant au cours du développement. Lorsqu'un modèle neurocognitif de l'adulte présente une certaine valeur heuristique ainsi qu'une plausibilité biologique, il semble pertinent d'admettre qu'un modèle du développement normal ait pour but d'expliquer les transitions dynamiques aboutissant à un tel fonctionnement chez adulte. Cependant, ce mode de fonctionnement peut entraîner des biais de raisonnement, notamment un certain caractère réductionniste dans la construction de véritables modèles développementaux. Ajouter à cela les diverses difficultés d'ordre

méthodologique, théorique ainsi que celles concernant la complexité de modélisation les aspects développementaux en psychologie, ce travail de thèse représente un travail d'exploration du développement des liens perception-action au sein du domaine plus spécifique de la perception spatiale. Nous avons apporté un ensemble de données originales en ce domaine dont nous discuterons l'apport théorique en référence à des modèles existants.

Chapitre I. Cadre théorique général : introduction aux neurosciences développementales

A new scientific truth does not triumph by convincing its opponents and making them see the light, but rather because its opponents eventually die, and a new generation grows up that is familiar with it.

Max Planck

I. 1. Principes et définition

La psychologie moderne intègre de manière axiomatique la notion du cerveau comme organe de l'esprit et des processus mentaux. L'essor des neurosciences et de la neuropsychologie a permis d'établir des parallèles entre les comportements et les réseaux neuronaux impliqués dans leur organisation et leur régulation. De même, l'avancée des technologies d'imageries cérébrales anatomiques et fonctionnelles a permis d'apporter un nombre toujours croissant de données sur le cerveau, son fonctionnement et son développement. Par ailleurs, le développement de paradigmes ingénieux a quant à lui permis d'obtenir des données comportementales très précises sur l'ontogenèse des processus mentaux. Ces bases théoriques et empiriques nous permettent d'envisager une neuropsychologie du développement comme une science visant à apporter une spécification des corrélats neuronaux possibles aux constructions développementales comme la perception spatiale.

Le concept de maturation cérébrale : un point de vue constructiviste

La construction d'une véritable neuropsychologie du développement doit naturellement prendre en compte le concept de maturation, qui a dominé la psychologie du développement pendant la majeure partie du 20^e siècle. Le fait que des différences dans le fonctionnement mental au cours du temps, de même que des différences interindividuelles puissent au moins en partie être attribuées à des différences et des changements dans la structure et le fonctionnement du cerveau est un concept ancien et déjà intégré par des auteurs classiques comme Gesell (1933) il y a plus de 70 ans de cela. Toutefois, la position théorique soutenue dans cette thèse veut éviter un réductionnisme radical, position défendue justement par des auteurs comme Gesell ou Carmichael, et qui fait reposer l'ensemble des évolutions comportementales sur la maturation cérébrale (Carmichael, 1926, 1927, 1928, 1946 ; Gesell, 1933). Notre position se rapprocherait plutôt du courant constructiviste, dont les bases furent posées par Jean Piaget au milieu du siècle dernier.

La position Piagétienne sur le phénomène de maturation a fait l'objet de nombreux débats. Dans ses travaux, Piaget admet l'ancrage biologique de la psychologie et l'idée de la maturation cérébrale comme mécanisme pouvant rendre compte du développement cognitif (Piaget, 1930), tout en s'opposant à une conception réductionniste où la maturation jouerait à la fois le rôle de mécanisme descriptif et explicatif du développement (Piaget, 1947). Piaget et son triple ancrage, biologique, épistémologique et logico-mathématique, avait perçu très tôt les implications théoriques et la complexité des données sur la phylogénie et l'ontogénie du cerveau. Il a également conclu qu'il manquait à l'époque d'informations suffisamment précises sur le développement cérébral du jeune enfant pour être capable d'articuler le rôle de la maturation cérébrale avec le développement cognitif de l'enfant (Piaget, & Inhelder, 1966). En opposition avec un cadre de référence purement biologique se limitant à étudier le développement des réseaux neuronaux sous-tendant les compétences de l'enfant et ses

processus mentaux, il a permis de reconsidérer le rôle fondamental de l'action et de l'expérience de l'enfant lui-même, et son propre corps, en tant qu'acteur de son propre développement. Pour lui, l'énergie alimentant le développement est le conflit entre les principes d'organisation (au niveau neuronal, mais également dans les processus mentaux eux-mêmes) et un environnement récalcitrant forçant l'organisme à s'adapter et à développer des systèmes et une compréhension toujours plus complexe de l'environnement (Piaget, 1972). S'éloignant d'une conception réductionniste-déterministe, la neuropsychologie du développement telle que nous en présentons ici les bases apporte sans doute les meilleurs arguments pour soutenir cette position constructiviste.

Dans cette conception du développement, nous considérons que les systèmes biologiques, et donc le cerveau, fournissent des structures, et que la croissance cérébrale est la base de l'individualité. Mais ces structures sont flexibles par nature. L'idée selon laquelle la structure du cerveau est entièrement fixée à la naissance est donc bien évidemment rejetée : le cerveau est plutôt considéré comme un organe à la croissance dynamique et adaptative. De manière corollaire au fait que les structures cérébrales et leur développement peuvent influencer le comportement ainsi que les capacités cognitives, nous devons également accepter l'idée que, si les structures et mécanismes mentaux sont stockés d'une manière ou d'une autre au sein du cerveau, les actions et comportements d'un individu doivent nécessairement pouvoir influencer les réseaux neuronaux dont dépendent ces actions. Le rôle de l'action dans le développement et l'adaptation des différentes capacités cognitives met en évidence le caractère particulier de la perception spatiale qui nécessite une calibration constante de ces mécanismes par l'action et ses conséquences sur l'environnement.

I. 2. Mécanismes développementaux

Dans le contexte d'une neuropsychologie développementale d'orientation constructiviste, nous pouvons mettre en évidence 3 grands principes auxquels doit répondre le fonctionnement du cerveau pour le considérer comme acteur de son propre développement. Premièrement, comme énoncé plus haut, les expériences vécues par l'individu doivent nécessairement pouvoir influencer la trajectoire développementale des structures cérébrales. Deuxièmement, pour rendre compte de la dynamique des apprentissages cette influence se doit d'être présente tout au long du développement, dans ce que l'on a coutume d'appeler une perspective vie-entière. Enfin, troisièmement, certains éléments de cette influence doivent pouvoir être accessibles à une manipulation mentale, au moins partiellement explicite de la part de l'individu et doivent pouvoir faire l'objet de choix conscient de sa part (Segalowitz, 2007).

Le premier principe, selon lequel les expériences auxquelles est soumis le cerveau peuvent influencer le développement de sa structure, est relativement bien décrit empiriquement. Des travaux sur des modèles animaux (notamment le rat) ont par exemple permis de montrer que l'arborisation dendritique et la synaptogénèse varient en fonction des expériences de l'organisme en termes de stimulations. Une privation de stimulation (généralement induite par un appauvrissement de l'environnement) diminue de manière très importante la croissance des neurones et, à l'opposé des stimulations constantes de la part de l'environnement permettent de limiter les effets du vieillissement en termes de réductions de la synaptogénèse et de la croissance neuronale (Diamond, 1988). Ces principes sont d'ailleurs en neuropsychologie la base implicite de tout le travail de remédiation cognitive que ce soit chez les enfants, les adultes, ou les personnes âgées. De manière conceptuellement similaire, les travaux de Squire et Kandel sur les mécanismes neurochimiques des apprentissages et de la mémoire (« la grammaire chimique de la mémoire ») prouvent non seulement la validation

de ce premier principe, mais définissent également précisément la nature des mécanismes pouvant être impliqués (Squire & Kandel 2008).

Le second principe, d'un développement tout au long de la vie, s'il est également aujourd'hui bien établi, s'appuie sur des découvertes relativement récentes. En effet, pendant longtemps il était considéré que le nombre de neurones dont peut disposer un individu était établi à la naissance de manière définitive. Nous disposons maintenant de données montrant que de nouveaux neurones sont constamment générés dans certaines structures cérébrales, très impliqués notamment dans la mémoire et les nouveaux apprentissages, comme l'hippocampe et le gyrus denté (Gould & Tanapat, 1999). Cette synaptogénèse, ainsi que le devenir de ces neurones, sont fortement affectés par le stress de nature physique ou même psychologique. De même l'expérience des individus vient naturellement moduler la dynamique des apprentissages. Ainsi le maintien d'une activité physique et/ou cognitive jusqu'à un âge avancé peut venir grandement moduler l'expression comportementale du vieillissement normale ou pathologique (Spiriduso, 1975 ; Chodzko-Zajko, Ringel, & Corrigan, 1988 ; Chodzko-Zajko, 1990 ; Colcombe & Kramer, 2003).

Enfin le troisième principe, selon lequel, le caractère volontaire et explicite des actions au sein de l'environnement ont des effets mesurables sur le long terme, est très bien établi au niveau des apprentissages perceptivo-moteurs : l'expérience classique de Held et Hein (1963) montre qu'un chaton explorant de manière active son environnement développe de manière normale sa vision spatiale, à l'inverse, si on lui apparie un deuxième chaton, subissant de manière passive les déplacements du premier, celui-ci ne développera pas cette vision spatiale, car il n'aura pas pu mettre en relation les éléments d'informations relevant de la perception visuelle avec ceux issus de ses propres déplacements dans l'espace. C'est le déclenchement d'une action volontaire et explicite, d'un déplacement autogénéré au sein d'un environnement, qui permet la construction progressive de la vision spatiale via la mise en

relation des différentes sources d'informations qui la constitue. Chez l'Homme, il a été montré qu'une expertise dans un domaine de compétence particulier pouvait modifier de manière significative l'organisation fonctionnelle du cerveau. Ainsi, une pratique précoce du violon peut affecter le développement des représentations somato-sensorielles des doigts de manière spécifique et proportionnellement à l'intensité de la pratique (Elbert, et al., 1995).

Pour valider l'hypothèse d'une influence de la maturation cérébrale sur le développement cognitif dans le cadre défini ci-dessus, les données comportementales sur le développement des processus mentaux et des habilités doivent également être compatibles avec la chronologie de mise en place et d'arrêt des 7 mécanismes principaux impliqués dans le développement cérébral (Byrnes, 2001 ; Nelson & Luciana, 2008). Ces mécanismes sont la **prolifération**, la **migration** et la **différenciation cellulaire**, la **croissance neuronale**, la **synaptogénèse**, les processus dits de **régression** (i.e., la mort cellulaire et « l'élagage axonal ») et la **myélinisation des fibres nerveuses**. Une chronologie dans la mise en place et l'arrêt de ces mécanismes a été définie sur la base d'observations chez l'animal et chez l'Homme. Certains d'entre eux ont une chronologie fixe dans le temps (i.e., la prolifération, la migration, la différenciation et la croissance) : ils commencent et se terminent à des âges spécifiques. D'autres ont une chronologie largement ouverte et sont toujours observables à l'âge adulte (i.e., la synaptogénèse, les processus de régression ainsi que la myélinisation). Si l'on veut expliquer, au moins en partie, le développement d'une capacité cognitive sur la base de ces mécanismes, leurs chronologies doivent donc être compatibles avec celle de la capacité en question. L'émergence d'un processus mental à l'âge de 7 ans par exemple peut difficilement être reliée à un mécanisme du développement cérébral ayant pris fin dans la vie intra-utérine. Dans ce cadre, les processus de régression, la synaptogénèse et la myélinisation semblent des cibles d'investigations pertinentes dans une perspective de développement vie-entière.

I. 3. Le modèle des compétences dynamiques

Les discontinuités comme marqueurs de l'émergence comportementale et des niveaux de développement

L'ensemble des données sur le développement des fonctions cognitives, mais également celui du cerveau montrent que, la croissance ne suit généralement pas une fonction linéaire, mais est plutôt marquée par des discontinuités (paliers, chutes, et à-coups brutaux). L'observation de discontinuités, dans le rythme de développement, s'avère donc être un outil très pertinent, pour établir les étapes majeures du profil développemental des fonctions cognitives, les périodes critiques, ainsi que pour relier ces changements comportementaux à des modifications cérébrales (Thatcher, 1994). En effet les caractéristiques du cerveau, comme la myélinisation, la densité synaptique, l'arborisation dendritique, l'élagage des neurones et des synapses et donc d'une manière générale la masse du cerveau, mais également l'activité électrophysiologique, changent de manière systématique avec l'âge au cours de l'enfance. Simultanément, les capacités cognitives (langage, mémoire, attention, contrôle moteur...) évoluent également grandement, à la fois de manière quantitative, mais aussi qualitative. La corrélation dans le temps de ces changements et la nature non linéaire de ces évolutions rend possible la détection et l'étude de périodes critiques lorsque d'importants changements ont lieu. Ces véritables cycles observables dans le développement permettent de relier les changements comportementaux avec ceux de l'activité cérébrale en termes de modifications structurales et fonctionnelles (Fischer & Bidell, 1998).

Cadre général du modèle

Kurt Fischer propose dans ce contexte un modèle, dit des compétences dynamiques (« *dynamic skills* »). Il décrit l'ontogenèse à l'aide de cycle de croissance marquant les

différents niveaux (« *tiers* ») du développement cognitif. Pour Kurt Fischer (Fischer & Yan, 2002), le terme compétence (« *skills* ») se différencie de l'habileté, de la capacité ou du schème. Il renvoie à un concept basé sur un contexte d'apprentissage particulier et une tâche spécifique. Ces compétences sont composées des nombreux éléments cérébraux, corporels, comportementaux et environnementaux (pouvant être eux-mêmes d'autres compétences dynamiques) qui vont progressivement rentrer en interaction. Avant leur coordination, ces éléments sont relativement indépendants et ne sont que faiblement connectés. À mesure que la coordination entre les différents éléments se développe et se renforce, chaque élément va fortement influencer les autres, modulant en cascade les fonctions de croissance de ces compétences dynamiques, et produisant les discontinuités observées sur les dynamiques développementales de chacun des éléments. À chaque niveau de développement, les compétences dynamiques deviennent des composantes potentielles de nouvelles coordinations au sein d'un système encore plus complexe intégrant les acquisitions antérieures. Des cycles sont ainsi observés dans les trajectoires développementales, marqués par des périodes de croissance rapide suivies de périodes d'accalmies, marquées par des plateaux dans les trajectoires développementales. Les discontinuités développementales sont interprétées dans ce cadre théorique, comme des marqueurs du début d'un autre cycle. Ils se répètent à chaque niveau de développement lorsque des étapes clés sont atteintes, à la fois dans le développement de fonctions et/ou de mécanismes cognitifs, ainsi que dans le développement cérébral (Fischer & Bidell, 1998 ; Fischer & Rose, 1994 ; Immordino-Yang & Fischer, 2007). Les différentes structures cérébrales, comportementales et environnementales se coordonnent progressivement en des systèmes de contrôle de plus en plus haut niveau : les compétences dynamiques.

La hiérarchie du développement dynamique

Fischer propose une hiérarchie de 13 étapes dans le développement, regroupées en 4 niveaux. Ces distinctions sont conceptuellement similaires aux 4 niveaux du développement de la pensée logique développées par Piaget (Piaget & Inhelder, 1966). Les 4 grandes étapes du développement sont pour Fischer : **1** les réflexes ; **2** l'action ; **3** la représentation et **4** l'abstraction. Chaque niveau consistant en 4 sous-étapes, qui se recouvrent à chaque niveau, l'étape finale d'un niveau constituant également la première étape du niveau suivant. Ces étapes marquent l'évolution d'un groupe de compétences. Chacune permettant l'élaboration d'un ensemble de comportements plus complexes que le précédent. La première étape de chaque niveau correspond à la capacité de l'individu à manipuler un ensemble unique d'éléments, dans un registre spécifique. Au cours de la seconde étape, l'enfant met en place la capacité à créer des connexions entre 2 ou plus éléments et à identifier les relations entre ceux-ci. Dans la 3^e étape, les connexions réalisées au niveau précédent sont coordonnées entre elles en un système plus complexe de relations et de connexions multiples. Au cours de la 4^e et dernière étape de chaque niveau, les systèmes de connexions sont coordonnés avec d'autres systèmes, de registres différents, mais fonctionnellement reliés, et appartenant au même niveau de développement, en un système de systèmes. Cette coordination d'éléments et de sources d'informations en une même compétence dynamique (ou système de représentations) permet la mise en place et l'adaptation de structures comportementales de plus en plus complexes. Les systèmes de systèmes ainsi élaborés à la fin de chaque niveau constituent également le premier élément de base du niveau suivant, qui sera caractérisé par des relations plus complexes entre les éléments comportementaux, cérébraux, corporels et environnementaux (figure 1 et 2).

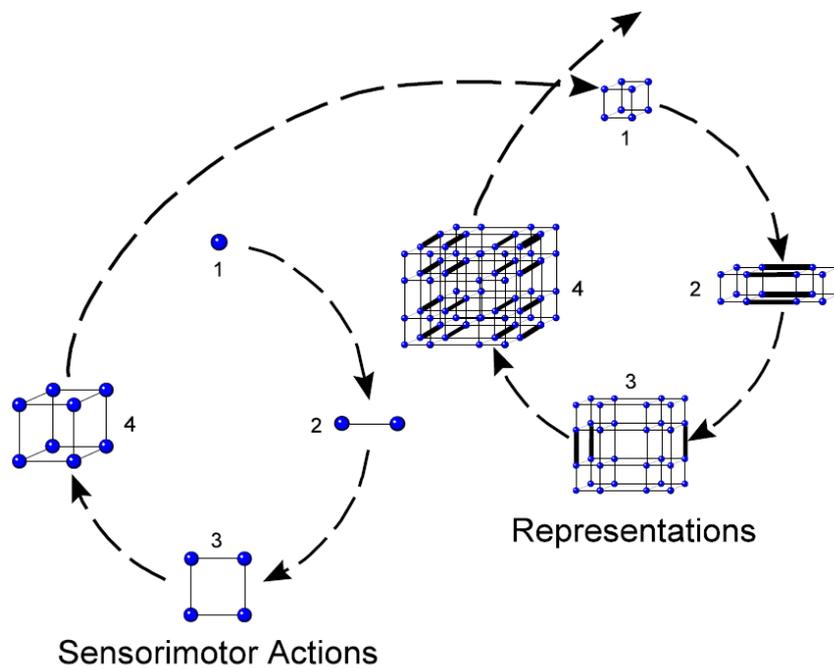
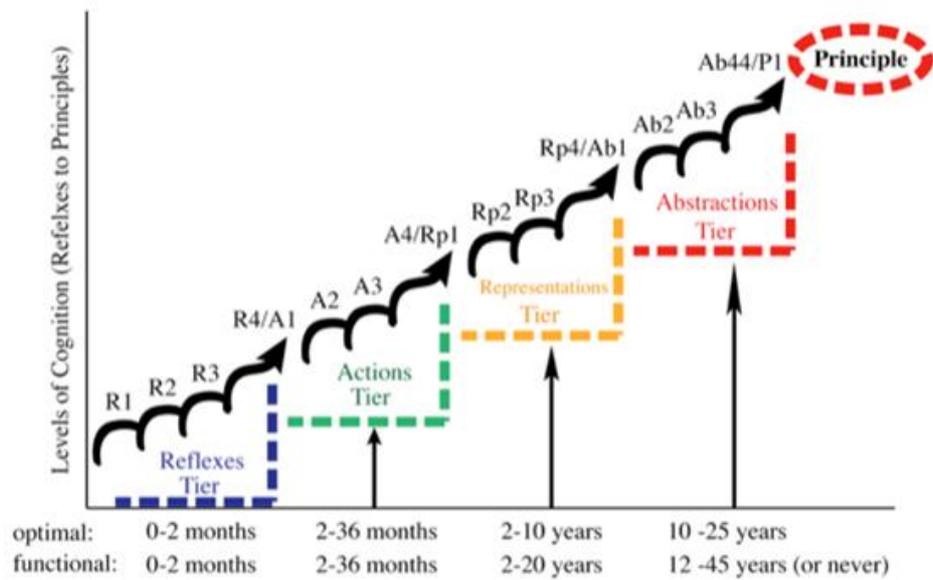


Figure 1 : En haut, les 13 étapes et les 4 niveaux du développement dans la théorie des compétences dynamiques. En bas, détails des cycles, étapes et niveaux de développement . Adapté de Fischer & Yan (2002).

La mise en évidence expérimentale de discontinuités marquant les étapes de ces cycles développementaux permet d'identifier 10 grandes étapes de développement entre la petite enfance et l'âge de 30 ans. D'autres séries d'études suggèrent également l'existence de tels

cycles, sans doute plus rapide, dans les premiers mois de vie (Fischer & Bidell, 1998 ; Fischer & Rose, 1994 ; Fischer & Yan, 2002 ; Immordino-Yang & Fischer, 2007). Durant la petite enfance, 4 périodes d'à-coups dans les trajectoires développementales, séparées par quelques mois (approximativement 4, 8, 12 et 20 mois), marquent le passage de ces sous-étapes, et sont dominées par des compétences dynamiques (et donc des capacités cognitives) centrées sur l'action et son organisation. Plus tard, durant l'enfance, à des intervalles espacés de quelques années (environ 4, 7 et 11 ans), l'enfant développe ses compétences de représentations (de l'environnement, mais également des actions qui y sont possibles). Enfin, le développement se poursuit tout au long de l'adolescence et à l'âge adulte avec la mise en place des compétences d'abstraction. Cette étape correspond à la description du stade piagétien des opérations formelles où « *jusque-là le possible était considéré comme un cas particulier du réel, et c'est maintenant le réel qui devient un cas particulier du possible* » (Piaget, 1966). Le tableau 1, ci-dessous, rassemble les âges d'émergences des différentes étapes développementales selon Fischer (1980).

<i>Skill Level</i>	<i>Optimal</i>	<i>Functional</i>
Rp 1 Single Representations	2 years	2 to 5 years
Rp 2 Representational Mappings	4	4 to 8
Rp 3 Representational Systems	6	7 to 12
Rp4/Ab1 Single Abstractions	10	12 to 20
Ab2 Abstract Mappings	15	17 to 30
Ab3 Abstract Systems	20	23 to 40 (or never)
Ab4/P Single Principles	25	30 to 45 (or never)

Tableau 1: Âges des principales acquisitions des différentes étapes de développement pour les niveaux fonctionnels et structuraux de développement. Adapté de Fischer 1980.

Variabilité intra-individuelle et dynamique structurelle

Le modèle de Fischer met l'accent sur l'aspect non linéaire du développement et insiste également sur l'importance de prendre en compte la variabilité intra-individuelle dans les performances au cours du développement. Il observe ainsi des différences importantes dans les performances des mêmes individus en fonction du contexte d'expression de leurs compétences (Rose & Fischer, 2008). Il met ainsi en évidence 2 profils de performances, dont les différences s'accroissent avec l'âge (voir figure 2). Fischer distingue le fonctionnement optimal et fonctionnel. Son modèle postule de manière forte qu'un contexte avec un haut niveau de support pour une tâche donnée permet l'expression d'un mode de fonctionnement optimal pour celle-ci, i.e. les meilleures performances possible en fonction du niveau de développement cognitif de l'individu. Un contexte avec haut niveau de support correspond à une situation dans laquelle les individus ont suffisamment de temps et d'informations, pour évaluer chacun des aspects de la tâche et analyser la difficulté de chacune des étapes de sa réalisation. Cette distinction force le chercheur à évaluer de manière consciencieuse les données que lui offre la littérature. Pour Fischer, la plupart des situations écologiques, ainsi que certaines études expérimentales, n'offrent en effet pas un haut niveau de support. Ces situations ne permettent alors l'expression que d'un mode fonctionnel de performances, i.e. le niveau de base de performance, correspondant au niveau juste suffisant pour réaliser la tâche. De telles performances ne renvoient donc pas au niveau maximum de capacité de l'individu, ni à son niveau de développement cognitif maximal. Elles sont plus représentatives, selon Fischer, du niveau de performances d'un individu n'ayant pas de réelle motivation à réaliser la tâche, ou ne disposant pas de suffisamment de temps ou d'information pour le faire de manière optimale. Pour Fischer, l'évaluation de ces 2 modes de fonctionnement et de leurs différences permet de mesurer l'étendue développementale des individus dans son ensemble (Fischer & Bidell, 2006). Ces notions sont toutefois difficiles à appréhender et surtout à

mettre en œuvre pour le chercheur en psychologie du développement, et ont été que relativement peu appliquées dans ce domaine. Il est toutefois intéressant de noter des points communs, dans une certaine mesure, avec les théories du constructivisme social de Vygotsky (1933) et de la notion de zone proximale de développement. Vygotsky avait commenté les travaux de Piaget et mis en évidence qu'un étayage adapté permettait la réussite précoce à des tâches piagésiennes. Cet étayage pouvant prendre la forme de consignes adaptées, ou de l'utilisation d'une pédagogie particulière. Vygotsky a mis l'accent sur la dimension sociale de cet étayage, mais les travaux de Fischer généralisent ces procédures d'adaptation et d'apprentissage à l'ensemble des sources d'informations disponibles et ne spécifient pas de modalités à priori privilégiées dans le développement des capacités cognitives. Pour Fischer le caractère fonctionnel des compétences dynamique, et donc leur intérêt adaptatif et leur manifestation comportementale, est essentielle dans leur développement.

Le développement cérébral

Le modèle des compétences dynamiques est caractérisé, par l'existence à chaque niveau de développement, de cycles de croissance des connexions au sein du réseau cérébral. De nombreuses observations ont permis de rendre compte de la pertinence de ce point de vue dans la mise en relation des acquisitions comportementales et des données sur l'évolution du tissu cérébral. (Fischer & Rose, 1994 ; Fischer & Rose, 1996 ; Marshall, Bar-Haim, & Fox, 2002 ; Somsen, van't Klooster, van der Molen, van Leeuwen, & Licht, 1997 ; Tatcher, 1994). Selon Immordino-Yang et Fischer (2007) de vastes campagnes d'imagerie cérébrales ont en effet permis de mettre en évidence l'existence de périodes de modifications rapides et de discontinuités dans la maturation fonctionnelle et structurale du cerveau rendant compte de

discontinuités et de cycles de développement (Chung et al., 2001 ; Giedd et al., 1996 ; Giedd et al., 1999 ; Zijdenbos, Dawant & Margolin, 1994 ; Fischer, 2008).

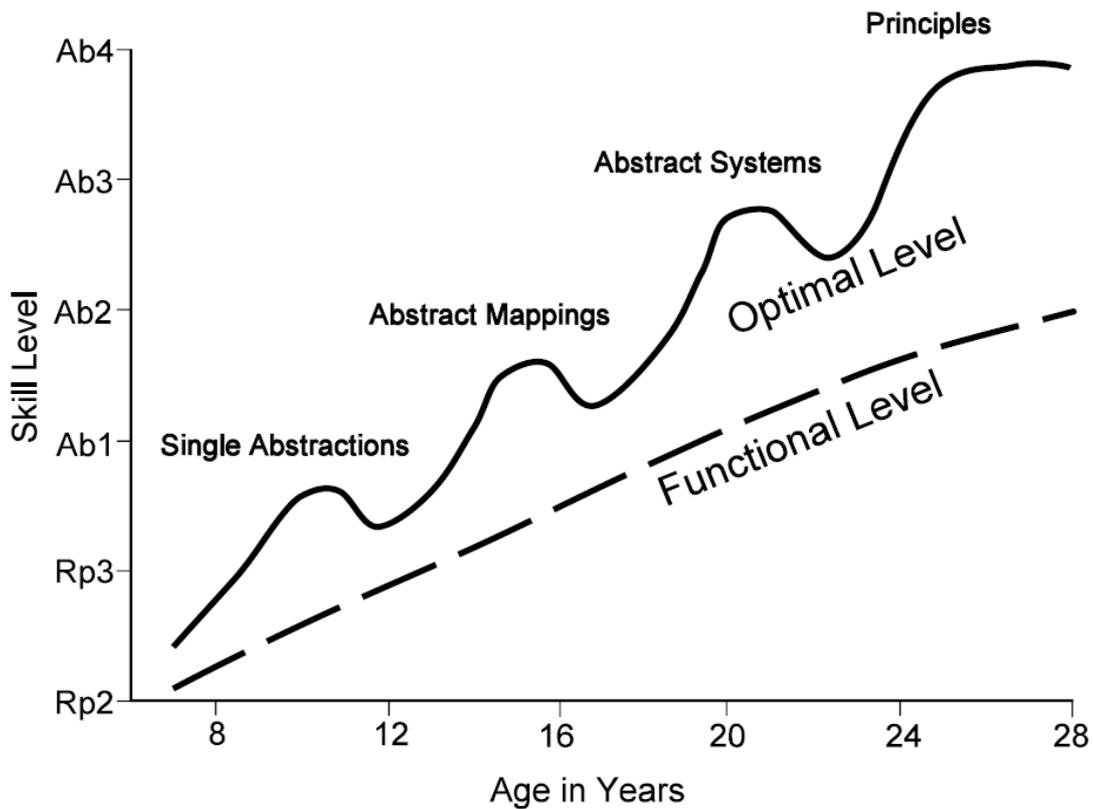


Figure 2: Performances optimales et fonctionnelles en fonction de l'âge. Adapté de Fischer & Yan, 2002.

Ces cycles s'enchainent rapidement au cours de la première année de vie, avant de s'espacer. Le modèle des compétences dynamiques permet d'articuler ces observations en décrivant plus spécifiquement l'organisation de ces cycles de développement.

Chaque cycle commence par un pic de croissance des connexions distales entre régions antérieures et postérieures des 2 hémisphères (les aires frontales et occipitales par exemple). La croissance des connexions est ensuite plus importante pour l'hémisphère droit, avec un développement des connexions proximales (entre des structures pariétales et temporales). Durant une brève période, on observe une croissance des connexions fronto-frontales,

également dans les 2 hémisphères. Ensuite, le phénomène de croissance est de nouveau plus marqué cette fois dans l'hémisphère gauche, où des connexions se développent d'abord de manière proximale autour de la partie centrale avant de s'étendre à nouveau à des structures plus distales. Le cycle se termine par un retour de la croissance des connexions fronto-occipitales et avec le commencement d'un nouveau cycle. Ce patron de développement cérébral met en évidence que lors d'un cycle, la mise en place et le développement de nouvelles compétences commencent par une forte implication de l'hémisphère droit avant d'impliquer graduellement le gauche (voir figure 3). Ceci suggère pour Fischer que ces nouveaux apprentissages sont d'abord envisagés sur la base de traitements holistiques et globaux, avant de se concentrer sur la différenciation des constituants et la spécificité de l'information. Cette organisation proximo-distale des courbes de croissance neuronale, coordonnant par exemple des structures pariétales à des structures frontales, peut être rapprochée de la mise en place progressive des cycles perception-action, prépondérant dans l'organisation du comportement et de l'action (Berthoz, 1997 ; Fuster, 2004). Les structures nerveuses antérieures étant en effet généralement dévolues au fonctionnement moteur, par opposition aux structures postérieures qui sont généralement associées au fonctionnement perceptif.

Ce modèle général du développement cognitif présente plusieurs intérêts. Dans un premier temps, il fait la synthèse de nombreuses données, tant comportementales que neurophysiologiques, et intègre les avancées les plus récentes dans ces domaines. Dans un second temps, il ne se veut pas, par définition, spécifique à un domaine, comme l'apprentissage de la lecture, le développement de la mémoire ou celui de l'attention, mais offre une vue d'ensemble et une modélisation avec une réelle perspective développementale. Enfin, il donne aux chercheurs des outils d'une grande valeur heuristique et leur permet d'identifier des périodes critiques pour l'acquisition et le développement de certaines

capacités. Nous suivrons cet ancrage théorique et méthodologique, dans la suite de ce travail de thèse sur le développement de la perception spatiale et de ses déterminants.

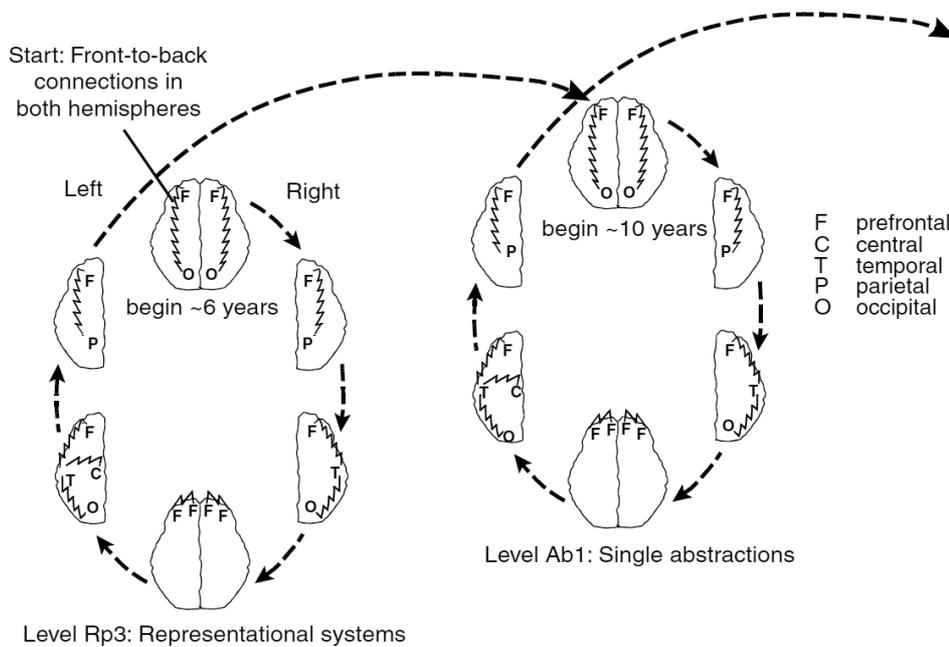


Figure 3: Cycles dans le développement des réseaux corticaux pour 2 étapes successives du modèle des compétences dynamiques. Adapté de Fischer (2008)

La perception spatiale comme une compétence dynamique

Dans ce cadre théorique, la perception spatiale peut être étudiée comme un exemple de compétence dynamique dont les éléments corporels (perception visuelle, sensori-motricité), cérébraux (myélinisation des aires corticales) et environnementaux (confrontation aux conséquences de ses actions dans l'environnement) vont progressivement entrer en interaction, s'influencer dans leur développement respectif et se coordonner en une compétence de plus en plus complexe. Une étude de la perception spatiale et de son

ontogenèse doit donc nécessairement être appuyée sur les connaissances et sur la détection des discontinuités et des cycles de développement au sein de chacun de ces systèmes.

Chapitre II. Ontogenèse de la perception spatiale

Facts do not cease to exist because they are ignored.

Aldous Huxley

If the facts don't fit the theory, change the facts.

Attribuée à Albert Einstein

Where facts are few, experts are many.

Donald R. Gannon

II. 1. Formulation classique du problème : la question de Molyneux

La genèse des représentations spatiales de l'environnement et des objets qui s'y trouvent est une question ancienne qui a intéressé philosophes et scientifiques depuis longtemps. Une formulation de cette problématique a été proposée une première fois par William Molyneux, en 1688, dans une lettre adressée au philosophe John Locke. Celui-ci reformula cette question quelques années plus tard dans un essai sur la compréhension humaine :

“Suppose a man born blind, and now adult, and taught by his touch to distinguish between a cube and a sphere of the same metal, and nighly of the same bigness, so as to tell, when he felt one and the other, which is the cube, which is the sphere. Suppose then the cube and the sphere placed on a table, and the blind man made to see: query, Whether by his sight, before he touched them, he could now distinguish and tell which is the globe, which the cube?” (II, ix, 8).

“Supposez un aveugle de naissance qui soit désormais un homme fait, auquel on ait appris à distinguer par le seul attouchement un cube et un globe du même métal, et à peu près de la même grosseur, en sorte que lorsqu’il touche l’un et l’autre il puisse dire quel est le cube et quel est le globe. Supposez que le cube et le globe étant posés sur une table, cet aveugle vienne à jouir de la vue. On demande si, en les voyant sans les toucher, il pourra les discerner, et dire quel est le globe et quel est le cube ?»

Ce débat pose la problématique du caractère modal ou amodal de la perception spatiale. En d’autres termes, la représentation interne d’un objet et notamment de ses caractéristiques spatiales (ici principalement sa forme) est-elle liée spécifiquement à une modalité et peut-elle être mise en relation avec les actions effectuées sur cet objet. Cette question particulière a fait l’objet de plus de 300 ans de débat théorique, passant avec les progrès techniques et méthodologiques, d’une simple expérience de pensée à une question pratique pouvant être opérationnalisée. Les premières validations expérimentales ont été apportées dès le 18^e siècle, avec les progrès de la chirurgie de la cataracte congénitale, et semblent donner raison à la position empiriste défendue par Berkeley, Locke et Molyneux. Malgré d’importantes critiques méthodologiques et physiologiques émises par la communauté scientifique de l’époque, les données recueillies ultérieurement dans différents domaines semblent soutenir cette position. Il est pertinent de citer notamment les études montrant l’existence de périodes critiques dans le développement des liens entre les représentations multimodales et des concordances spatiales entre ces différentes représentations (e.g Röder & Rösler, 2004 ; Fine, 2003).

L’acquisition des représentations spatiales, avec d’autres indices perceptifs et moteurs, sert ainsi de base à la compréhension de l’environnement. Ainsi, nous pouvons, par exemple, discriminer les différents objets et événements de l’environnement entre eux sur la base par

exemple de leurs propriétés topographiques. Ce sont également ces propriétés qui permettent une intégration des informations perceptives et motrices autour de ces objets distincts, perçus au sein de l'environnement, et sur lesquels nous pouvons agir. Nos capacités d'action sur ces objets et notre propre corps apparaissent alors comme une base nécessaire à l'organisation de la notion d'espace, tel qu'il est perçu et représenté par notre cerveau. Notre corps est en effet la base de réception de toutes nos perceptions, et celle à partir de laquelle nous organisons l'intégralité de nos actions au sein de l'environnement. En psychologie du développement, il a justement été montré qu'une étape majeure et nécessaire au développement psychomoteur normal est justement celui de la capacité à se spécifier soi-même, par opposition aux autres objets de l'environnement (Rochat & Striano, 2000). Cette étape aboutirait à la construction progressive d'un véritable sens du soi, composante fondamentale à la construction de représentation mentale du monde, et au développement progressif des capacités cognitives.

II. 2. Espace perçu, espace incarné, espace représenté

II. 2.1. Le concept de schéma corporel

Le concept de schéma corporel est apparu pour rendre compte de ces représentations, largement inconscientes, du corps du sujet durant l'organisation de l'action (Paillard, 1982 ; Berlucchi & Aglioti, 1997). Il se différencie d'autres représentations corporelles, comme l'image du corps, concept utilisé notamment en psychopathologie par exemple et recouvrant d'autres dimensions, notamment émotionnelles et sociales. Le terme a été défini pour la première fois par le Neurologue Henry Head, comme un modèle postural du corps qui « modifie les impressions produites par les afférences sensorielles de sorte que la sensation finale de la disposition du corps ou sa localisation soit perçue consciemment en relation avec ce qui s'est passé avant » (Head & Homes, 1911 ; Head, 1920). Le schéma corporel serait une

représentation gardant la trace de la position des membres dans l'espace et les uns par rapport aux autres qui jouerait un rôle important dans l'organisation et le contrôle de l'action (Paillard, 1982 ; Berlucchi & Aglioti, 1997).

Ce concept d'une représentation inconsciente du corps et de l'organisation hiérarchique des différents segments corporels a trouvé un écho particulier au travers des modèles les plus récents du contrôle moteur comme la théorie des modèles internes, développée par Daniel Wolpert (Miall et Wolpert 1996 ; Wolpert & Ghahramani, 2003). Ces modèles neuro-computationnels postulent en effet l'existence de représentation du corps et du corps en action comme base du contrôle moteur et de l'organisation de la motricité. Le schéma corporel garde une trace de l'organisation spatiale du corps et de ses segments, il devient donc une base, pour l'organisation de la motricité. Il rend possible l'estimation des conséquences sensorielles d'une action, mais aussi celle des états finaux et/ou intermédiaires du corps et des membres durant sa réalisation. Pour Schaffhauser & Breuer (2005), de même que pour Wolpert & Haggard (2005), le schéma corporel doit ainsi présenter un certain nombre de propriétés pour répondre aux rôles fonctionnels qui lui sont attribués.

Propriétés du schéma corporel

Il doit être **codé spatialement**, i.e. la position du corps et sa configuration doivent être représentées comme un objet volumétrique dans un espace. Il doit intégrer les informations tactiles en provenance de la surface du corps avec les informations proprioceptives et visuelles sur la configuration des membres. Si, par exemple, un moustique se pose sur ma main gauche, je dois pouvoir combiner cette information tactile avec celles sur l'état des articulations de mon bras gauche pour pouvoir programmer un mouvement rapide et venir chasser le moustique avec mon autre main. Les stimulations tactiles à la surface de la peau

doivent donc pouvoir être transformées en localisations externes. Ce mécanisme n'est pas limité aux informations tactiles et proprioceptives, et implique aussi une participation des représentations visuelles. Par exemple, chez des adultes avec une vision normale, lorsque l'on délivre un stimulus visuel du côté droit, on observe une facilitation dans le traitement d'une stimulation tactile ultérieure adjacente à la stimulation visuelle. Lorsque les bras sont tendus dans une posture normale, on observe cette facilitation pour la main droite, mais si les bras sont croisés, c'est la main gauche qui présente ce bénéfice (Spence, Pavani, & Driver, 2000 ; Röder, Spence & Rösler, 2002 ; Röder, Rösler, & Spence, 2004). Ce type de phénomène de facilitation visuotactile suggère donc une importance des représentations visuelles dans l'élaboration des représentations spatiales et également du schéma corporel. On observe également ce type de phénomène de facilitation visuotactile pour des événements dynamiques comme avec les mouvements illusoires (Gray & Tan, 2002), suggérant également une mise à jour régulière des représentations impliquées dans le schéma corporel.

Ainsi, pour remplir un rôle efficace dans l'organisation de la motricité, une des propriétés fondamentales du schéma corporel est d'être **régulièrement mis à jour**, en fonction du mouvement par exemple, pour pouvoir enregistrer les positions relatives des segments corporels à mesure que le corps bouge. La définition princeps de Head insiste également sur cette mise à jour, automatique et régulière, de la représentation de la position des membres durant les mouvements volontaires : « *toute nouvelle posture et tout nouveau mouvement sont enregistrés dans ce schéma flexible, et l'activité du cortex doit rendre compte de toutes ces nouvelles sensations apportées par une altération de la posture* » (Head, 1920). Des arguments empiriques de cette mise à jour régulière sont observés par exemple avec le fait que les champs récepteurs visuels de nombreux neurones bimodaux du cortex pariétal suivent la main lorsque celle-ci bouge (Graziano, Gross, Taylor & Moore, 1993). Ce type de mécanisme neuronal permettrait au schéma corporel de moduler les mécanismes perceptifs

sur les objets de l'environnement en fonction de leur position par rapport au corps, permettant ainsi une organisation adaptée et adaptative des comportements, comme l'atteinte et la saisie.

Même si en principe les représentations du schéma corporel pourraient être stockées de manière unitaire, comme des représentations décrivant la configuration du corps entier, des arguments expérimentaux semblent suggérer un aspect **modulaire** du schéma corporel. Le cerveau semble représenter les différents segments corporels au sein de réseaux neuronaux relativement distincts, utilisant ainsi ces représentations comme un alphabet pour représenter toutes les postures possibles du corps en limitant le nombre d'éléments nécessaire pour ce faire. Ces représentations modulaires sont donc représentées en fonction des relations catégorielles et hiérarchiques que les différents segments corporels entretiennent entre eux, e.g. les doigts sont des éléments de la main, qui est un élément du bras, lui-même rattaché au reste du corps par l'épaule, et ainsi de suite (Tessari & Rumiati, 2002).

Une des conséquences d'une remise à jour régulière et du caractère modulaire des représentations du schéma corporel est que celui-ci se montre **adaptable** dans le temps. Cette propriété permet au schéma corporel de prendre en compte les changements graduels dans les propriétés spatiales et anthropométriques des segments corporels, tout au long de la vie. En effet, les tailles absolues et relatives des membres évoluent de manière très importante au cours de la croissance. De même, sur une échelle microgénétique, il a été montré que l'utilisation d'outils ou d'objets impose des changements rapides et transitoires dans le schéma corporel. Ainsi chez le macaque, lors de l'utilisation active d'outils, les champs récepteurs visuels de neurones bimodaux ancrés sur la main peuvent s'étendre vers la pointe de l'outil utilisé (Iriki, Tanaka, & Iwamura, 1996 ; Iriki, Tanaka, Obayashi, & Iwamura, 2001, Maravita & Iriki, 2004). L'existence de ce type de mécanisme d'adaptation est fortement suggérée chez l'Homme, et rendrait par exemple possible l'extension de l'expression des manifestations comportementales de pathologies neuropsychologiques

affectant la perception spatiale comme la négligence spatiale unilatérale (Berti & Frassinetti, 2001) ou l'extinction croisée visuotactile (Farnè & Ladavàs, 2000). L'utilisation active d'outils peut ainsi étendre à l'espace distal des pathologies préalablement limitées à l'espace proximal. Ces changements rendent compte du caractère fonctionnel des adaptations.

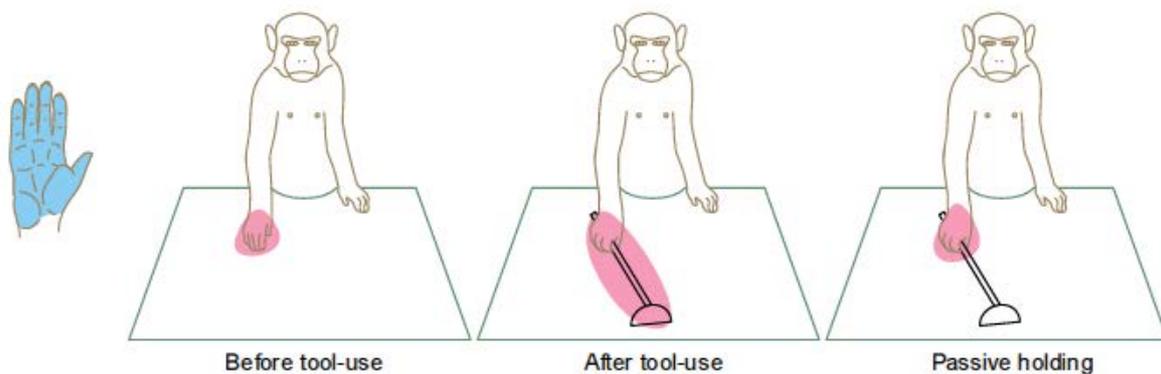


Figure 4 : Changement dans les champs récepteurs proprioceptifs et visuels des neurones bimodaux "distaux" en fonction de l'utilisation d'outils. Adapté de Iriki & Maravita, 2004.

Les nombreux arguments expérimentaux cités ci-dessus montrent également le caractère **multimodal** des représentations du schéma corporel qui sont élaborées principalement sur la base d'input visuel, tactile et proprioceptif. De cette façon une stimulation tactile et une stimulation visuelle présentées au même endroit peuvent être intégrées au sein d'une même représentation dans le schéma corporel et faire référence à une même localisation spatiale (voir par exemple Rorden, Heutink, Greenfield, & Robertson, 1999).

Les représentations impliquées dans le schéma corporel maintiennent donc une certaine **cohérence** dans le temps et l'espace. Cette cohérence joue un rôle majeur dans la conscience de l'agentivité et dans l'attribution de nos expériences corporelles. Un des buts principaux de cette cohérence du schéma corporel est la résolution des discordances inter-sensorielles. En effet, les représentations visuelles et proprioceptives, de la position de la main par exemple, sont toutes deux biaisées par les variabilités et les propriétés spécifiques des différents canaux sensoriels, car le cerveau combine de manière statistiquement optimale ces informations (van Beers, Wolpert, & Haggard, 2002 ; Ernst & Banks, 2002). Ces discordances peuvent être exagérées ou décorrélées par le biais de manipulations expérimentales. Par exemple si l'avant-bras est maintenu dans une position et un angle fixe par rapport au corps, mais que l'on fait vibrer le tendon du biceps, on crée une illusion d'une extension du bras. Si on demande au sujet de toucher son nez tout en lui maintenant les yeux bandés, le sujet éprouve l'impression que son nez grandit à mesure que l'illusion lui donne l'impression que son bras s'étend. Dans ce cas les informations proprioceptives en provenance du bras et les informations tactiles sur le contact du doigt avec le nez sont conservées et maintenues cohérentes entre elles en adaptant la taille perçue du nez (Lackner, 1988). La cohérence globale du schéma corporel est maintenue en altérant la représentation d'un segment unique.

Enfin, le schéma corporel serait à la fois utilisé pour représenter le propre corps du sujet, mais également le corps d'autres personnes, représentant le caractère **interpersonnel** du schéma corporel. Il a par exemple été montré que les participants percevaient mieux les changements de postures lorsqu'ils bougent simultanément leur propre corps de manière compatible avec les mouvements observés (Reed & Farah, 1995). De la même manière, l'encodage et la récupération des actions d'un tiers observées sur vidéo sont facilités par des mouvements du corps congruents avec ces actions, mais pas par des mouvements

incongruents (Tessari & Rumiati, 2002). Ces données suggèrent que les actions auto-générées et observées sont représentées sur la base des mêmes représentations internes : le schéma corporel. Elles apportent également des arguments en faveur du caractère multimodal du schéma corporel puisque les représentations du corps des autres personnes sont nécessairement visuelles alors que la représentation de notre propre corps implique des informations tactiles et proprioceptives.

Notre corps étant nécessairement au cœur de l'environnement tel que nous le percevons, la capacité que nous avons de le représenter comme un objet distinct de l'environnement, possédant des propriétés spécifiques, se révèle d'un intérêt adaptatif majeur dans nos interactions avec l'environnement, et ce tant du point de vue phylogénétique, qu'ontogénétique (Rochat & Striano, 2000). Sur la base de cette « couche fondamentale », l'espace qui nous entoure va pouvoir être perçu et représenté par le cerveau. À l'image des poupées russes, les différentes représentations de l'espace viendraient s'emboîter les unes sur les autres, en différentes couches fonctionnelles. Le concept de schéma corporel représente une base théorique aux différents modèles présentés ci-dessous.

II. 2.2. Différents modèles de ségrégation de l'espace

La proxémie et le modèle de Hall

Le terme de proxémie a été initialement utilisé par Edward Hall, anthropologue culturel, en 1963. Il désigne les « *observations et théories sur l'utilisation de l'espace par l'Homme* ». Il s'agit d'une approche ethnologique des situations de communication et des rapports interpersonnels qui se base sur l'observation du comportement de plusieurs espèces, dont l'Homme. Ces espèces régulent en effet différents comportements en fonction de différentes zones de l'espace. Il remarque qu'il semble y avoir des sphères invisibles, centrées

sur l'individu, qui découpent l'espace en différentes catégories de distances, et qui conditionnent l'apparition de certains comportements comme la fuite ou l'attaque. Ces différentes zones de l'espace sont différentes en fonction des espèces, mais manifestent, au niveau psychologique, les propriétés de représentations spatiales internes supra-ordonnées qui régissent un grand nombre de comportements intra- et inter-espèce (voir figure 5).

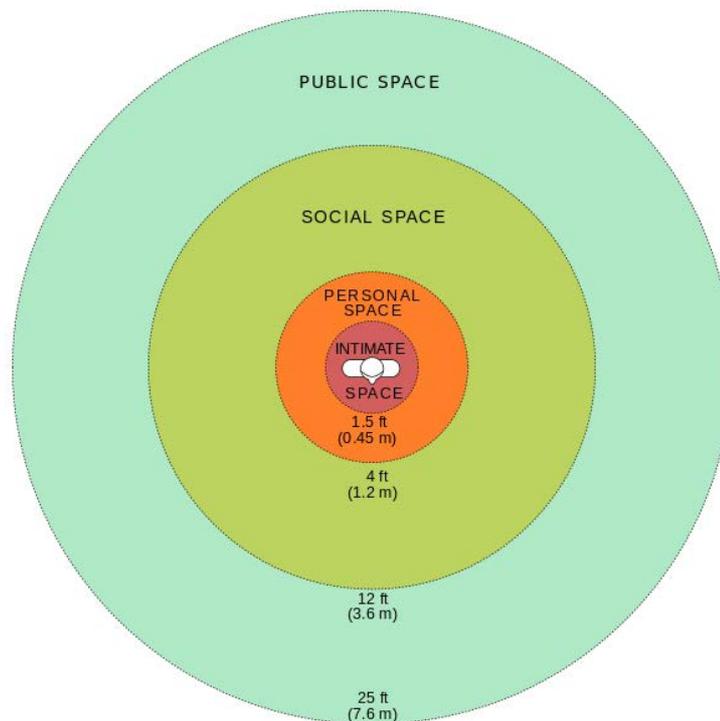


Figure 5 : *Diagramme des bulles de réactions personnelles. Adapté de Hall, 1963.*

Ces observations permettent de situer au niveau phylogénétique l'importance pour un individu de bénéficier de représentations spatiales en lien avec les capacités d'actions dont il dispose. Une espèce bénéficiant d'une vitesse de fuite précise dispose ainsi d'une représentation interne de la zone de l'espace dans laquelle la présence d'un prédateur doit déclencher une réponse adaptative de fuite pour optimiser sa survie. À l'inverse, si la fuite

n'est plus possible, la plupart des espèces dispose d'une représentation de la distance à laquelle un comportement d'attaque sera déclenché, a nouveau dans un but adaptatif évident.

Les travaux de Trevarthen

Les travaux de Colwyn Trevarthen (1968) sur le, ou plutôt les systèmes visuels ont apporté de nombreuses données sur le développement des liens entre les systèmes visuel et moteur dans le contexte de la perception spatiale. Il met en évidence l'existence de différentes cartographies neuronales de l'espace, centrées sur le corps, dans les structures tectales (notamment les collicules supérieurs) et corticales (notamment les aires visuelles primaires) en insistant sur la consistance de l'organisation topographique de ces représentations au sein des espèces et des individus d'une même espèce. Pour lui cette consistance refléterait un des rôles fondamentaux qu'occuperait le cerveau des primates supérieurs, et donc de l'Homme, celui de l'organisation d'actions au sein d'un environnement spatial en 3 dimensions (rejoignant ainsi des prises de positions actuelles de certains chercheurs comme Daniel Wolpert). Il met également en évidence que ces différentes cartes cérébrales sont connectées à des organisations topographiques similaires au niveau des systèmes moteurs liées à l'orientation comportementale (e.g. mouvements oculaires, atteinte et saisie).

Les travaux de Trevarthen s'articulent avec la dissociation des voies visuelles ventrales et dorsales observée chez l'animal et l'Homme (e.g. Ingle, 1971 ; Ungerleider & Mishkin, 1989). Il distingue ainsi chez les primates, 2 fonctions visuelles pour la régulation comportementale, posant ainsi les bases des différents sous-espaces dans les représentations cérébrales de ces espèces (Trevarthen, 1968). Un premier système, ambient (correspondant aux descriptions faites des voies dorsales), et un second, focal (pouvant être assimilé aux voies ventrales) permettraient de rendre compte des différents types de comportements

associés à la perception spatiale, comme la locomotion ou encore l'organisation de gestes vers des objets.

Ces propositions renvoient à celles de Hall sur l'existence de sous-espaces différemment représentés dans le cerveau et répondant des fonctions comportementales elles aussi distinctes. Ce type de modélisation s'avère également d'une plus grande valeur heuristique pour le chercheur en psychologie cognitive. Il postule que ces différents sous-espaces, répondent à des fonctions adaptatives différentes et sont dépendants de traitements de propriétés de l'information visuelle elles aussi différentes et spécifiques. Les subdivisions fonctionnelles de ces espaces représentés sont donc dépendantes de subdivisions similaires dans le traitement de l'information visuelle et le système moteur. Toutefois, il semble important de noter que la simple opposition entre les voies de traitement ventrales et dorsales ne permet pas de rendre compte de la complexité des comportements liés à la perception spatiale.

II. 2.3. Les travaux de Previc

Parmi les modèles actuels de la perception spatiale, celui présentant la plus grande valeur heuristique est celui de Fred Previc, exhaustivement présenté dans « the neuropsychology of 3D space » (Previc, 1998) il présente une synthèse de ses propres travaux et intègre l'état actuel des connaissances dans le domaine de la perception spatiale, mais également les données générales sur l'organisation cérébrale des voies visuelles. Il présente les arguments comportementaux, neuro-anatomiques et neurochimiques sous-tendant une représentation parcellaire des représentations spatiales organisées chez l'Homme en 4 grands domaines comportementaux chacun associé avec, des réseaux corticaux spécifiques, des modalités sensorielles particulières, et un système moteur privilégié. Il distingue les domaines

extrapersonnel focal, d'action et ambiant et un **système péripersonnel** (voir figure X). Une distinction importante est faite dans les représentations spatiales entre d'une part les régions, qualifiées d'extrapersonnelles, concernant des régions de l'espace situées hors de capacités d'actions directes de l'individu et un système péripersonnel concernant les actions directes sur l'environnement dans des régions ne nécessitant pas de déplacement préalable du corps.

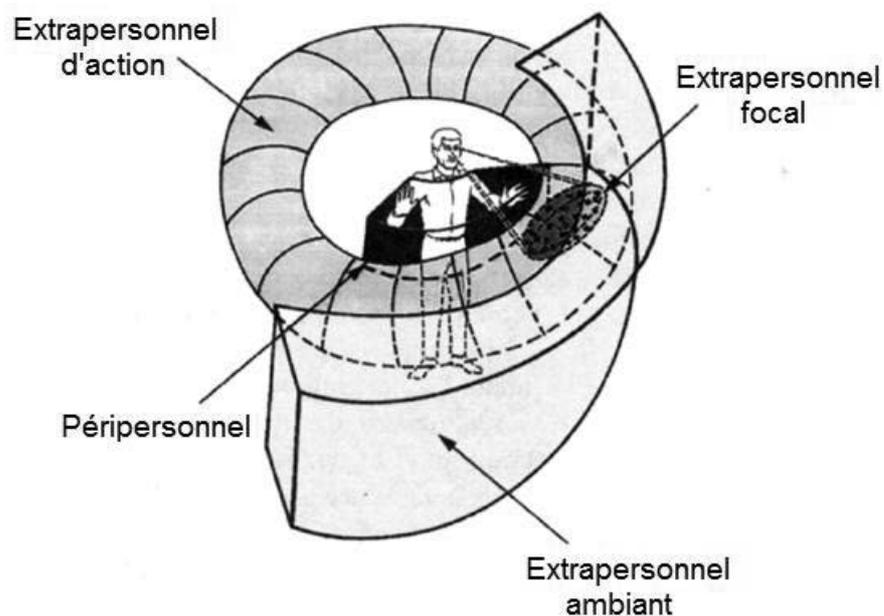


Figure 6 : Représentation des 4 sous-espaces du modèle de Previc (1998).

Au sein du domaine extrapersonnel, l'espace **extrapersonnel focal** est impliqué dans la recherche visuelle et la reconnaissance des objets. Il est lié à l'activité oculaire saccadique permettant la fovéation, i.e. le positionnement des objets et événements de l'environnement en vision centrale. De ce fait, la région de l'espace recouverte par ce domaine est en fait très variable et mobile. Ce domaine recouvre des zones proximales et distales, pouvant s'étendre

de région allant d'une vingtaine de centimètres du corps jusqu'aussi loin que peut porter le regard. Il traite les informations visuelles locales (forme, couleur etc...) disponibles en vision centrale et organise ses représentations spatiales de manière rétinocentrique. Il est sous-tendu par des réseaux neuronaux correspondant majoritairement à la voie parvocellulaire ventrale et implique à la fois les aires corticales inféro-temporale, frontale (en lien avec les mouvements oculaires) et intra-pariétale latérale mais également les structures sous-corticales du noyau caudé, du pulvinar latéral et de manière logique des collicules supérieurs.

Le second système **extrapersonnel**, qualifié **d'action**, est lié à la navigation au sein de l'environnement 3D, à la mémoire spatiale des scènes visuelles et à l'orientation comportementale générale vers les cibles au sein de l'environnement. S'étendant des limites de l'espace péripersonnel jusqu'à environ 2m de distance, il code l'espace selon un référentiel centré sur le regard. Il implique principalement les systèmes visuels et auditifs (jugement de localisation relatif à l'orientation du regard), mais avec également une implication des systèmes olfactif et vestibulaire. Les représentations centrées sur le regard impliquent donc une participation des systèmes oculomoteurs saccadiques, mais également ceux dévolus à l'orientation de la tête et du tronc (principalement dans leurs aspects horizontaux). Il est sous-tendu par des structures corticales temporales supérieures et médianes (desservis par les voies visuelles parvo et magno-cellulaire ventromédiales) ainsi que l'hippocampe et les cortex cingulaires postérieur et frontal ventromédian. Ses relations avec les mouvements oculaires impliquent également les collicules supérieurs et son caractère multimodal le met en lien avec le thalamus antérieur.

Enfin le troisième et dernier système **extrapersonnel, ambiant**, concerne le contrôle postural, la locomotion et l'orientation spatiale générale. Ce domaine comprend les régions de l'espace les plus distales et organise ses représentations sur un référentiel géocentré en relation avec l'axe de la force de gravité. Il est en lien avec le système visuel (détection des

mouvements ambiants et détection des pentes), mais également les systèmes vestibulaires, somato-sensoriel et proprioceptif (extraction de la verticale et détection de l'axe de la force de gravité). Il implique les systèmes moteurs de locomotion (mouvement des jambes principalement), de la tête et du cou. Il est sous-tendu par les aires corticales pariéto-occipitales (desservis par les voies visuelles dorsales), rétinotopographique et dorso-frontale ainsi que par les structures sous-corticales du thalamus ventropostérieur, les noyaux vestibulaires le putamen et implique également une intervention des structures cérébelleuses.

Enfin, le domaine **péripersonnel** permet l'organisation des comportements d'atteinte, de saisie et de manipulation directe, étant par exemple lié avec les comportements de prise alimentaire. Il code l'espace proche, directement manipulable dans un référentiel égocentré (lié principalement à la position du tronc et des épaules), et concerne donc une région relativement variable, allant de la surface du corps et s'étendant jusqu'aux limites des capacités d'actions directes de l'individu. Cette région est variable, car elle doit s'adapter aux modifications ontogénétiques des capacités d'action, lors de la croissance par exemple, mais également aux modifications microgénétiques, lors de l'utilisation d'outils étendant les capacités d'actions directes ou à la suite de lésions ou d'amputations réduisant celles-ci. Fondamentalement multisensoriel, il est lié à de multiples systèmes perceptifs, notamment, mais pas uniquement, la vision, les systèmes somatosensoriels et proprioceptifs, le système vestibulaire et le goût. Étant en relation avec les comportements de manipulation, il est lié aux systèmes moteurs organisant les mouvements de bras, des mains et les mouvements oculaires de poursuite et de vergence. Les représentations de l'espace péripersonnel est également lié, dans une moindre mesure, aux saccades oculaires, et aux mouvements du torse (accompagnant par exemple les gestes d'atteinte). Il est sous-tendu par les structures corticales pariéto-occipitales inférieures (desservis par la voie visuelle ventro-dorsale), dorso et post-arquéés frontale (les aires prémotrices et motrices supplémentaires), le cortex cingulaire

postérieur, mais également par le cervelet et les structures sous-corticales du putamen et du globus pallidus (structures appartenant aux ganglions de la base, fortement impliquées dans la régulation du contrôle moteur).

C'est sur cette base théorique que le présent travail de thèse se propose de considérer et d'étudier le développement ontogénétique de la perception spatiale en relation avec les compétences motrices. Les travaux de Previc nous donnent une base théorique fondamentale pour l'étude et la compréhension des trajectoires développementales de la perception de l'espace péripersonnel et de ses déterminants. Cette modélisation de l'organisation des représentations spatiales met en effet en évidence la complexité et la multiplicité des sources d'informations permettant leurs constructions.

II. 3. La perception de l'espace péripersonnel

II. 3.1. Aspects comportementaux

Dans le modèle de Previc, les représentations parcellaires et spécifiques de l'espace sont mises en lien avec un répertoire comportemental également spécifique. Dans ce cadre, l'étude neuropsychologique de patients cérébrolésés, et présentant diverses pathologies affectant la perception spatiale, a apporté des arguments empiriques en faveur de cette distinction entre espaces péripersonnel et extrapersonnel, et a confirmé certaines des propriétés attribuées à ces représentations spatiales. Berti & Frassinetti (2000), rapportent par exemple le cas d'un patient qui à la suite d'un accident vasculaire cérébral souffrait de négligence spatiale unilatérale (NSU). Ce patient présentait une négligence spatiale restreinte uniquement à l'espace péripersonnel. Lorsque l'on mesure les déficits de ce patient à l'aide d'une tâche classique de bissection de lignes dans l'espace péripersonnel, on observe une forte négligence avec une déviation du milieu perçu des stimuli présentés du côté

controlésionnel. Lorsque l'on demande à ce même patient de réaliser cette tâche dans l'espace lointain, à l'aide d'un pointeur laser, on observe une réduction significative des symptômes de négligence. Cependant, lorsque l'on étend expérimentalement ses capacités d'action pour réaliser cette tâche dans l'espace lointain (préalablement inaccessible directement) à l'aide d'un outil (un simple bâton), on observe une extension de la pathologie à cette région préalablement épargnée. La manipulation active d'un outil rend ainsi visible l'extension des représentations de l'espace péripersonnel par l'extension de la manifestation de la pathologie.

Des observations similaires, réalisées auprès de patients présentant une hémignégligence n'affectant que l'espace péripersonnel, ou au contraire extrapersonnel, ont été apportées (Coello, 2005). Ces observations, ainsi que celles réalisées auprès de patients présentant d'autres types de déficits et de pathologies affectant la perception spatiale, apportent un grand crédit au concept d'une représentation dynamique et multimodale de l'espace d'action. Ainsi, une étude réalisée auprès de 7 patients présentant une extinction croisée visuotactile apporte des conclusions similaires sur l'existence de représentations de l'espace péripersonnel, élaborées sur une base fonctionnelle, et rapidement remises à jour (Farnè & Ladavàs, 2000). Les patients présentant une extinction spatiale ont des difficultés à détecter la présentation simultanée de stimulations dans des localisations homologues des 2 hémichamps. Lorsqu'une stimulation ipsilésionnelle est présentée au patient, celle-ci est correctement détectée et perçue consciemment. Lorsque cette stimulation est présentée du côté controlésionnel dans une localisation homologue, elle est également correctement détectée dans la majorité des essais. Mais lorsque les 2 stimulations sont présentées simultanément, seule la stimulation présentée du côté ipsilésionnel est détectée, on dit alors qu'une stimulation a éteint l'autre. Dans le cas de l'extinction visuotactile, une stimulation tactile ou visuelle peut éteindre une stimulation délivrée dans l'autre modalité dans une localisation spatiale homologue. Dans l'étude de Farnè et Ladavàs. (2000), les auteurs ont

testé chez leurs patients la possibilité qu'une stimulation visuelle délivrée près de la main puisse éteindre une stimulation tactile sur l'autre main. Les auteurs rapportent une extension de la pathologie après une utilisation active d'un outil : des stimulations visuelles délivrées au bout de l'outil tenu dans la main isplésionnelle (un râteau de croupier) se sont révélées capables d'éteindre des stimulations tactiles sur la main controlésionnelle. Des études ultérieures ont également confirmé la nature fonctionnelle de ces représentations spatiales, ainsi lorsque l'on fait par exemple varier la position du râteau sur le manche de l'outil, la zone de l'espace affectée par la pathologie, et donc les représentations spatiales de cet espace, sont également modulées également pour suivre la position du râteau (Bonifazi, Farnè, Rinaldesi & Làdavas, 2007 ; Farnè, Serino & Làdavas, 2007). Toutes ces observations mettent en évidence la rapidité des mécanismes d'adaptation de ces représentations spatiales. Un cerveau adulte serait véritablement un expert de la perception spatiale, intégrant de multiples sources d'informations pour en construire les représentations. Ces représentations relativement complexes de l'espace d'action, vient servir de base permettant de construire et adapter notre répertoire comportemental, comme organiser nos comportements d'atteinte ou de saisie. En disposant de représentations de notre espace péripersonnel, nous pouvons par exemple évaluer les objets et événements de l'environnement en fonction de leur caractère directement atteignable.

Perception des limites de l'espace d'action : l'atteignabilité

Au sein du champ de recherche de l'atteignabilité ("*reachability*"), i.e. la capacité d'un individu à percevoir les limites de son espace d'action, le paradigme classique consiste à demander à un sujet une réponse verbale sur sa capacité à atteindre une cible située à une certaine distance, comme s'il avait à réellement effectuer le geste. L'implémentation de ce

type de paradigme permet d'explorer les déterminants des jugements d'atteignabilité ainsi que leurs interactions avec la motricité et le comportement. Ce type de protocole a été initialement proposé par Carello, Groszofsky, Reichel, Solomon & Turvey (1989) dans une série d'expériences psychophysiques qui a posé les bases de ce champ de recherche. En présentant un grand nombre de cibles, et en faisant varier de manière paramétrique leurs distances de présentation, il est ainsi possible de mesurer la distance perçue comme étant tout juste atteignable en observant la distribution des réponses positives et négatives en fonction de la distance des cibles. Le seuil perçu d'atteignabilité correspond donc par définition, aux limites de l'espace d'action.

Dans l'étude princeps, Carello et al. (1989) ont exploré l'influence de différents facteurs sur la perception de ce qui est atteignable. Dans une première expérience, ils ont manipulé les capacités d'actions potentielles des participants, assis en face d'une surface sur laquelle les différentes cibles étaient présentées, en leur demandant d'estimer les limites de leur espace d'action s'ils étaient uniquement autorisés à tendre le bras (condition 1 ddl) ou s'ils avaient également la possibilité de pencher le torse (condition 2 ddl). La méthodologie utilisée leur a permis de mesurer pour chaque sujet le seuil qu'il percevait comme tout juste atteignable sans aucun feedback d'une éventuelle performance réelle, et ensuite la distance réellement atteignable dans chacune des conditions. De manière générale, les sujets donnent une estimation des limites de leur espace d'action très corrélées avec leurs capacités réelles, mais montrent une tendance à produire une erreur constante dans le sens de la surestimation. Cette erreur constante est toutefois plus importante dans la condition 1 ddl que dans la condition 2 ddl, qui semble offrir un cadre plus écologique et correspond à une situation plus proche de la vie réelle où l'organisation d'un comportement d'atteinte potentielle engagera l'ensemble du corps et sollicitera l'ensemble des degrés de liberté disponibles. Carello et collaborateurs ont également testé l'influence de la hauteur relative de la surface de

présentation des cibles ainsi que sa distance par rapport au sujet, qui se tenait debout ou assis devant la surface de présentation. Les résultats montrent l'existence d'un gradient par rapport à ces 2 paramètres avec un optimum d'adéquation entre les distances réelles et perçues atteint pour une distance et une hauteur de table donnée. L'erreur constante étant minimisée lorsque la situation de présentation correspond à une situation plausible (confortable) d'un point de vue écologique : une surface trop loin ou trop haute sans possibilité de se déplacer semble maximiser l'erreur constante dans le sens de la surestimation. De manière générale, les résultats obtenus dans cette étude sont compatibles avec le cadre théorique de la perception directe, ou une affordance d'atteignabilité est perçue sans nécessairement de feedback direct sur la réalisation effective d'un geste d'atteinte orienté vers ces cibles particulières. Ils sont également congruents avec la conception d'un espace d'action directement calibré par les potentialités d'action. La distance perçue comme étant atteignable étant en effet très proche de la distance réellement atteignable par les sujets. Les résultats montrent également l'importance du caractère fonctionnel des liens entre la perception et la motricité dans le jugement d'atteignabilité comme en témoigne la meilleure adéquation entre distance perçue et réelle lorsque les paramètres de présentation autoriseraient un geste potentiellement réalisable « en l'état » dans la vie quotidienne. D'autres résultats viennent confirmer qu'à l'inverse lorsque les contraintes posturales sur ce geste potentiel augmentent, l'erreur constante augmente également (Rochat & Wraga, 1997 ; Gabbard, Cordova & Lee, 2007). De manière similaire, lorsque l'excentricité de la cible par rapport à l'effecteur utilisé pour l'estimation (classiquement la main préférentielle) augmente, une augmentation de l'erreur constante (dans le sens de la surestimation) est également observée (Fischer, 2005). Il semblerait que l'estimation des limites de l'espace d'action dans ce cas dépende principalement de la distance latérale entre la cible et l'effecteur utilisé pour le jugement, plutôt que du choix de l'effecteur préférentiel pour ce type de mouvements, i.e. de la latéralité (Carey, Hargreaves &

Goodale, 1996 ; Gabbard & Rabb, 2001 ; Fischer, 2005 ; Gabbard, Ammar & Rodrigues, 2005a, 2005b).

L'estimation des limites de l'espace péripersonnel semble donc calibrée sur la représentation de propriétés physiques du corps (la longueur du bras par exemple) et sur ses capacités d'action (Coello, 2005 ; Gabbard & Ammar, 2005). Ceci est confirmé par l'observation du cas de la patiente G.L, présentant une déafférentation sensorielle suite à une polyneuropathie sensorielle. Cette affection a laissé G.L dans l'incapacité de recevoir tout retour proprioceptif en dessous du cou, et les représentations internes qu'elle construit sont donc uniquement basées sur les retours visuels qu'elle a de son propre corps. Confrontée à ce type de mesure des limites de l'espace d'action, on observe que ses estimations sont entièrement décorrélées de ses capacités d'action réelles et de la longueur de son bras (Coello, 2005). La qualité et la quantité de l'information visuelle vont également influencer les jugements d'atteignabilité. La présence d'un environnement texturé par rapport à une condition d'obscurité offre une série d'indices spatiaux rétiniens qui permettent une perception plus fine de l'espace et naturellement de meilleures performances dans le jugement d'atteignabilité (Coello & Iwanow, 2006). Cette amélioration des performances est également visible chez la patiente G.L qui en l'absence de retour proprioceptif montre un poids plus important de la modalité visuelle dans la construction de ses représentations spatiales.

Ces résultats mettent en évidence que les jugements d'atteignabilité se basent sur des représentations multisensorielles du corps en action pour évaluer la possibilité d'atteindre ou non une cible selon la situation expérimentale. Le caractère fonctionnel et dynamique de ces représentations est également suggéré par la capacité à intégrer des paramètres extrinsèques dans la réalisation de ce type de jugements, comme le fait d'utiliser un outil qui étend les capacités d'action (Bonifazi, Farnè, Rinaldesi & Làdavas, 2007 ; Farnè, Serino & Làdavas, 2007). Les travaux de Farnè et al. ont également montré que le référentiel qui semble coder la

position de l'effecteur moteur et de la cible dépend fonctionnellement de la tâche (Brozzoli, Pavani, Urquizar, Cardinali & Farnè, 2009), e.g. la main dans le cas d'un mouvement d'atteinte pour la saisie ("react-to-grasp"). De manière similaire, c'est l'utilisation active d'outils et l'intention d'action avec celui-ci qui affecte la perception spatiale dans le cadre des jugements d'atteignabilité (Witt, Proffitt & Epstein, 2005).

D'autres facteurs viennent bien évidemment affecter les jugements d'atteignabilité, par exemple certaines propriétés intrinsèques de la cible. Le cerveau semble ainsi anticiper les contraintes temporelles de réalisation d'un geste d'atteinte réellement exécuté comme le suggère l'observation d'une surestimation plus importante pour une cible se déplaçant vers le sujet par rapport à une cible immobile et la sous-estimation des jugements lorsque le déplacement de la cible se fait en s'éloignant du sujet (Fischer, 2000). Dans une situation écologique, une estimation de l'atteignabilité d'un objet est en effet généralement suivie de la réalisation effective d'une tentative d'atteinte de cet objet. Si celui-ci est en mouvement (approche ou éloignement), je dois donc être capable d'anticiper son déplacement pendant la réalisation du geste d'atteinte. Cette anticipation permet d'intercepter la cible le plus tôt possible lorsqu'elle pénètre notre espace d'action ou lorsqu'elle s'apprête à le quitter. Le jugement perceptif d'atteignabilité semble donc bien prendre en compte ce paramètre et adapte les estimations non seulement en fonction des paramètres posturaux, mais également de ceux propres à la cible.

Plusieurs explications théoriques mutuellement compatibles ont été proposées pour rendre compte de cette erreur constante de surestimation des limites de l'espace d'action. Les limitations du caractère écologique des gestes d'atteinte potentiels dans les différents contextes expérimentaux présentés ci-dessus (limitation du nombre de ddl, consigne stricte ne permettant pas au sujet d'imaginer le geste qu'il réaliserait naturellement...) peuvent expliquer en partie cette erreur constante. En effet, la réalisation effective d'un geste d'atteinte en

situation naturelle se fait rarement avec une limitation spontanée des ddl lors du mouvement (utiliser une extension du bras sans décoller le dos de la chaise par exemple) et la réduction de l'erreur constante, lorsque ces contraintes diminuent, semble apporter des arguments en faveur de cette hypothèse dite de l'engagement du corps entier (Carello, Grosfshy, Reicher, Solomon & Turvey, 1989; Mark, Ncmeth, Garciner, Dainoff, Paassche & Duffy 1997 ; Rochat & Wraga, 1997 ; Fischer, 2000 ; Gabbard et al., 2007). Il a également été proposé que cette surestimation puisse être en partie attribuée à des représentations biaisées des contraintes posturales lors de l'estimation des limites de l'espace d'action forçant le sujet à adopter une stratégie tantôt conservatrice (induisant une sous-estimation des limites) lorsque la posture est perçue comme instable et ne permettant pas la réalisation d'un geste trop loin du corps et tantôt libérale (induisant une surestimation) lorsque la posture est perçue comme suffisamment stable pour autoriser une plus grande prise de risque sans provoquer de chute (hypothèse de la stabilité posturale, Robinovitch 1998). Une troisième hypothèse a également été proposée en fonction de l'état de confiance générale du système cognitif sur les capacités d'action (l'hypothèse de l'état cognitif, Gabbard et Ammar, 2005 ; Gabbard et al. 2007 ; Gabbard, Cacola & Cordova, 2009a ; voir également Delevoye-Turrell, Bartolo & Coello, 2010 pour une revue). Il a en effet été observé que des facteurs émotionnels et/ou thymiques, tel que l'anxiété, peuvent affecter la perception et la réalisation d'affordances (Bootsma, Bakker, Van Snippenberg, & Tdlohreg, 1992 ; Pijpers, Oudejans, Bakker, & Beek, 2006), et que ces facteurs pouvant influencer de manière plus générale les représentations des objets et événements de l'environnement (Pepping & Li, 2000 ; Pijpers, Oudejans, Bakker, & Beek, 2006 ; Pijpers, Oudejans & Bakker, 2007).

Ces nombreuses données comportementales soulignent la complexité de la mise en place et de l'adaptation des représentations de l'espace d'action. Celles-ci résultent en effet de l'intégration de très nombreux facteurs, issus de modalités sensorielles elles aussi différentes.

Les arguments empiriques sous-tendant l'idée d'une telle intégration posent également la question du substrat neuronal sous-tendant ces mécanismes.

II. 3.2. Aspects neurophysiologiques

Le phénomène d'intégration multisensorielle implique l'existence de populations de neurones spécifiques, recevant les différents signaux à intégrer. Dans le cadre des représentations de l'espace péripersonnel, ces populations doivent également présenter des propriétés spécifiques. En effet, ces neurones doivent présenter un champ récepteur s'étendant sur plusieurs modalités (notamment visuelle et proprioceptive), mais également présenter une spécificité spatiale dans les limites de ces champs récepteurs. En effet, si les limites d'un champ récepteur tactile en référence à l'espace péripersonnel ne posent pas de problèmes fondamentaux, dans le cas de la modalité visuelle, il faut que les limites de sensibilité de ces neurones puissent rendre compte d'une telle distinction entre espaces péripersonnel et extrapersonnel. Les données comportementales telles que présentées précédemment apportent des arguments en faveur de l'existence de telles populations de neurones chez l'Homme (Gray & Tan, 2001 ; Ro, Wallace, Hagedorn, Farnè & Pienkos, 2004 ; Farne, Pavani, Meneghello, & Ladavas, 2000 ; Berti & Frassinetti, 2000).

Les contraintes éthiques et méthodologiques rendent la détection de ce type de population de neurones difficiles chez l'Homme. Toutefois, l'existence de neurones homologues répondant aux propriétés listées ci-dessus a été mise en évidence chez différentes espèces de primates non humains, notamment à l'aide de techniques d'implantation d'électrodes profondes et d'enregistrements unitaires. Chez le macaque par exemple, Iriki, Tanaka & Iwamura (1996) ont rapporté l'existence de neurones répondant spécifiquement à des stimulations présentées dans l'espace péripersonnel. Ces neurones possèdent un champ

récepteur tactile recouvrant le bras et l'épaule, et un champ récepteur visuel couvrant les régions proche du bras. Les limites de ces champs récepteurs visuels étant définies par les régions pouvant être atteintes par des mouvements de ce bras. Cette population de neurones s'active donc spécifiquement lors de la présentation de stimulations visuelles situées au sein de l'espace péripersonnel.

Des populations de neurones ayant des propriétés similaires ont été retrouvées dans les aires F4 et F5 (cortex post-arqué et prémoteur) et également dans le putamen des macaques. Ils répondent aux critères de double sélectivité spatiale, visuelle et proprioceptive, évoquée ci-dessus, mais présentent également la particularité de coder l'espace péripersonnel selon un référentiel centré sur le corps, puisque les patterns d'activations observés sont indépendants de l'orientation du regard (Gentillucci, Scandolara, Pigarev & Rizzolatti, 1983 ; Grazziano & Gross, 1998 ; Grazziano & Gross, 1996 ; Grazziano, Yap, & Gross, 1994 ; Grazziano & Gross, 1993). De plus, ces neurones présentent la propriété d'étendre leurs champs récepteurs visuels en fonction de l'utilisation active d'outils, montrant ainsi le caractère fonctionnel du codage de l'espace d'action (Maravita & Iriki, 2004).

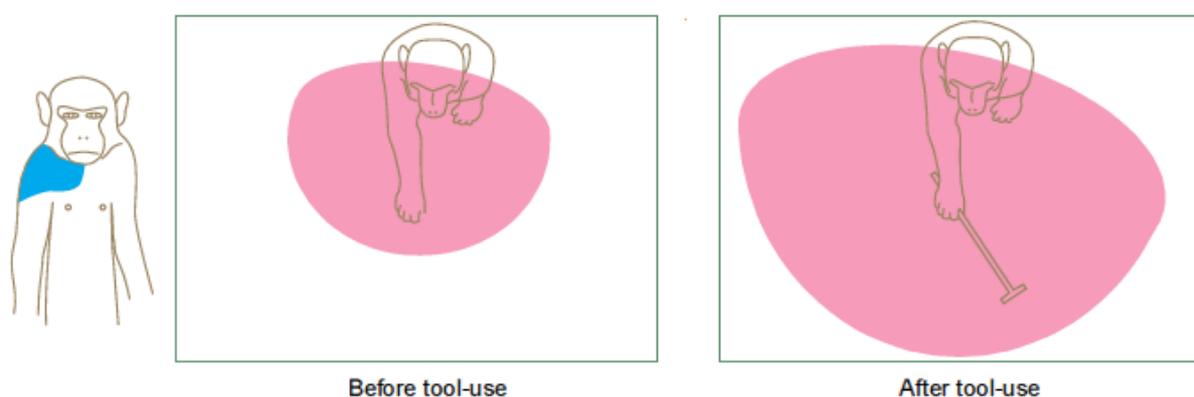


Figure 7 : *Changement dans les champs récepteurs proprioceptifs et visuels des neurones bimodaux "proximaux" en fonction de l'utilisation d'outils. Adapté de Iriki & Maravita, 2004.*

D'autres données montrent également le rôle du cortex pariétal, notamment au niveau de l'aire intrapariétale ventrale, dans le codage de l'espace péripersonnel ainsi que l'organisation attentionnelle dans cette région (Colby & Goldberg, 1999 ; Grazziano & Gross, 1994). D'après une étude de Caggiano, Fogassi, Rizzolatti, Thier & Casile (2009), les populations de neurones dits miroirs et canoniques, montrent une sensibilité spatiale permettant une discrimination entre espaces péri et extrapersonnel. Dans cette étude, les auteurs ont enregistré chez le singe les réponses d'une population d'une centaine de neurones miroir de l'aire F5 d'un macaque. Parmi tous ces neurones, environ 25% présentaient une réponse sélective à la vision d'actions réalisées dans l'espace extrapersonnel du singe et un autre 25% présentait une sélectivité inverse pour les actions réalisées dans son espace péripersonnel (la moitié restante ne présentant pas de sélectivité spatiale et répondant à la vision de geste indépendamment de leurs localisations spatiales). Ces résultats montrent qu'au sein de l'aire F5 du macaque les systèmes de neurones miroirs, en plus de coder les propriétés basiques des actes moteurs observés (sélectivité gestuelle), codent également la distance relative à l'observateur à laquelle ces actions sont réalisées (sélectivité spatiale).

Ces données animales sont à mettre en relation avec des observations en imagerie fonctionnelle réalisées chez l'Homme qui ont pu mettre en évidence, à l'aide de techniques d'imagerie fonctionnelle, des structures cérébrales présentant des patterns d'activations avec des propriétés similaires. Nous pouvons par exemple évoquer le rôle du cortex pariéto-occipital supérieur dans le codage de l'action, dont l'activation est modulée en fonction du caractère atteignable ou non de la cible présentée (Gallivan, Cavin-Pratesi & Culham, 2009). L'ensemble des données humaines et animales recueillies dans ce domaine suggère également le caractère automatique et rapide de ces activations et du codage de la localisation spatiale des objets.

II. 3.3. Aspects développementaux

Calibration dynamique : microgénése

Nous avons déjà abordé dans les parties précédentes le caractère dynamique des représentations spatiales du corps et de l'espace d'action en citant notamment l'adaptabilité fonctionnelle de ces représentations à l'utilisation active d'outils, tant au niveau comportemental (Farnè & Ladavas, 2000) que neuronal (Iriki, 2006). D'autres données montrent également la dépendance à la calibration visuomotrice des représentations de l'espace d'action avec la production d'action et la perception des conséquences de ces actions. En effet, lorsque l'on décorrèle progressivement l'action de ses conséquences perçues, en donnant aux sujets un feedback biaisé, on perturbe également les jugements perceptifs ultérieurs dépendant de ces mêmes capacités d'action (Bourgeois & Coello, 2012). Dans leur étude, Bourgeois & Coello font exécuter des mouvements de pointage à des sujets avant de mesurer de manière classique les limites de leur espace d'action. Lors de la tâche motrice de pointage vers des cibles visuelles, des feedbacks réels ou décalés spatialement leur étaient fournis. De manière similaire à l'utilisation active d'outil, les sujets ayant reçu des feedbacks s'éloignant progressivement de leurs performances réelles lors de la tâche de pointage émettaient des jugements d'atteignabilité avec une surestimation de plus en plus importante. De manière symétrique, lorsque les feedbacks biaisés visaient à réduire leur espace d'action, on observait une réduction comparable de la distance perçue comme atteignable lors d'une tâche de jugement ultérieure.

Ces résultats montrent que les représentations spatiales sur lesquelles se basent la perception des limites de l'espace péripersonnel sont **rapidement remises à jour** en fonction des capacités d'actions réelles de l'organisme, mais également que leurs constructions est

également **dépendantes des conséquences perçues** des actions dans l'environnement et d'une calibration visuomotrice.

Ontogenèse

Dès la naissance, l'exploration systématique de l'environnement et des conséquences sensorielles de l'action par le bébé, la maturation structurale et fonctionnelle du système nerveux, ainsi que l'évolution de ses capacités d'intégration sensorielle, vont lui permettre de construire et de calibrer les représentations de l'environnement et de ses capacités d'action (Clifton, Rochat, Robin & Berthier, 1991 ; Field 1976, Yonas and Hartman 1993). Ainsi, dès l'âge de 5 à 8 mois, les enfants montrent une nette diminution dans la fréquence des productions spontanées de gestes d'atteinte vers les objets proches d'eux, lorsque ceux-ci sont placés à proximité de la limite de leur espace péripersonnel ou au-delà (Rochat, 1992 ; Rochat & Goubet, 1995). Chez des enfants du même âge, la production de gestes d'atteinte dépend également de leur niveau de contrôle postural, les enfants ne maîtrisant pas ou peu la posture assise produisent moins de gestes d'atteinte orientés vers des objets situés aux limites de leur espace d'action (Rochat & Goubet, 1995). À partir de 3 ans, les enfants semblent en mesure de juger ce qui est atteignable pour eux-mêmes et pour d'autres personnes, ce qui semble indiquer un certain degré de maturation des représentations spatiales et corporelles de l'enfant lui permettant de réaliser des jugements interpersonnels (Rochat & Goubet, 1995). Toutefois, l'intégration de contraintes posturales complexes dans les jugements d'atteignabilité est encore difficile pour des enfants de 7 ans (Gabbard, Cacola & Cordova, 2009b). Lorsqu'on compare leurs performances à celles d'adultes dans une tâche de jugements des limites de l'espace péripersonnel, on observe une surestimation systématique et plus importante chez les enfants que chez les adultes. Les principales observations effectuées semblent ainsi attribuer

aux enfants des capacités de jugements des limites de l'espace péripersonnel relativement adaptées, mais toutefois différentes de celles de l'adulte (Gabbard, Cordova & Ammar, 2007, Gabbard, Cordova, & Lee, 2009a ; Gabbard, Cacola & Cordova, 2009b). Les conclusions de Gabbard et de ses collaborateurs suggèrent une relative stabilité de ces capacités durant l'enfance, mais concluent sur l'existence d'un biais de surestimation dans les jugements d'atteignabilité plus important chez les enfants que chez les adultes. Il est cependant difficile de déterminer le véritable profil de la trajectoire développement de ce type de jugement au regard des données recueillies par Gabbard et son équipe. En effet, d'importantes contraintes méthodologiques viennent à notre sens limiter la mesure psychophysique d'un véritable seuil d'atteignabilité et, par conséquent, l'interprétation en termes de biais de surestimation, et de différence de ce biais entre les différentes populations d'enfants et d'adultes testées. En effet, la mesure de seuil utilisée dans ces études est caractérisée par un faible nombre de distances présentées pour effectuer la mesure. Toutefois, une observation plus approfondie des données de ces études, notamment Gabbard, Cordova & Ammar (2007), montre d'une part, de grandes différences dans les profils de réponses entre enfants et adultes et d'autre part, des différences entre les différents groupes d'âge d'enfants testés. Ainsi, si les enfants du groupe de 6 ans et demi et 8 ans et demi présentent des profils de réponse très semblables entre eux, à l'inverse, les enfants de 10 ans et demi présentent un profil plus proche de celui observé pour les adultes que de celui des enfants plus jeunes. Ces données suggèrent, selon nous, des différences à la fois quantitatives, i.e. des estimations des limites de l'espace péripersonnel différentes en termes de seuils mesurés, mais également des différences qualitatives entre ces populations d'enfants et d'adultes, i.e. des jugements et des processus de sélections de l'information de natures fondamentalement différentes, différences rendues visibles par les différences des profils de réponses.

Conclusion

La construction d'une représentation de l'espace péripersonnel implique de nombreux facteurs. La **modalité visuelle** a une implication privilégiée dans la perception spatiale. L'utilisation des indices visuels sur la distance des objets (indices rétinien et extrarétinien de distance), s'appuie sur un système visuel adapté et mature (Cutting & Vishton, 1992). De même, nous avons évoqué le rôle nécessaire et fondamental des représentations du **schéma corporel** et **des capacités d'action** de l'organisme, sur la perception des limites de l'espace d'action. La maturation fonctionnelle et structurale du système moteur et de représentation de l'action est donc également fondamentale et nécessaire. L'interdépendance fonctionnelle de la perception et de l'action représente 2 faces d'un même phénomène au sein de cycles perceptivo-moteur de traitement de l'information (Berthoz, 1997 ; Fuster, 2004). Ces interactions nécessitent donc également une certaine maturation des mécanismes d'intégration de l'information, au niveau intra et intermodale. De manière plus spécifique, la compréhension de la nature des processus de **codage spatial** des objets, mais également des **actions**, au sein de l'environnement nous permet de préciser les interactions entre la perception et l'action dans la perception spatiale.

Selon les termes du modèle de Fischer, l'ensemble de ces éléments constitue les bases nécessaires au développement d'une compétence dynamique spécifique dont les déterminants fonctionnels et structuraux sont maintenant relativement bien connus chez l'adulte: la perception spatiale. L'acquisition et le développement de cette compétence impliquent donc celui de chacun des éléments listés ci-dessus et leur coordination au sein d'un système de contrôle relativement complexe. Une étude approfondie des fonctions de croissance des différents éléments nous permet alors de mieux cerner et comprendre les étapes de la mise en place des compétences spatiales au cours du développement. En repérant ainsi les discontinuités comportementales dans la dynamique développementale des processus

constituants de la perception spatiale, il serait possible de déterminer la dynamique temporelle de ces acquisitions et ainsi dégager une période d'intérêt pour l'étude de la perception spatiale.

Chapitre III. Discontinuités et synchronies développementales du système visumoteur : définition d'une période d'intérêt

The most exciting phrase to hear in science, the one that heralds new discoveries, is not 'Eureka!' (I found it!) but 'That's funny ...'

Isaac Asimov

To be conscious that you are ignorant is a great step to knowledge.

Benjamin Disraeli

III. 1. Aspects visumoteurs

III. 1.1. Le développement du système visuel

Rappels

La maturation fonctionnelle du système visuel est extrêmement précoce chez l'humain, puisque les premières expériences et stimulations visuelles (bien que relativement pauvres et peu nombreuses) nous sont offertes dès la vie intra-utérine. À la naissance, la quantité de stimulation de la modalité visuelle va naturellement augmenter de manière radicale, imposant un rythme rapide d'évolution du système sensoriel et perceptif, tant au niveau qualitatif que quantitatif. La nature des représentations visuelles précoces sera donc profondément affectée par l'évolution des traitements visuels. Les propriétés de bas niveau du système visuel, telles que par exemple la sensibilité au contraste, au mouvement et, les capacités d'accommodation vont rapidement évoluées au cours de la première année de vie, avec l'alternance successive

de phases d'améliorations rapides et de périodes intermédiaires de latence (Atkinson, 2000 ; Braddick et al, 1979 ; Banks, 1980 ; Wattam-Bell, 1996 ; Wattam-Bell et al., 2010 ; Braddick, Atkinson & Watam-Bell, 2003). D'importantes modifications physiologiques, renvoyant à la maturation de l'œil lui-même, sont également observées pendant les premières années de vie. La distribution des récepteurs sur la rétine va ainsi grandement se modifier durant la première année et leur densification au niveau centrale va permettre la création d'une fovéa (Dias Arayaa, & Provisa, 1992 ; Youdelis, & Hendrickson, 1986 ; Graven & Browne, 2008). À un niveau plus périphérique, les réseaux neuronaux associés à la perception visuelle vont également évoluer très rapidement, avec la myélinisation progressive des axones le long des voies de traitements visuelles sous-corticales, puis corticales (Garey & De Courten, 1983 ; Friede & Hu, 1967 ; Yakovlev, & Lecours, 1976), mais également avec la création et la sélection (par élagage axonal) de connexions synaptiques dans ces mêmes réseaux (Huttenlocher, de Courten, Garey, & van der Loos, 1982 ; Garey & De Courten, 1983), ou encore le regroupement progressif de certaines populations de neurones au niveau, par exemple, des colonnes de dominance oculaire (Shimojo, Birch & Held, 1983 ; Held, 1985 ; Atkinson & Braddick, 2003). Les principales conséquences fonctionnelles de ces mécanismes développementaux sont une augmentation de la sélectivité des neurones localisés dans les différents relais de traitement, à la fois corticaux et sous-corticaux, tout au long des voies visuelles, l'acquisition d'une vision stéréoscopique fine, ainsi que la libération de l'orientation attentionnelle d'un contrôle sous-cortical vers un contrôle cortical volontaire pour les mouvements oculaires et pour l'accommodation (Braddick et al., 1979 ; Banks, 1980 ; Bronson, 1974 ; Bronson 1982 ; Posner & Rothbart, 1981 ; Hood, 1995 ; Johnson, Posner, & Rothbart, 1991 ; Stechler & Latz, 1966). De nombreuses observations comportementales mettent également en évidence une augmentation rapide de l'acuité visuelle au cours de la première année (Dobson & Teller, 1978 ; Norcia & Tyler, 1985 ; Sokol, Hansen, Moskowitz,

Greenfield & Towle, 1983) suivie ensuite d'une augmentation plus progressive jusqu'à l'âge de 6 ans (Atkinson, 2000). De manière similaire, des périodes de changements rapides sont également observées dans le développement de la sensibilité au mouvement, avec des cycles s'enchaînant très rapidement au cours de la première année de vie (Braddick, Atkinson & Wattam-Bell, 2003 ; Wattam-Bell et al., 2010). Les nouveau-nés disposent ainsi de manière très précoce de capacités de traitement visuelles relativement élaborées, au niveau du traitement rudimentaire de la forme par exemple, suggérant des capacités d'apprentissages extrêmement rapides et adaptées malgré des réseaux neuronaux largement immatures (Slater, Mattock & Brown, 1991).

En conclusion, bien que ne disposant que d'un système visuel largement immature à la naissance, le bébé dispose rapidement de capacités fonctionnelles très précoces pour la détection de l'information dans l'environnement. Il met en place durant les 2 premières années de sa vie un système encore largement immature et qui subira encore de nombreuses modifications, tant fonctionnelles que structurales, mais qui lui permet la mise en place et l'adaptation de ses comportements et de ses capacités perceptives (orientation, reconnaissance d'objet...). Ces capacités présentent une trajectoire développementale marquée par l'existence de plusieurs cycles de changements, s'enchaînant rapidement durant la première année et s'épaçant progressivement ensuite. Ces cycles répondent aux grandes étapes de la maturation fonctionnelle et structurale du système sensoriel et marquent le développement de capacités perceptives de plus en plus complexes et spécifiques.

Les conséquences d'une privation visuelle précoce partielle ou totale

L'expérience classique de Wiesel & Hubel (1963) a montré chez le chat qu'une privation monoculaire de l'input visuel, par la fermeture d'un œil, provoque d'importants

changements structuraux au niveau des voies neuronales visuelles associées à cet œil. Les corps cellulaires des neurones des corps genouillés latéraux sont significativement plus petits pour l'œil fermé que pour l'autre. Cet effet semble lié à un développement comparativement plus important des neurones stimulés plutôt que par un rétrécissement de ceux ne recevant pas de stimulation (Sloper, 1993). Cet effet est maximisé si la privation sensorielle est faite durant le premier mois de vie, suggérant à la fois le rôle primordial de la stimulation (et donc de l'action), mais également l'existence de périodes critiques dans le développement sensoriel et perceptif. Un fonctionnement normal et une stimulation régulière durant ces périodes sont donc nécessaires dans l'acquisition des capacités visuelles. Des anomalies développementales se produisant durant ces périodes sont souvent associées à d'importants déficits futurs à la fois structurels et fonctionnels.

Un déficit visuel précoce, comme une amblyopie ou une forte myopie congénitale, peut ainsi entraîner des changements au niveau périphérique, comme sur la structure de l'œil, sur sa longueur ou sa forme (Johnson, & de Haan, 2001). Ces données montrent que la maturation fonctionnelle et structurale du système visuel dépend donc majoritairement de son utilisation adaptée et de sa stimulation dès la naissance. Une modification, même peu importante, au niveau de la stimulation et/ou des capacités du système visuel peut entraîner des déficits spécifiques à des étapes ultérieures du développement, par exemple l'acquisition d'une myopie en cas de surstimulation. On peut également citer le cas du syndrome de Williams, une maladie génétique associant plusieurs symptômes cliniques à des déficits visuels spécifiques associés à la maladie (strabisme, nystagmus et déficit au niveau des voies visuelles occipito-pariétales). Les enfants présentant cette anomalie développementale présentent, plusieurs années ou dizaines d'années après, des déficits spécifiques au niveau des traitements visuospatiaux et de la perception spatiale en général (traitement de la position, de la profondeur et de l'orientation des cibles). Ces patients sont ainsi déficitaires dans des

épreuves impliquant la coordination des informations visuospatiales avec la programmation d'action comme l'appariement de l'orientation d'un objet avec un élément de l'environnement (poster une lettre dans une fente). Ce type d'observations met l'accent à la fois sur l'interdépendance des systèmes perceptifs et d'actions dans leurs développements mutuels, ainsi que sur l'importance de ces périodes critiques dans le développement de ces fonctions. Ces périodes critiques, de même que la détection de discontinuités dans les trajectoires développementales chez les enfants au développement normal, se révèlent donc pertinentes dans la perspective d'une étude fine de l'ontogenèse de la perception spatiale.

III. 1.2. Le développement du système moteur

Des réflexes archaïques et automatismes primaires à la motricité volontaire

Les systèmes sensoriels dont disposent les nouveau-nés ne représentent pas son seul mode d'interaction avec l'environnement et ne sont pas non plus les seuls systèmes fonctionnels dès la naissance. La vie intra-utérine est également marquée par le développement du système moteur. Ainsi, si les membres du fœtus commencent à être visibles et différenciés aux alentours de la 4^e semaine de gestation, les premiers mouvements réflexes isolés peuvent être observés dès la 7^e semaine. Il a déjà été évoqué que la motricité, dans son aspect volontaire, joue un rôle primordial dans l'organisation et la calibration des systèmes perceptifs (Held & Hein, 1963), mais la motricité va également permettre, de manière plus spécifique, de comprendre le monde et son fonctionnement par le biais d'une exploration active et volontaire. Les premières représentations du monde et de ses propriétés seront élaborées sur la base des informations directement ou indirectement fournies par l'activité motrice.

Dans un premier temps, la base du répertoire moteur du nouveau-né serait principalement constituée par un ensemble de programmes réflexes, dont le fonctionnement à la naissance est un marqueur de bon développement du système nerveux. On parle alors de réflexes archaïques, en référence à l'aspect phylogénétique de ces acquisitions, ou d'automatismes primaires lorsque l'on met l'accent sur leur précocité dans la vie de l'individu et leur caractère inné et universel. C'est sur cette base réflexe que se construirait rapidement l'ensemble des capacités motrices du jeune enfant. Les réflexes sont par définition un ensemble relativement rigide et stéréotypé d'actions dont le déclenchement automatique se fait sur la base de stimulations sensorielles spécifiques. Les comportements réflexes vont permettre au bébé d'établir ses premières représentations de son environnement. Pour Piaget (1966), cet espace, dit sensorimoteur, est " *essentiellement constitué par les manipulations et les déplacements du sujet lui-même* ". Dans une conception maturationniste classique à mesure que les structures corticales dévolues au contrôle et à la planification motrice arrivent à maturité, le répertoire moteur du bébé va progressivement augmenter. Les réflexes vont passer sous un contrôle cortical et volontaire, leurs champs d'utilisation vont s'élargir et perdre de leur spécificité, et ils seront progressivement intégrés dans des schémas moteurs de plus en plus complexes (Piaget, 1952 ; 1966).

L'étude de l'acquisition des capacités motrices a permis de remettre en cause la nature exclusive de ces liens de causalités unidirectionnelles entre maturation cérébrale et comportement moteur (Bernstein, 1967 ; Thelen & Fisher, 1982). Il apparaît en effet que les comportements en général, et les comportements moteurs en particulier, sont une propriété émergente issue d'une multiplicité de facteurs, tant centraux et mentaux (e.g. maturation structurale, intention d'action) que physiques et périphériques (e.g. stimulations environnementales, capacités d'action). Il convient donc, dans l'étude de l'acquisition des compétences motrices, de s'intéresser à l'aspect dynamique des évolutions comportementales

en interaction avec l'ensemble des facteurs pouvant influencer leur évolution, comme l'ensemble des contraintes corporelles et environnementales (pour une revue voir Newell, 1986 ; Thelen, 1995 et Bronfenbrenner & Morris, 2006), ou encore l'architecture et la dynamique des réseaux neuronaux. Une théorie du fonctionnement cérébral compatible avec cette hypothèse de causalité multidirectionnelle cerveau-comportement a été développée par Gerald Edelman: la théorie de sélection des groupes neuronaux, "Theory of Neuronal Group Selection - TNGS " (Edelman, 1987 ; Sporns & Edelman, 1993). La TNGS est une théorie complexe, n'étant pas exclusivement limitée à l'étude du développement des compétences motrices, et nous n'en présenterons ici que les aspects fondamentaux et pertinents dans le cadre du développement. Une des grandes qualités heuristiques de la TNGS est de dépasser l'analyse du fonctionnement cérébral en termes de points communs structuraux et fonctionnels entre les individus. Les travaux d'Edelman mettent en évidence la pertinence de s'intéresser aux différences interindividuelles et à la notion de diversité neuronale. La diversité neuronale est issue de processus dynamique neuro-embryonnaire complexe, et ne peut de ce fait être considérée comme innée, ou génétiquement déterminée. Cette diversité constitue un support sous-jacent, pour une sélection et un renforcement "expérience-dépendant" de groupes de neurones et de connexions spécifique (par le biais d'activations réciproques et récursives suivant les lois d'apprentissage Hebbien, Hebb, 1949). Le système nerveux "apprendrait" ainsi à reconnaître et à catégoriser les retours sensoriels de ses mouvements, selon un processus dynamique d'auto-organisation (voir également la théorie des systèmes développementaux, Oyama, 2000).

Un vaste éventail de potentialités d'actions s'offre donc à l'enfant, et ce de manière précoce. Il pourra les expérimenter, les affiner, les sélectionner ou les abandonner, en fonction de la maturation structurale de son système musculo-squelettique, des structures corticales lui permettant de placer progressivement sa motricité sous un contrôle volontaire, et des

opportunités qui lui sont offertes par l'environnement. Des discontinuités dans les courbes de croissance des fonctions motrices, témoignant de l'évolution qualitative par phases successives, sont également observées. Ainsi, les mouvements oculaires ou les comportements d'atteinte et de saisie par exemple, vont progressivement perdre de leur rigidité et de leur caractère stéréotypé pour adopter des profils cinématiques et des propriétés similaires à celles observées chez l'adulte.

De manière plus générale, le développement psychomoteur est caractérisé par une augmentation de la flexibilité et du contrôle sur les réalisations produites sur la base des informations perceptives (Aslin, 1981 ; Wattam-Bell, 1990 ; Johnson, 1995 ; Holmboe, Fearon, Csibra, Tucker, & Johnson, 2008 ; Bower, Broughon & Moore, 1970 ; Difranc, Muir & Dodwell, 1978 ; Ruff & Halton, 1978 ; Rader & Stern, 1982 ; Bruner & Klossowski, 1972 ; Lockman, Ashmead & Bushnell, 1984 ; Bourgeois, Kwahar, Neal & lockman, 2005 ; Bushnell, 1979 ; Bushnell, McKenzie, Lawrence, & Connel, 1995).

Développement pratique de l'enfant

Les praxies réfèrent, en neuropsychologie, à la production et à l'organisation de gestes, i.e. à la coordination volontaire de mouvements orientés vers un but. Cette définition implique d'une part un contrôle conscient et intentionnellement dirigé, et d'autre part que le mouvement soit la conséquence d'un apprentissage et non d'un réflexe ou d'une simple maturation du système moteur. Le concept de praxies repose donc sur un système musculo-squelettique fonctionnel, mais implique aussi nécessairement le développement des capacités d'intégration sensori-motrice et de la planification d'une action. Le développement des praxies s'effectue progressivement chez l'enfant à mesure de la libération de sa motricité du contrôle réflexe sous-cortical. Le neurologue russe Luria (1978) avance par exemple que

l'aire motrice primaire serait mature aux alentours de l'âge de 4 ans. Cette maturation serait la base du développement des capacités à mimer les gestes d'utilisation en utilisant son corps pour représenter les objets. Un enfant de cet âge pourra par exemple se servir de sa main pour représenter une brosse à cheveux ou encore de son doigt pour simuler une brosse à dents (Lussier & Flessas, 2005). Avec la maturation progressive des aires prémotrices et motrices supplémentaires, l'enfant disposerait d'une base pour combiner entre eux des gestes, les mettre en relation dans un schéma complexe d'action de même que de mettre en place des représentations abstraites d'une situation d'action. L'aire prémotrice serait pleinement développée vers l'âge 6-7 ans (Lussier & Flessas, 2005). À cet âge, les représentations motrices sont plus complexes et acquièrent une valeur symbolique plus abstraite: les enfants n'utilisent plus leur propre corps pour simuler une utilisation d'objet, ils développent la capacité à imiter correctement des postures de la main lors de son utilisation (faisant semblant de tenir l'objet en main). Le développement des praxies semble être en étroite relation avec celui des autres fonctions cognitives et notamment la capacité à créer et manipuler des représentations sensori-motrices complexes. On observe en effet des corrélations positives entre la complexité des gestes produits par des enfants de 9 à 13 mois (pointer, donner...) et des mesures de compréhension du langage (Dewey, 1995). Les praxies se développent ainsi progressivement jusqu'à être considérées matures à 11 ans chez des enfants au développement typique. L'augmentation du répertoire moteur est associée à une réduction progressive des erreurs produites pendant la réalisation de gestes complexes (Dewey, 1993).

Dyspraxie développementale et troubles d'acquisition de la coordination

Le concept de dyspraxie développementale décrit un trouble des apprentissages affectant l'organisation et la coordination des gestes au cours de l'apprentissage. L'enfant

dyspraxique apparaît comme maladroit, avec des difficultés dans la planification et la coordination de gestes complexes et dans le transfert d'apprentissage moteur dans un nouveau contexte. Il s'agit d'enfants d'intelligence normale, ayant une relative facilité dans le domaine du langage, mais présentant par ailleurs des difficultés importantes sur le plan moteur et dans l'organisation spatiale (Stamback, l'Hériteau, Auzias, Bergès & De Ajuriaguerra, 1964). Sur le plan neuropsychologique, la dyspraxie est un trouble de la planification spatiale et temporelle de l'action intentionnelle et finalisée, qui se traduit et s'observe par des anomalies de la réalisation gestuelle. Ce tableau clinique se distingue ainsi de l'apraxie, décrite chez l'adulte comme le déficit ou la perte d'une fonction praxique déjà acquise. Ce tableau clinique est présent en l'absence de déficit moteur ou sensoriel. Ce terme, spécifique à la clinique française, est souvent associé au concept de trouble d'acquisition de la coordination (TAC) décrit par le DSM IV.

Malgré la multiplicité des tableaux cliniques, un certain nombre d'arguments étiologiques ont été avancés pour rendre compte du tableau clinique de la dyspraxie. De nombreux auteurs s'accordent sur l'importance des capacités d'intégration sensori-motrices dans l'apparition du déficit praxique (Ayres, 1972, Dewey, 1995). Une intégration sensori-motrice adéquate amènerait l'enfant au développement normal à construire les représentations kinesthésiques servant de base à la planification et à l'organisation conceptuelle du geste au sein de son environnement. Cette intégration s'opère difficilement chez l'enfant dyspraxique. Il est alors incapable de se construire une représentation cognitive et d'évaluer l'importance des informations sensorielles reçues du monde par le biais de son propre corps. L'enfant dyspraxique serait incapable de synchroniser les signaux provenant de l'environnement, et dont la détection conditionne la bonne séquence de la réponse motrice. Les étiologies potentielles associées au tableau clinique des enfants dyspraxiques offrent un aperçu des conséquences en cascade d'un déficit de bas niveau sur la planification et l'organisation de

l'action dans l'environnement et les liens perception-action. L'hypothèse d'une intégration sensorimotrice défectueuse, et d'une difficulté à effectuer une distinction signal-bruit au sein des informations proprioceptive pourrait en effet avoir une influence négative sur l'élaboration et la manipulation des représentations sensorimotrice, notamment pour la prédiction motrice (Smits-Engelman & Wilson, 2013).

Un trouble moteur fonctionnel, tel que la dyspraxie développementale, semble perturber la formation et l'utilisation de représentations motrices. Dans des tâches de simulations explicites d'une action (imagerie motrice), on observe qu'à la différence des sujets au développement normal, les mouvements imaginaires des dyspraxiques ne respectent pas les régularités spatio-temporelles habituellement observées (loi de Fitts ou "*speed-accuracy trade off*") et que leur durée ne corrèle pas avec celle des mouvements effectivement réalisés comme c'est le cas chez des enfants au développement typique (Wilson, Maruff, Ives & Currie, 2001 ; Plumb, Wilson, Mulroue, Brockman, Williams, & Mon-Williams, 2008). Lorsque l'on mesure les différentes dimensions des capacités d'imagerie motrice à l'aide d'un questionnaire, on observe que le déficit des capacités d'imagerie motrice des sujets dyspraxiques semble principalement concerner la dimension kinesthésique du mouvement, i.e dans la représentation à la première personne de ses caractéristiques biomécaniques (Wilson, Maruff, Ives & Currie, 2001). Le déficit des capacités d'imagerie motrice est également proportionnel à l'intensité du déficit moteur fonctionnel (Williams, Thomas, Maruff, & Wilson, 2008).

Un déficit très spécifique au niveau de l'intégration sensorimotrice a donc un important retentissement sur l'adaptation motrice générale. Un trouble d'intégration de l'information viendrait alors non seulement perturber la mise en place des représentations motrices, mais aussi les compétences de plus haut niveau, nécessitant la mise en relation de ces représentations, comme la perception spatiale.

III. 1.3. Le développement de l'intégration sensorielle

Définitions et principes

Les recherches les plus anciennes sur les mécanismes sensoriels et perceptifs ont tout d'abord considéré que les inputs sensoriels des différentes modalités étaient traités dans des aires cérébrales spécifiques au sein de réseaux neuronaux dédiés et majoritairement indépendants (Fodor, 1983). Ces observations ont amené de nombreux chercheurs à postuler que le fonctionnement perceptif des différentes modalités devait également suivre ce principe d'exclusion, chacun d'eux soutenus par des processus, des réseaux et des ressources spécifiques et indépendantes (Wundt, 1874 ; Wickens, 1984). Cependant, cette conception relativement rigide du fonctionnement perceptif et de son inscription cérébrale a rapidement été remise en cause, notamment par les progrès techniques de l'imagerie cérébrale fonctionnelle, ainsi que par les nombreuses observations comportementales montrant l'influence d'une modalité sensorielle sur une autre. Il a ainsi été montré que les aires sensorielles primaires pouvaient être activées par des inputs provenant de différentes modalités. Cette convergence de différents signaux électriques, provenant de différents contextes, de différentes sources, et leur coordination un signal unique, est appelée intégration sensorielle. Au travers de ce processus, le cerveau peut ainsi relier les informations en provenance de différentes sources (intra ou inter modalitaire) en un percept unique et cohérent (Ayres, 1972 ; Macaluso & Driver 2005). Ce phénomène permet, par exemple, l'intégration de l'information en provenance de différents types de récepteurs, sensibles à des dimensions différentes d'une même stimulation, au sein d'une même représentation. Notre cerveau est ainsi capable d'intégrer des informations visuelles de forme, de couleur, de taille, de texture, etc., et de regrouper les différentes propriétés d'un même objet ou événement de l'environnement afin de le reconnaître, le nommer ou organiser une action vers celui-ci. Le processus d'intégration d'informations en provenance de plusieurs modalités sensorielles

implique donc nécessairement l'existence de neurones sensibles aux informations de ces différentes modalités : des neurones multimodaux, dont les champs récepteurs s'étendent sur différentes modalités. Le développement et la maturation de ces structures participent à l'accroissement de l'expression de certaines capacités cognitives de haut niveau, et permettent d'expliquer certaines différences qualitatives observées entre les adultes et les enfants dans le fonctionnement perceptivo-moteur. Il est ainsi possible ici aussi de mettre en évidence des périodes critiques, et des discontinuités comportementales, dans le développement des capacités d'intégration.

L'intégration visuohaptique entre 6 et 10 ans: une discontinuité développementale particulière

Dans ce cadre, une étude de Monica Gori et collaborateurs a justement testé les capacités d'intégration visuohaptique dans une tâche de jugements perceptifs sur la taille et l'orientation d'objets présentés dans les 2 modalités. Les données recueillies chez l'adulte dans ce type de tâche montrent une intégration selon des principes bayésiens, avec une pondération de chaque signal en fonction de sa variabilité propre (Ernst & Banks, 2002), la modalité la plus précise (i.e., la moins variable) bénéficiant d'un poids plus important dans le percept multimodal final. Dans le cas de l'ajout de bruit dans le signal d'une modalité, on observe une augmentation de la variabilité des estimations sensorielles associées à celle-ci, un poids moindre dans l'estimation multimodale finale, et donc un biais plus important de l'estimation multimodale en direction de la modalité non bruitée. À l'inverse, chez les enfants, ce patron de performance n'est observé qu'à partir de l'âge de 10 ans (Gori, Del Viva, Sandini & Burr, 2008). Chez des enfants plus jeunes, à 6 ans, on observe un patron différent, marqué par une dominance très nette d'une modalité sur l'autre en fonction de l'estimation à donner

(dominance de la vision dans l'estimation de l'orientation et de la modalité haptique dans l'estimation de taille). Ce patron évolue progressivement et semble indiquer une réorganisation dans les capacités d'intégration multisensorielle entre 6 et 10 ans. L'intégration statistiquement optimale étant observable à partir de 8 ans, et serait bien installée dès 10 ans. Il est à noter que durant cette période, la maturation cérébrale implique principalement le processus de myélinisation, au niveau notamment des lobes frontaux et pariétaux (Johnson, 2001, Johnson & Munakata, 2005).

Le contrôle postural

Sur la base de nombreux travaux expérimentaux, incluant les leurs, Christine Assaiante et Bernard Amblard (1995) ont proposé un modèle pour décrire l'évolution ontogénétique du contrôle postural chez l'Homme. Le maintien d'une posture statique et le maintien dynamique de sa stabilité, lors de la locomotion par exemple, requièrent l'intégration de différentes sources d'informations, proprioceptives, vestibulaires, sensorimotrices et visuelles notamment. Le modèle proposé par Assaiante et Amblard décrit des changements qualitatifs dans les stratégies utilisées par les enfants et les adultes pour réguler leur équilibre. Ces stratégies impliquent 2 grands principes fonctionnels sur lesquels s'opèrent ces changements : le cadre de référence sur lequel sont basées les stratégies de régulation posturale (surface supportant le corps ou sens de la force de gravité) ; et la maîtrise progressive des différents segments corporels et de leurs degrés de liberté. En se basant sur l'observation de discontinuités comportementales et de changements qualitatifs, les auteurs décrivent 4 grandes périodes qui sont caractérisées par l'utilisation par l'enfant de certaines stratégies spécifiques et présentant des trajectoires développementales également spécifiques. Ces périodes marquent également une alternance cyclique entre un cadre de référence induisant

une trajectoire d'organisation ascendante (surface au sol), i.e des pieds à la tête, ou descendante (sens de la gravité). Les auteurs font l'observation d'une alternance similaire entre un mode d'organisation en bloc et un mode articulé dans le contrôle des ajustements posturaux. Ces notions, de cycles séparés par des discontinuités comportementales, sont bien évidemment à rapprocher de la notion de compétence dynamique et de niveau de développement proposé par Fischer. Il est également intéressant de noter que le premier changement de stratégie proposé par le modèle d'Assaiante et Amblard est atteint sur la base d'un critère fonctionnel : celui de l'acquisition de la station debout. Ce critère semble ainsi correspondre à une définition du contrôle postural comme une compétence dynamique, nécessitant l'intégration de composantes corporelle, comportementale et environnementale. Deux autres périodes de changements sont identifiées par les auteurs entre 5 et 6 ans ainsi qu'à la fin de la 7^e année, témoignant ainsi l'enchaînement de cycles de développements tout au long de l'enfance.

III. 1.4. Représentations de l'action

Définition et déroulement général d'une action

L'ensemble des études qui ont été réalisées sur la motricité et son organisation révèlent que malgré une apparente simplicité, le concept d'action implique la mise en place de multiples étapes de traitements ainsi l'intégration de nombreuses sources d'informations. Un mouvement peut être décrit comme la résultante d'une interaction relativement simple entre le système nerveux central et le système musculo-squelettique (activation des motoneurones transmise le long des voies motrices, jusqu'à la plaque motrice et contraction/relâchement des fibres musculaires). L'action, quant à elle, implique l'intervention de processus cognitifs plus complexes comme la définition d'un objectif, la détection des informations pertinentes à sa

réalisation au sein de l'environnement, mais également au sein des propres afférences et réafférences sensorielles du sujet (Jeannerod, 1988).

La programmation d'un mouvement complexe peut être réalisée d'une infinité de manières différentes en fonction de contextes eux aussi très différents. Si je veux, par exemple, saisir une tasse se trouvant sur une table devant moi, je dois sélectionner une trajectoire parmi toutes celles possibles pour atteindre cette localisation, définir la configuration manuelle requise pour la saisir, en tenant compte de ses propriétés (l'orientation de l'anse, la tasse est-elle pleine, fragile, en train de tomber ?...). Je dois également être capable d'ajuster ces différents paramètres en cas d'erreurs, de modifications de l'environnement et de la configuration actuelle de mes propres segments corporels (voir à ce propos Glover, 2004). Tous ces traitements sont largement inconscients, peu coûteux en ressources et sont effectués dans un laps de temps extrêmement court, comme en témoigne notre activité motrice de tous les jours. Dans son modèle, Marc Jeannerod (1994, 1997) postule l'existence de plusieurs types de représentations motrices et décrit les processus cognitifs nécessaires au déroulement de chacune des étapes de l'action. Dans un premier temps, l'objectif du sujet, son intention motrice, est représenté en relation avec l'environnement dans lequel se déroule cette action. Afin d'atteindre cet objectif, le système cognitif active un certain nombre de schémas moteurs préexistant en mémoire. Ces schémas moteurs sont définis comme un ensemble de commandes motrices, préstructurées, qui définissent le mouvement et déterminent par exemple sa forme, sa vitesse et certaines de ses propriétés cinématiques (Arbib, 1981 ; voir également Schmidt, 1975). Cette étape de planification prend non seulement en compte le but de l'action, mais également les différentes contraintes liées à l'environnement et à la nature de la tâche. Les commandes motrices correspondantes à ces schémas sont ensuite préactivées lors de la programmation, avant d'être ou non finalement exécutées. Pour rendre compte des capacités du système cognitif à

s'adapter aux contraintes toujours variables de l'environnement, des mécanismes de contrôle, pour chaque étape, seraient activés en parallèle afin, par exemple, de comparer les différents aspects de l'action programmée, aux conséquences sensorielles de l'action en cours.

L'anticipation des conséquences de l'action

Afin d'intégrer d'une part les contraintes du contrôle moteur et rendre compte d'autre part des situations d'anticipation pro et rétroactive (contrôle en ligne, apprentissage moteur...), Daniel Wolpert et ses différents collaborateurs ont proposé un modèle computationnel du contrôle moteur, basé sur la métaphore des modèles internes (Miall & Wolpert, 1996 ; Wolpert, 1997 ; Wolpert, Gharamani & Flanagan, 2001 ; Wolpert & Flanagan, 2001). Dès la planification de l'action, un module de représentation interne, le modèle inverse, traduit un but fonctionnel désiré (saisir tel objet de l'environnement ou atteindre une localisation spatiale précise) en une commande motrice. Sur la base d'une copie de l'efférence motrice, un autre module, le modèle forward, permet une estimation des états finaux et intermédiaires du corps, et produit un signal d'estimation des conséquences sensorielles de cette action. Ces modèles permettent la détection d'un signal d'erreur en cas de non-adéquation entre le but désiré et l'état prédit de l'organisme avant même son exécution, mais également pendant sa réalisation par comparaison de la prédiction avec les retours sensoriels (Voss, Bays, Rothwell & Wolpert, 2007 ; Bays, Wolpert & Flanagan, 2005). Ces représentations internes sont flexibles et régulièrement mises à jour pour tenir compte des contraintes changeantes de l'environnement (objets en mouvements, croissance du corps et évolution des capacités d'action). Elles permettraient non seulement une prédiction au niveau de nos propres actions potentielles, mais également d'effectuer des prédictions sur les actions d'un tiers, de discriminer nos propres actions de mouvements passifs par une atténuation des

conséquences sensorielles de nos propres actions, ou encore de juger de la faisabilité d'une action potentielle (Shergill, Bays, Frith & Wolpert, 2003 ; Blakemore, Wolpert & Frith, 2000, Jeannerod, 2001). En anticipant l'état final de l'organisme et les retours sensoriels à l'issue d'une action, ces modules de représentations internes permettraient donc à un individu d'évaluer de manière proactive les limites de son espace péripersonnel d'action.

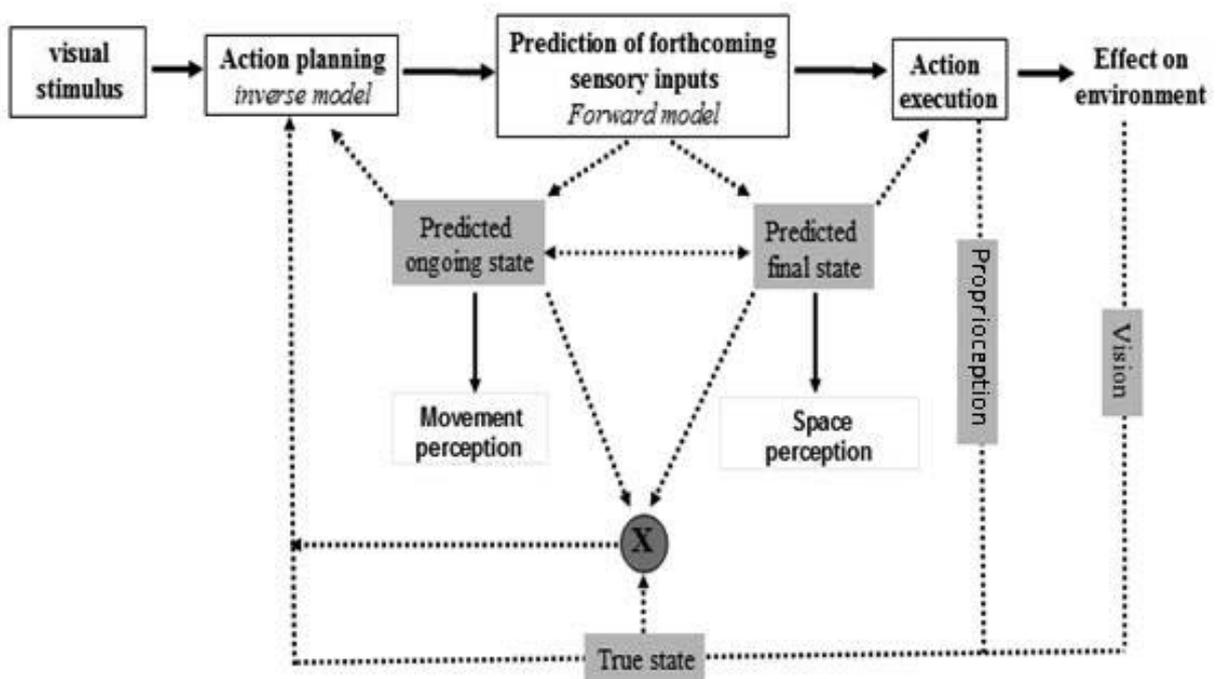


Figure 8 : Modélisation des modèles inverse et forward. Adaptées de Wolpert, 1997.

Ontogénie des modèles internes de prédiction

Cette modélisation, outre sa valeur heuristique et computationnelle, permet d'identifier les différentes composantes affectant le contrôle moteur, d'en observer expérimentalement le développement propre et d'en définir la trajectoire développementale. L'hypothèse d'une élaboration progressive de ces modèles internes semble confirmée par l'observation de

discontinuité et de changements progressifs selon plusieurs aspects de ces représentations. Ainsi, l'apprentissage de contraintes inertielles (par exemple un champ de force appliqué par un manipulateur robotique durant le mouvement) et la représentation de leurs conséquences sur l'environnement semblent indiquer un raffinement progressif des modèles internes de prédiction entre 6 et 10 ans (Jansen-Osman, Richter, Konczak & Kalveram, 2002). Ce raffinement est observé par exemple par des capacités d'adaptation et de désadaptation plus rapide avec l'avancée en âge. De même, l'anticipation des conséquences sensorielles de l'action et l'influence d'une prédiction de l'état final de l'organisme sur la planification du mouvement sont marquées par des changements qualitatifs à la même période (Adalbjornson & al, 2003 ; Thibaut & Toussaint, 2009). Ainsi, une sensibilité à l'effet de confort à l'état terminal d'un geste ("*end state confort effect*") comparable aux adultes, témoignant de l'intégration, durant la planification du mouvement, de l'état final du corps après le mouvement, n'est observée qu'à partir de 10 ans (Thibaut & Toussaint, 2009). Ces auteurs mettent également en évidence que les enfants de 6 ans présentaient un niveau de performance supérieur aux enfants de 8 ans dans la même situation (en termes par exemple, de temps de réaction et de nombre d'erreurs). Ce résultat témoigne d'une réorganisation qualitative des représentations sensorimotrices impliquées. De plus, durant cette période, des modifications dans les patrons de réponses et des discontinuités dans les trajectoires développementales ont été également relevées dans les productions motrices d'enfants. Ces différences qualitatives apparaissent dans différentes tâches, avec de faibles contraintes motrices (mouvements topocinétiques simples, type « pousser un levier »), mais également dans des tâches plus complexes (mouvements morphocinétiques, type graphisme et écriture). Des différences sont non seulement relevées entre les performances d'enfants de 6 et 10 ans, mais, à l'âge intermédiaire de 8 ans, les enfants produisent des erreurs qualitativement différentes, et non retrouvées chez les enfants plus jeunes ou plus âgés (Molenbroek & van

Galen, 1989 ; Bard, hay, & Fleury, 1990). Ces discontinuités et les différences qualitatives mettent donc en évidence une période critique de réorganisation perceptivo-motrice entre l'âge de 6 et 10 ans.

Simulation de l'action et imagerie motrice

Le modèle computationnel de Wolpert et collaborateurs introduit, avec la métaphore des modèles internes, la notion de simulation de l'action. Les modèles forward et interne permettent en effet de simuler une action et son décours afin d'en prédire les conséquences sensorimotrices ou, par exemple, d'en évaluer la faisabilité. Une notion similaire est retrouvée chez Jeannerod (1994, 1997), avec la description d'actions " *overt* ", effectivement réalisées et d'actions " *covert* " qui reste à l'état de simulations mentales. Selon ce type de modélisation, il n'existerait pas de différence fondamentale entre les 2, et c'est l'intention motrice qui structure et organise les représentations de l'action. L'opposition formelle se situerait donc entre une action réflexe, automatique et stéréotypée, et une action volontaire, qui se structure autour d'un objectif moteur, et d'un but fonctionnel spécifique. Le concept d'imagerie motrice, même s'il fait appel aux mêmes déterminants et présente des propriétés similaires, introduit toutefois une différence fonctionnelle fondamentale : son caractère explicite.

L'imagerie motrice correspond elle, à une représentation imagée et explicite d'un mouvement ou d'une action non réalisée. À l'inverse d'un processus de simulation automatique et inconscient, lors d'une tâche d'imagerie motrice la production, l'accès, et la manipulation des représentations mentales sont explicites. Elle implique d'une part les capacités d'imagerie visuelle (Kosslyn, 1973 ; Kosslyn, Ball & Reiser, 1978 ; Inke & Kosslynn, 1980 ; Kosslyn, 2000), mais également des représentations motrices et kinesthésiques pour pouvoir se représenter en train d'agir " *à la première personne* ". Les

capacités à simuler explicitement un geste impliquent donc nécessairement de mettre en œuvre des représentations motrices sur les gestes simulés, et si elle présente des différences conceptuelles majeures avec la simulation de l'action, elle recouvre des mécanismes et l'implication de structures cérébrales similaires. En effet, pour Jeannerod cette simulation de l'action émergerait d'une activation subliminale des aires motrices (Jeannerod & Frak, 1999 ; Anquetil & Jeannerod, 2007 ; Fadiga, Buccino, Craighero, Fogassi, Gallese & Pavesi, 1999 ; Williams, Pearce, Loporto, Morris & Holmes, 2012). L'imagerie motrice activerait les mêmes aires cérébrales que celles impliquées dans l'exécution effective de ces actions et suivrait également des propriétés temporelles similaires (Jeannerod, 1994 ; Decety, 1996 ; Sirigu, Duhamel, Cohen, Pillon, Dubois & Agid, 1996). Ces caractéristiques rendent ainsi la situation d'imagerie motrice plus facilement opérationnalisable expérimentalement. Les paradigmes d'imagerie motrice sont également tout à fait pertinents dans le cadre d'une l'exploration du développement du contrôle moteur et, de son influence sur les différents aspects de la perception spatiale.

Pour Piaget et Inhelder (1966), l'imagerie motrice n'est possible que lorsque l'image mentale est soutenue par les opérations de la pensée logico-mathématique. Ils considèrent donc qu'avant 7-8 ans, une imagerie motrice précise ne sera pas possible. Avant cet âge, l'imagerie serait statique, centrée sur les états du mouvement, et incapable de représenter les transformations dynamiques propres au mouvement. La pensée opératoire, décrite par Piaget, rendrait possible cette capacité à se représenter mentalement des actions. La réussite, dès l'âge de 4 ans, de tâches de rotations mentales a remis en question la temporalité de cette acquisition (Kosslyn & al 1990), mais également certains fondements de la théorie piagétienne qui voit en l'action, l'origine de l'imagerie mentale. L'action et la motricité jouent toutefois un rôle déterminant dans l'adéquation de la simulation avec des contraintes perçues au sein de l'environnement. Kosslynn (Kosslynn, 1994; Kosslynn & Sussman, 1994) suggère

par exemple que le système moteur est impliqué dans la formation des images de mouvements, car il guide le mouvement lui-même. De nombreuses données expérimentales viennent soutenir l'idée que la transformation des images mentales du corps est guidée chez l'adulte, au moins en partie, par des processus moteurs (Parson, 1994 ; Cohen et al., 1996 ; Wohlschlager & Wohlschlager, 1998 ; Olivier & Juan de Mendoza, 2000 ; Olivier, Velay, Labiale, Celse & Faure, 2004). De manière similaire les patients présentant des troubles moteurs fonctionnels, comme l'apraxie, présentent un déficit spécifique au niveau de leurs capacités à utiliser et manipuler les représentations kinesthésiques de mouvements. De même, les enfants présentant un déficit moteur fonctionnel similaire (Trouble d'Acquisition de la Coordination, dyspraxie) montrent également un déficit dans les performances d'imagerie motrice (Wilson, Maruff, Ives & Curries, 2001), proportionnel à la sévérité du trouble moteur fonctionnel (Williams, Thomas, Maruff, & Wilson, 2008).

Cette capacité à évoquer explicitement des images mentales d'action se met en place progressivement au cours du développement, apparaissant aux alentours de 5 ans et continuant d'évoluer avec l'âge jusqu'à l'adolescence et l'âge adulte (Choudhury, Charman, Bird & Blakemore, 2007a, 2007b ; Caeyenberghs, Tsoupas, Wilson, & Smits-Engelsman 2009). Elle semble dépendre principalement d'un développement correct de la motricité ainsi que de la qualité de l'expérience motrice (Maruff & McKenzie, 1998 ; Wilson, Maruff, Ives & Currie, 2001 ; Williams, Thomas, Maruff & Wilson, 2008). La production d'une simulation motrice explicite est liée à la qualité des représentations motrices et également aux performances motrices réelles (Choudhury, & al, 2007a, 2007b). La dépendance motrice de ces processus semble s'étendre jusqu'au moins l'âge de 9-10 ans (Zabalia, 2002). D'après Zabalia, les enfants de cet âge disposeraient alors d'une pensée spatiale mobile et flexible, et présentant un degré d'abstraction suffisant pour permettre une imagerie motrice efficace sans le support nécessaire d'une expérience motrice directe. Cette position rejoint les hypothèses

avancées par le modèle des compétences dynamiques sur le développement à cet âge des capacités d'abstraction des représentations (Immordino-Yang & Fischer, 2007). Des différences de performances dans des tâches d'imagerie motrice sont également observées entre des enfants de 5, 7 et 9 ans (Frick, Daum, Wilson & Wilkening, 2009). De manière similaire, il a été mis en évidence que l'émergence d'une véritable imagerie motrice est faite entre 5 et 7 ans, et que les évolutions de performances les plus importantes sont observées après l'âge de 8 ans (Molina, Tijus & Jouen, 2007 ; Caeyenberghs, Tsoupas, Wilson & Smits-Engelsman, 2009 ; Guilbert, Jouen, Lehalle, & Molina, 2013). Les performances d'imagerie motrice continuent à s'améliorer tout au long de l'enfance et l'adolescence, et il est intéressant de noter que de récentes études ont observé des réorganisations et des discontinuités développementales de l'imagerie motrice entre 8 et 10 ans (Skoura, Vinter & Papaxanthis, 2009 ; Caeyenberghs, Tsoupas, Wilson & Smits-Engelsman, 2009 ; Guilbert & al, 2013).

L'existence des capacités d'imagerie motrice, et également dans une moindre mesure les arguments expérimentaux en faveur des théories de la simulation motrice, mettent particulièrement en évidence les liens forts entre la perception et l'action. D'une part, les observations empiriques réalisées chez l'adulte montrent que les systèmes perceptif et moteur sont largement interdépendants et viennent chacun calibrer le fonctionnement de l'autre. D'autre part, la mise en évidence de discontinuités dans les trajectoires développementales des processus perceptifs et moteurs permet de montrer que les liens perception-action sont non seulement très précoces, mais également que ces 2 grands ensembles de fonction s'influencent mutuellement tout au long du développement.

Ontogenèse des liens perception-action

Le développement en coordination des capacités motrices et perceptives pose la question des liens entre ces 2 types de représentations. Les travaux de Bertenthal, utilisant la technique de la préférence du regard et du *point-light-display*, montrent que les bébés développent de manière très précoce une véritable sensibilité au mouvement biologique (Bertenthal, Proffitt & Cutting, 1984). Cette sensibilité n'est toutefois pas innée, et si elle apparaît de manière très précoce, vers la 12e semaine de vie, elle n'est stable et bien installée qu'à partir de la 20e semaine de vie. Elle nécessite donc un apprentissage et une expérience du monde suffisante pour être élaborée. Cette capacité à effectuer une ségrégation dans l'environnement sur les mouvements biologiques serait une base fondamentale du développement psychomoteur en offrant une base à l'imitation et au contrôle visuel des actions (Bertenthal, 1996 ; Bertenthal & Longo, 2007). Supportant cette interprétation, il a été observé que, les performances d'imitations d'actions observées sont meilleures lorsque les actions sont déjà présentes dans le répertoire moteur, chez l'adulte, mais également chez le bébé (Calvo-Merino, Glaser, Passingham & Haggard, 2005 ; Longo & Bertenthal, 2006). Le développement de ces capacités serait bien évidemment lié pour une part à la maturation fonctionnelle des réseaux cérébraux ventraux et dorsaux (Bertenthal, 1996).

Les systèmes perceptifs et moteurs seraient donc couplés à différents endroits de manière innée (selon l'architecture neuronale), et développeraient également des liens au cours des apprentissages à mesure de leurs interactions (e.g. loi de Hebb, 1949). L'organisation et le contrôle de l'action quant à lui sont également dépendants des données sensorielles. De même la perception des événements dynamiques de l'environnement ne serait pas uniquement basée sur les données sensorielles, mais également sur les contraintes motrices spécifiques à l'organisme. Ainsi, lorsque l'information perceptive est incomplète ou bruitée, les connaissances motrices seraient utilisées par le système pour compléter ces

informations. Par exemple lors de la perception de 2 images fixes, montrant les étapes intermédiaires d'un mouvement, le cerveau recréerait l'illusion du mouvement biologique selon les trajectoires les plus probables, en fonction des contraintes biomécaniques -loi de Korte, isochronie, isochronie et loi de puissance 2/3- (Korte, 1915 ; Viviani & Stucchi, 1992 ; Viviani & Flash, 1995 ; Shiffrar & Freyd, 1990 ; Blake & Shiffrar, 2007). La perception serait ainsi facilitée lorsqu'il y a congruence entre les données perceptives et les contraintes motrices, on parle alors d'effet d'anticipation motrice. Lorsque l'on demande à un sujet de deviner la lettre suivante, dans une série de digrammes manuscrits présentés visuellement, si la trace respecte le modèle biologique, les performances sont au-dessus du niveau de la chance (Orliaguet, Kandel & Boé, 1997 ; Kandel, Orliaguet & Viviani, 2000). Au contraire, on observe une interférence de ces connaissances motrices lorsque les données perceptives sont en contradiction avec celles-ci. Nous percevons, par exemple, l'image d'une trajectoire circulaire en observant un point en mouvement le long d'une ellipse si son profil de vitesse est celui d'un cercle. Les phénomènes d'anticipation, perceptive et motrice, ne dépendraient pas uniquement de l'expérience et des représentations visuelles, mais seraient liés à l'intervention de représentations et à l'expertise motrice (Louis-Dam, Kandel & Orliaguet, 2000). Des observations de cas cliniques, d'apraxie (Heilman, Rothi & Valenstein, 1982), et de dysgraphie (Chary, Méary, Orliaguet, David, Moreau & Kandel, 2004) suggèrent que des troubles moteurs spécifiques et fonctionnels conduisent à des déficits perceptifs spécifiques, et notamment à l'incapacité d'anticiper des informations perceptives en fonctions de contraintes motrices.

Des données développementales montrent que malgré une plus grande variabilité des performances, due à l'immaturation fonctionnelle et structurale du système perceptivo-moteur, les performances d'enfants dès l'âge de 5 ans rendent qualitativement compte des principes d'isochronie et de loi de puissance 2/3 lors de la réalisation de traces motrices (Viviani &

Schneider, 1991). Ces contraintes biomécaniques semblent s'imposer d'elles-mêmes dans le développement moteur du jeune enfant. On peut également observer, dans des tâches d'anticipation motrice, que ces contraintes purement motrices vont marquer le développement perceptif de l'enfant. En effet, à mesure que les capacités des enfants à construire et manipuler des représentations sensori-motrices multimodales évoluent (Gori, Del Viva, Sandini & Burr, 2006), on observe des changements concomitants des capacités d'anticipation motrice de gestes d'écriture et de manipulation (Louis-Dam, Kandel & Orliaguet, 2000). Avant l'âge de 7 ans, les performances des enfants se situent en dessous du score de chance dans ce type de tâche, mais augmentent rapidement pour rejoindre à 9 ans, un niveau de performances comparable à celui des adultes. Cette transition observée, correspond donc à un exemple de discontinuité comportementale pouvant suggérer des modifications qualitatives dans le développement de l'organisation de l'information perceptive et motrice et également dans leur intégration au sein d'une relation perception-action comme l'anticipation motrice ou la compatibilité stimulus-réponse.

III. 2. La compatibilité stimulus-réponse

Présentation générale et définition

Une des conséquences de ces liens forts entre perception et action, de l'existence de ces phénomènes d'intégration multisensorielle, ainsi que les similarités fonctionnelles et structurales des représentations d'action perçues ou effectivement réalisées, pose la question d'une interface commune dans les représentations mentales. Au sein de ce système commun de représentations, nécessaire à la mise en place des fonctions cognitives de haut niveau, certaines propriétés ou dimensions des stimuli et des réponses motrices partagent également un certain niveau de similarité. Ces similarités, émergent du développement en interaction de

ces systèmes, entraînent par conséquent l'émergence d'autres types de relations entre les représentations perceptives et sensori-motrices. Il a ainsi été observé que la perception visuelle d'un objet peut faciliter la production d'une réponse motrice compatible avec cet objet. Cette facilitation serait effectuée par l'activation automatique des codes de la réponse compatible avec ceux du stimulus, i.e. codant pour des propriétés similaires. Pour rendre compte de ces effets de compatibilité stimulus-réponse (CSR), un modèle a été proposé par Sylvan Kornblum (Kornblum, Hasbroucq & Osman, 1994 ; Kornblum, 1994). Ce modèle propose une taxonomie applicable à l'ensemble des situations de compatibilité, et postule que les effets de compatibilité stimulus-réponse sont, en partie dus, à un recouvrement dimensionnel entre l'ensemble des stimuli et de l'ensemble des réponses. Le terme d'ensemble de stimuli et d'ensemble de réponses fait ici référence à l'ensemble des propriétés codées pour les stimuli et pour les réponses, i.e. des systèmes de représentations mentales des stimuli et des réponses. Le recouvrement dimensionnel est présenté comme une propriété de ces représentations mentales, il définit le degré auquel ces 2 ensembles sont perceptuellement, structurellement ou conceptuellement similaires. Il découle de ces propositions que la pertinence pour la tâche des propriétés des stimuli et/ou des réponses n'affecte pas la génération des effets de compatibilités stimulus-réponse, mais uniquement le recouvrement dimensionnel, i.e. les similarités de codage de certaines dimensions de l'environnement (Kornblum, 1994).

Deux voies de traitements distinctes relieraient la perception du stimulus à l'exécution de la réponse. Une voie directe permettant une activation automatique des codes de réponse par ceux du stimulus s'ils partagent un certain degré de similarité, et une route indirecte reliant le stimulus à la réponse d'une manière arbitraire selon les consignes de la tâche à réaliser (Simon & Rudell, 1967 ; Simon & Small, 1969 ; Eimer, Hommel & Prinz, 1995; Kornblum, Hasbroucq & Osman, 1990 ; Buetti & Kerzel, 2008, 2009 ; Hommel, 2011). Dans le cas d'une

situation incongruente, la voie directe active automatiquement la mauvaise réponse et crée un conflit avec la sélection de la bonne réponse par la voie indirecte. C'est la résolution de ce conflit qui crée un avantage pour les situations congruentes par rapport aux situations incongruentes. Cet avantage est généralement observé sur les aspects temporels (temps de réaction et temps de mouvement), mais également sur le taux de bonne réponse lorsque les contraintes de la tâche augmentent (Simon & Small, 1969 ; Eimer, Hommel & Prinz, 1995; Kornblum, Hasbroucq & Osman, 1990 ; Hommel, 2011). Dans le modèle de Kornblum, la sélection et la planification de la réponse sont présentées comme des processus séquentiels, et l'interprétation classique des tâches d'effet Simon est que les effets de CSR seraient limités à la phase de sélection de la réponse (Kornblum, 1994). Plus récemment, les travaux de Buetti et Kerzel (2008, 2009), s'appuyant sur le modèle de Kornblum, ont remis en question cet aspect séquentiel de la sélection et la programmation de la réponse. Ceux-ci ont mis en évidence dans une tâche d'effet Simon, des effets de CSR sur des aspects cinématiques de mouvement de réponse, renvoyant à leur programmation, montrant également le recouvrement temporel possible entre sélection et programmation d'une réponse en fonction des contraintes de la tâche.

Les tâches permettant d'opérationnaliser les effets de CSR (e.g. effet Simon, amorçage visuomoteur et motoro visuel) se révèlent d'une grande valeur heuristique pour explorer les liens perception-action, ainsi que la nature des représentations des stimuli et des réponses. Dans le cadre plus précis de la perception spatiale, la modulation des effets de CSR en fonction de variations paramétriques des propriétés des stimuli et des réponses, permet expliciter la nature des représentations spatiales et leurs déterminants.

Nature des codes spatiaux

Différentes variations sur le paradigme classique de l'effet Simon ont ainsi permis de mettre en évidence les propriétés spatiales des cibles et des réponses pouvant entraîner une CSR. Les données princeps ont tout d'abord montré une facilitation de réponse partageant une localisation spatio-anatomique compatible avec celles de la réponse, i.e une localisation homologue de la cible et la réponse dans le même hémichamp (Simon & Rudell, 1967 ; Simon & Small, 1969). Il a par la suite été mis en évidence que différents codes spatiaux possibles coexistaient au sein des représentations spatiales, construites selon différents cadres de référence, et permettant la facilitation d'une réponse compatible. Ainsi, une orientation attentionnelle endogène ou exogène (Nicoletti & Umiltà, 1989, 1994 ; Ansorge, 2003 ; Pellicano, Lugli, Baroni & Nicoletti, 2009), l'anticipation de conséquences sensorielles de la réponse (Hommel, 1993), ou la position relative de la cible par rapport à plusieurs localisations possibles (Lamberts, Tavernier, & d'Ydewalle, 1992), peuvent constituer un cadre permettant d'induire un codage spatial de la cible et la réponse, et donc une CSR. Ces différents cadres de références peuvent coexister au sein d'une même représentation spatiale, et induire chacun des effets de compatibilité (Lamberts, Tavernier, and d'Ydewalle, 1992 ; Rizzolatti, Riggio, & Sheliga, 1994). Certains codes des stimuli ou des réponses font référence à un cadre de référence dans un format moteur, ou sensorimoteur. En effet, certaines propriétés intrinsèques d'objet, directement liées à leur atteinte, saisie, ou manipulation, sont également capables de générer des effets de compatibilité stimulus-réponse, comme dans les tâches d'amorçage visuomoteur et motoro-visuel (Tucker & Ellis, 1998, 2001, 2004 ; Craighero, Fadiga, Rizzolatti & Umiltà, 1998 ; Bekkering & Neggers, 2002 ; Olivier, 2006 ; Olivier & Velay, 2009 ; Girardi, Lindemann & Bekkering, 2010).

Développement de la Compatibilité Stimulus-Réponse

La mise en place et le développement durant l'enfance de ces différents codes spatiaux et sensorimoteurs et de la CSR sont peu connus et à notre connaissance encore non explorés. Une partie des données expérimentales recueillies durant cette thèse ont justement constitué une tentative d'exploration d'effet de compatibilité spatiale durant l'enfance.

III. 3. Définition de la période d'intérêt

Le développement de la perception spatiale, et plus particulièrement de la perception de l'espace péripersonnel, est un champ de recherche assez spécifique. À l'instar de nombreux autres domaines, il s'est dans un premier temps naturellement centré sur les différences comportementales entre les enfants et les adultes. L'amélioration de la connaissance du fonctionnement adulte a permis la mise en place d'une série de travaux sur l'évolution ontogénétique de l'influence de la motricité sur la perception spatiale. Toutefois, les aspects de la dynamique développementale de ces acquisitions sont relativement mal connus, et il est peu aisé avec une simple revue de la littérature de définir un profil développemental précis.

Pour tenter d'évaluer le profil développemental de la perception de l'espace péripersonnel nous avons choisi d'aborder cette problématique dans le cadre des neurosciences développementales et plus particulièrement du modèle des compétences dynamiques de Fischer (Fischer & Yan, 2002). En considérant la perception spatiale comme une compétence dynamique et en étudiant le profil développemental de ses déterminants cognitifs, nous avons relevé dans la littérature de nombreux exemples de discontinuités dans les trajectoires développementales de ces mêmes déterminants. La mise en relation de ces données met en évidence une période d'intérêt, entre 8 et 10 ans, durant laquelle un certain

nombre de processus de traitements et d'intégration de l'information perceptive et sensori-motrice sont réorganisés.

Dans le cadre théorique des neurosciences développementales, et du modèle des compétences dynamiques, présenté dans le premier chapitre, et après avoir présenté la problématique générale de la thèse, la perception spatiale et son rapport avec les compétences motrices dans le second chapitre, nous avons vu dans le troisième que les éléments servant de base aux représentations spatiales présentaient des trajectoires développementales marquées par des discontinuités au cours de la même période. Au cours de ce travail de thèse, nous nous sommes concentrés sur l'exploration du développement, de la perception de l'espace péripersonnel et des compétences perceptivo-motrices impliquées dans les représentations spatiales, entre les âges de 7-8 ans et 12-13 ans.

L'objectif principal de cette thèse est de mettre en évidence la trajectoire développementale de la perception spatiale en relation avec les compétences motrices des enfants de la période d'intérêt. Nous nous attendons tout d'abord à observer des différences dans les performances des enfants les plus jeunes par rapport aux plus âgés. De plus, reflétant le passage entre 2 cycles de développements, nous nous attendons à ce que les différences observées soient plus importantes entre 8 et 10 ans. Nous avons réalisé un ensemble de 4 études expérimentales basées sur l'utilisation, de méthodes psychophysiques de mesure de seuil d'atteignabilité, de tâche d'imagerie motrice et de protocole d'amorçage visuomoteur. Les 3 études réalisées chez l'enfant sont des protocoles transversaux.

Partie 2 : Partie expérimentale

Chapitre IV. Études expérimentales

An expert is a person who has made all the mistakes that can be made in a very narrow field.

Niels Bohr

Prediction is very difficult, especially about the future.

Niels Bohr

IV. 1. Présentation

IV. 1.1. Plan de recherche et objectifs des expériences

Au cours de ce travail de thèse nous avons mis en place une série de protocoles expérimentaux visant à évaluer la trajectoire développementale des capacités de représentation de l'espace péripersonnel en relation avec les compétences visuomotrices.

Le choix de cette problématique, ainsi que de la période d'intérêt est issu de la confrontation de données préliminaires, obtenues en master, et d'éléments de littérature dans plusieurs domaines. Les données préliminaires laissaient en effet entrevoir des changements au cours du développement dans les performances d'enfants à une tâche d'atteignabilité (études 1 et 2). Ces résultats venaient s'opposer aux quelques résultats existant sur le développement de l'atteignabilité. Toutefois d'autres données, dans

d'autres domaines connexes, laissaient entrevoir l'intérêt d'étudier durant la période de 8 à 12 ans le développement de l'atteignabilité.

De manière complémentaire, nous nous sommes intéressés au codage spatial des objets (étude 3, 4 & 5). Il s'agissait d'étudier, chez l'adulte et chez l'enfant, l'influence du codage moteur et visuel des objets dans un paradigme de compatibilité stimulus réponse.

Nous avons enfin élaborer un protocole de recherche clinique pour étudier les conséquences d'un trouble moteur fonctionnel sur les représentations spatiales associées à la perception des limites de l'espace d'action et à la compatibilité stimulus réponse.

IV. 1.2. Précisions méthodologiques

L'ensemble des protocoles réalisés durant cette thèse a été mis en place dans le respect des règles éthiques et des principes de la déclaration d'Helsinki. L'ensemble des participants aux protocoles expérimentaux était volontaires, et dans le cas des enfants avait reçu une autorisation parentale.

Les protocoles expérimentaux mis en place ont tous consisté en des études transversales.

Les enfants ayant participé aux différents protocoles ont été recrutés dans des établissements scolaires publics de la région Nord-Pas-de-Calais. L'accord préalable des services de l'éducation nationale a été obtenu, et les protocoles ont été réalisés en coordination avec les inspecteurs de l'éducation nationale et les psychologues scolaires

des secteurs concernés. Les détails du recrutement des enfants participant au protocole de recherche clinique sont décrits en détail dans l'annexe A.

Les participants adultes ont été recrutés au sein de l'université Lille 3 parmi les étudiants de différents cursus. L'élaboration des différents protocoles a également donné lieu à de nombreux prétests qui ont été réalisés sur les membres volontaires du laboratoire.

L'ensemble des participants, à l'exception encore une fois des participants du protocole de recherche clinique, a été recruté en fonction des critères communs suivants:

- une vision normale, ou corrigée à la normale
- une absence de troubles moteurs, fonctionnels et/ou structuraux
- une absence de troubles visuospatiaux modéré ou sévère.
- une absence d'antécédent neurologique et/ou psychiatrique modéré ou sévère..

Ces critères ont été évalués sur la base d'observations des enfants, de questionnaires, et d'éventuelles évaluations psychométriques réalisées par des psychologues scolaires.

IV. 2. Étude 1 : Représentation de l'espace péripersonnel chez les enfants de 7 à 14 ans

Présentation de l'étude

Cette première étude est un protocole exploratoire, réalisée à la suite d'une étude préliminaire sur l'évolution de l'atteignabilité entre 7 et 14 ans réalisée en master. Les études précédentes, peu nombreuses, n'ont pas mis en évidence de différences en fonction de l'âge dans les jugements d'atteignabilité (Gabbard, Cordova & Ammar, 2007). Toutefois, les résultats de l'étude préliminaire montraient une évolution claire des jugements d'atteignabilité en fonction de l'âge, suggérant la présence de discontinuités comportementales dans le développement du système visuomoteur entre 7 et 14 ans. Nous avons donc mis en place ce protocole pour explorer de manière plus précise les jugements d'atteignabilité au cours de cette période. Nous avons mesuré, chez des enfants de 7 à 14 ans, le seuil d'atteignabilité dans différentes conditions de présentation à partir de la méthode psychophysique des limites. Les jugements des enfants ont été mesurés dans différentes conditions d'angles et de directions du mouvement de la cible. Les performances des enfants ont été mesurées en fonction de propriétés anthropométriques des participants (la longueur de leur bras).

Résumé des principaux résultats

Les résultats de cette étude mettent en évidence une grande évolution de l'exactitude et de la précision des jugements d'atteignabilité. En effet la limite perçue de ce qui est atteignable, de même que la variabilité intra-individuelle des jugements, évoluent en fonction de l'âge des participants. Les enfants de 8 ans montrent un biais de surestimation de la limite

de l'espace d'action plus important que les enfants de 14 ans. De plus, nous avons observé un effet de l'excentricité de la cible et de la direction de son mouvement. Les analyses montrent également que les enfants de 8 et 9 ans sont significativement plus affectés par l'angle de présentation et la direction du mouvement de la cible, et surestiment également les limites de leur espace d'action significativement plus que les enfants plus âgés.

Représentations de l'espace péripersonnel chez les enfants de 7 à 14 ans

Representation of peripersonal space in 7- to 14-year old children

Richez, A & Coello, Y.

Résumé

L'espace péripersonnel se définit comme l'espace contenant les objets que l'on peut atteindre directement sans déplacement préalable du corps. La perception de ses limites requiert la mise en relation d'informations visuelles de distances relatives aux objets avec des représentations associées au corps et à ses possibilités d'action. Il a été montré que, chez l'enfant, les capacités d'intégration multisensorielles et sensorimotrices au cours du développement ne sont pas optimales avant l'âge de 8-10 ans. Dans ce contexte, notre étude vise à mesurer, chez des enfants de 7 à 14 ans, la perception de l'espace péripersonnel dans différentes conditions de présentation de stimuli visuels. Les résultats montrent que les enfants de 7 et 8 ans surestiment l'espace péripersonnel davantage que les enfants plus âgés et se révèlent plus affectés par les conditions de présentation des stimuli visuels. Un changement majeur s'observe entre 8 et 10 ans, suggérant à cet âge le développement de nouvelles compétences perceptives intégrant les représentations motrices.

Abstract

Peripersonal space is defined as the space containing the objects that can be manually reached without the necessity for prior displacement of the whole body. The perception of its boundary requires combining distance-related visual information with representations of action possibilities with the body. In children, it has been shown that the capabilities of multisensory and sensorimotor integration during development are not optimal before the age of 8-10 years. In this context, our study aims at measuring in children 7 to 14 years, the perception of peripersonal space in different conditions of presentation of visual stimuli. The results show that children ages 7 and 8 overestimate their peripersonal space more than older children and appear more affected by the conditions of presentation of the visual stimuli. A major change is observed between 8 and 10 years, suggesting that at this age, the development of new perceptual competences involving motor representations.

Mots clés : Vision; Perception-action; Espace péripersonnel; Développement.

Keywords: Vision; Perception-action; Peripersonal space; Development.

1. Introduction

Durant les dernières décennies, un nombre important de travaux dans différentes disciplines a montré que la perception tridimensionnelle de l'environnement ne repose pas exclusivement sur les capacités du système visuel à détecter les indices de distance et de profondeur (e.g., Cutting & Vishton, 1995), mais également sur une mise en relation de ces indices avec les représentations relatives au corps et aux possibilités d'agir (Previc, 1998; Piaget, 1966 ; Noe, 2004). La perception spatiale se construit ainsi par l'action, ce qui conduit à opposer un espace péripersonnel, lieu des interactions immédiates avec les éléments de l'environnement, et un espace extrapersonnel, lieu des interactions différées avec les éléments de l'environnement (Carello, Groszfeld, Reicher, Solomon & Turvey, 1989; Grüsser, 2003; Coello & Delevoye-Turell, 2007). La représentation de ces espaces est flexible comme en témoignent les changements au niveau comportemental et cérébral se produisant lors de l'utilisation d'outils qui, en augmentant nos capacités d'action, affectent également l'étendue de l'espace péripersonnel (Bourgeois, Farné & Coello, 2014). Cette propriété dynamique de l'espace péripersonnel est attestée par un nombre important d'études en psychophysique (Witt, Proffitt & Epstein, 2005 ; Bourgeois, Farné & Coello, 2014), en neuroimagerie chez l'humain (Brozzoli, Gentile, Petkova, & Ehrsson, 2011), ou encore en neurophysiologie animale (Iriki, Tanaka & Iwamura, 1996 ; Maravita & Iriki, 2004). En accord avec ces observations, d'autres recherches ont montré qu'une modification transitoire des conséquences spatiales d'un acte moteur volontaire, sans manipulation d'outils, modifie également la perception de l'espace péripersonnel (Bourgeois & Coello, 2012).

L'ensemble de ces données montre ainsi que la perception de l'espace péripersonnel s'appuie sur un traitement des informations visuelles codées dans un format moteur, en accordant une importance toute particulière aux effets produits par les actions dans l'environnement (Delevoye et al., 2010). Cette approche, en accord avec la théorie

idéomotrice du codage des actes moteurs volontaires (James, 1890 ; Hommel et al., 2001 ; Shin et al., 2010), suggère que la perception de l'espace péripersonnel impliquerait des mécanismes anticipatoires permettant de prédire, avant toute réalisation effective, les conséquences des actions suggérées par les objets structurant l'environnement (Jeannerod, 2001 ; Coello & Delevoye-Turrell, 2007). En associant les représentations motrices à l'acte perceptif, ces mécanismes anticipatoires seraient à la base des décisions comportementales (Jeannerod, 2001), des ajustements rapides des productions motrices (Wolpert & Flanagan, 2001 ; Grush, 2004), et de la perception spatiale pour l'action (Coello & Delevoye-Turrell, 2007 ; Witt & Proffitt, 2008, Gallese, 2005).

La calibration de la perception spatiale n'est toutefois pas innée et son caractère dynamique trouve ses fondements dans le développement des compétences motrices et des actes moteurs volontaires dirigés vers les objets au cours des premières années de vie. En effet, si un certain consensus est désormais établi sur le rôle précoce de l'action dans le développement des facultés perceptives et cognitives (e.g. Held & Hein, 1963 ; Piaget, 1966 ; Gibson 1979 ; Rochat & Striano, 2000), peu de données sont disponibles permettant d'apprécier l'aspect ontogénétique de la perception de l'espace péripersonnel. Les quelques publications dans ce domaine suggèrent que les opportunités d'action au sein de l'environnement sont perçues de manière précoce chez le jeune enfant (Field, 1976, Carroll & Gibson, 1981 ; Rochat, 1995 ; Gabbard, Cordova & Ammar, 2007, Gabbard, Cordova & Lee 2009). Les comportements réflexes vont tout d'abord permettre au très jeune enfant d'établir ses premières représentations sensorimotrices de l'environnement. Pour Piaget (1966), par exemple, cet espace sensorimoteur est « *essentiellement constitué par les manipulations et les déplacements du sujet lui-même* ». Ainsi, on observe expérimentalement que dès l'âge de 5 à 8 mois, les enfants montrent une nette diminution dans la fréquence des productions spontanées de gestes d'atteinte vers les objets proches d'eux, lorsque ceux-ci sont placés à

proximité de la limite de leur espace péripersonnel ou au-delà (Rochat, 1992; Rochat & Goubet, 1995). Chez des enfants du même âge, il est également observé que la production de gestes d'atteinte dépend du niveau de contrôle postural, en particulier le contrôle d'une posture assise stable (Rochat & Goubet, 1995). À partir de 3 ans, les enfants semblent en mesure de juger ce qui est atteignable pour eux-mêmes et pour d'autres personnes, suggérant que des représentations relativement spécifiques à la situation d'atteinte manuelle sont construites de manière itérative par les jeunes enfants. Ces représentations sont progressivement appliquées à d'autres situations similaires de manière adaptée, par exemple l'attribution par l'enfant d'un espace péripersonnel plus important pour des adultes (Rochat & Goubet, 1995). Toutefois, l'intégration de contraintes posturales complexes dans les jugements d'atteignabilité semble encore difficile pour des enfants âgés de 7 ans (Gabbard et al., 2009). Dans une étude sur la perception de l'espace péripersonnel, Gabbard et al. (2007) montrent une surestimation systématique et plus importante de l'espace péripersonnel chez les enfants comparés aux adultes, avec peu de variation interâge chez les enfants. Cette étude s'est toutefois davantage centrée sur les erreurs de jugement que sur la mesure précise de l'étendue de l'espace péripersonnel. La mesure utilisée dans ces études est en effet caractérisée par un faible nombre de distances de cibles pour effectuer la mesure, et par la construction d'un profil d'erreur plus que la mesure d'un seuil d'atteignabilité. Toutefois une observation plus approfondie des données de ces études, notamment Gabbard et al (2007), montrent de grandes différences dans les profils de réponses entre enfants et adultes, mais également entre les différents groupes d'âge d'enfants testés. Ainsi si les enfants du groupe de 8 ans et demi et 10 ans et demi présentent un profil de réponse très semblable entre eux, marqué tout comme les adultes par une discrimination relativement nette des limites de leur espace péripersonnel et par une surestimation qui semble plus importante que les adultes. Les enfants du groupe de 6 ans et demi présentent eux un profil tout à fait différent. En effet, dans cette étude, les enfants

les plus jeunes montrent une discrimination moins nette de leur espace d'action, observable avec une distribution plus large de leur profil d'erreur, profil pouvant suggérer des différences entre ces populations d'enfants et d'adultes à la fois quantitatives, i.e. des estimations des limites de l'espace péripersonnel différentes en termes de seuils mesurés, mais également des différences qualitatives, i.e. des jugements et des processus de sélections de l'information fondamentalement différents.

Dans ce contexte, le but de notre étude était d'évaluer, par une approche psychophysique, le caractère développemental de la perception de l'espace péripersonnel chez des enfants âgés de 7 à 14 ans. L'implémentation d'une mesure psychophysique des limites perçues de l'espace péripersonnel nous est apparue comme un moyen de mettre en évidence d'éventuelles différences entre des populations d'enfants d'âge différents. Au regard de la littérature sur l'intégration sensori-motrice, Gori, Del Viva, Sandini & Burr (2008) ont montré que l'intégration des informations sensorielles n'est pas optimale avant l'âge de 8 ans et que son développement se poursuit jusqu'à l'âge de 10 ans (voir également Barutchu, Crewther & Crewther, 2009 ; Nardini, Bedford & Mareschal, 2010 ; Nardini, Jones, Bedford & Braddick, 2008). De même, Choudhury, Charman, Bird & Blakemore (2007) ont montré que les capacités de représentation motrice s'améliorent considérablement à partir de l'âge de 7 ans, et de manière continue jusqu'à l'âge adulte (voir également, Molina, Tijus & Jouen, 2008; Frick, Daum, Wilson & Wilkening, 2009). Si l'on admet que la perception de l'espace péripersonnel requiert le codage des informations visuelles dans un format moteur, nous nous attendons ainsi à observer un effet de l'âge sur la perception de l'espace péripersonnel (1). Par ailleurs, reflétant la période critique au cours de laquelle les capacités d'intégration sensorimotrice progressent substantiellement, nous nous attendons à observer les changements les plus importants pendant la période se situant entre 8 et 10 ans (2). Les enfants les plus jeunes étant davantage dépendants des informations visuospatiales (Houdé, 2000), nous nous attendons,

chez ces enfants, à ce que les conditions de présentation des stimuli visuels, en particulier l'angle et la direction du déplacement des stimuli visuels, affectent davantage les jugements perceptifs (3).

2. Méthode

2.1. Participants

Une cohorte de 82 enfants (de 7 à 14 ans révolus, âge moyen 10 ans et 10 mois, SD : 2 ans) a été recrutée au sein d'établissements scolaires publics (du CE1 à la 6e). La population totale a été divisée en 4 groupes expérimentaux en fonction de l'âge : **7-8 ans** (n = 18 ; M = 8 ans 20 jours, SD : 6 mois ; 2 gauchers); **9-10 ans** (n = 20 ; M = 10 ans 21 jours, SD : 7 mois ; 3 gauchers); **11-12 ans** (n = 27 ; M = 11 ans 8 mois, SD : 7 mois ; 3 gauchers) et **13 ans et +** (n = 16 ; 13 ans 7 mois ; SD : 4 mois ; 1 gaucher).

Préalablement aux passations expérimentales, nous avons obtenu l'accord de l'Inspecteur de l'Education Nationale, des directeurs d'établissement, des professeurs, de même que celui des parents de l'ensemble des participants. La tâche a été proposée à des enfants volontaires. Les enfants ont été maintenus naïfs quant aux buts de l'expérience, la séance de passation leur a été présentée comme une séance de travaux pratiques pendant laquelle il leur serait demandé d'aider un chercheur à collecter des données. Aucun participant ne présentait d'antécédent neurologique, psychiatrique ou de trouble moteur structural et/ou fonctionnel. Tous avaient une vision normale ou corrigée à la normale.

2.2. Dispositif expérimental

Les passations se déroulaient dans une salle de classe dédiée à l'étude. Les enfants étaient invités à s'asseoir devant une table sur laquelle était posée une planche en bois (160cm x 100cm). Les enfants étaient assis de manière à ce que leur axe sagittal soit aligné avec l'axe médian de la planche. Les enfants devaient maintenir les mains sur leurs cuisses durant toute l'expérience et n'étaient autorisés à aucun moment à effectuer des mouvements vers le stimulus visuel présenté et le dispositif expérimental. Afin que le dispositif soit perçu de la même façon par tous les enfants, une position standardisée a été définie avec une distance verticale du bord de la planche à l'axe des yeux et une distance horizontale du bord de la planche aux épaules fixée à 35 cm (voir Figure 1). Une feuille de papier carbone était placée sur la planche en bois, puis recouverte d'une feuille de papier blanc afin de recueillir les réponses de chaque participant. Le stimulus visuel était une LED rouge fixé à l'extrémité d'un bâton de 100 cm. Le déplacement du stimulus visuel se faisait suivant un angle de 0° ou $\pm 25^\circ$ par rapport à l'axe sagittal médian en s'approchant du participant (départ de l'extrémité distale de la planche, mouvement centripète) ou en s'éloignant du participant (départ de l'extrémité proximale de la planche, mouvement centrifuge).

2.3. Procédure expérimentale

Après un rapide briefing, où les informations sur la procédure étaient communiquées aux enfants, ces derniers étaient invités à s'asseoir en face du dispositif. L'expérimentateur leur expliquait qu'ils allaient voir un stimulus lumineux se rapprocher ou s'éloigner d'eux (environ 1 cm par seconde). Dans la condition où le stimulus lumineux se rapprochait d'eux (condition centripète), les participants devaient indiquer verbalement le moment où il devenait

atteignable avec la main droite ("Indique-moi dès que tu penses pouvoir le toucher tout juste du bout du doigt").

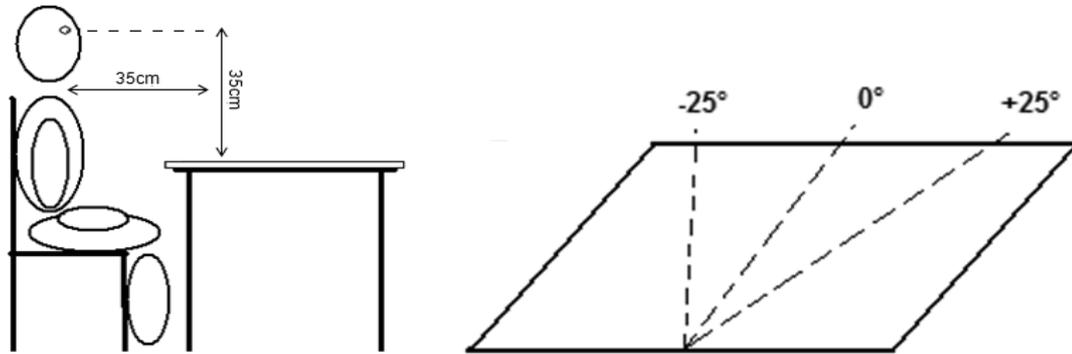


Figure 1 :. Schéma du dispositif expérimental. À gauche, la position du participant par rapport au dispositif. À droite, une représentation du support de présentation des stimuli visuels et des différentes conditions d'angle.

Dans la condition où le stimulus lumineux s'éloignait d'eux (condition centrifuge), ils devaient, à l'inverse, indiquer verbalement lorsqu'il ne devenait plus atteignable avec la main droite ("Indique-moi dès que tu penses ne plus pouvoir le toucher tout juste du bout du doigt", sans qu'aucun mouvement ne soit produit de la part de l'enfant). Cette méthode correspond à une technique classiquement utilisée pour estimer la limite perçue de l'espace péripersonnel (e.g., Carello et al., 1989). Huit essais par condition étaient réalisés pour un total de 48 essais (8 essais x 3 angles x 2 directions du mouvement). L'expérience était réalisée en deux blocs de 24 essais. Dans chaque bloc, la direction du mouvement était fixée et la condition d'angle présentée de manière aléatoire. L'ordre de passation des 2 deux blocs d'essais a été contrebalancé sur l'ensemble des participants. Le stimulus était éteint entre chaque bloc et allumé de nouveau juste avant le début d'un nouveau bloc d'essais.

2.4. Recueil des données et analyse des résultats

À l'instant où les participants signalaient que le stimulus visuel atteignait la limite de leur espace péripersonnel, l'expérimentateur stoppait son déplacement. L'emplacement du stimulus visuel était alors inscrit sur la feuille blanche en utilisant un stylet ne laissant aucune marque visible, et par transfert sur le papier carbone se situant en dessous. À la fin de la session expérimentale, la distance réellement atteignable par le participant était mesurée en réalisant une extension passive du bras droit du sujet et en décrivant un arc de cercle de la droite vers la gauche (180°).

Pour l'analyse des données, la précision des réponses a été calculée pour chaque condition à partir de l'écart entre la distance atteignable moyenne (8 essais) perçue par les participants et la distance maximale réellement atteignable (mesurée en fin d'expérience). Cette valeur était exprimée en pourcentage de la longueur du bras des participants. Une valeur positive signifiait une surestimation dans le jugement d'atteignabilité et une valeur négative une sous-estimation. Dans chaque groupe de mesure, la variabilité individuelle des réponses a été utilisée comme indicateur du niveau de confiance des jugements d'atteignabilité.

Les données ont été soumises à une analyse de variance (ANOVA) à trois facteurs croisant: Groupe d'âge (7-8, 9-10, 11-12, 13 ans et +) x Angle (-25°, 0°, 25°) x Direction du mouvement (centripète, centrifuge), avec des mesures répétées pour les deux derniers facteurs. Les hypothèses **2** et **3** ont été testées avec des comparaisons planifiées, en réalisant une famille de 3 contrastes orthogonaux. Un contraste pour teste l'effet d'âge de l'hypothèse **2** et **2** et 2 contrastes pour tester les effets d'Angle et de Mouvement sur l'Âge pour l'hypothèse **3**.

3. Résultats

3.1. Performances spatiales

L'analyse de variance (ANOVA) met en évidence un effet significatif du Groupe d'âge sur la perception de l'espace péripersonnel ($F(3, 75) = 32,73$, $p < 0,01$; $\eta_p^2 = 0,57$). Les enfants du groupe 7-8 ans surestiment leur espace péripersonnel de 24,9 % (SD: 11,2 %), ceux du groupe 9-10 ans de 5,8 % (SD: 7,8 %), ceux du groupe 11-12 ans de 4,5 % (SD: 6,6 %) et ceux du groupe 13 ans et plus de 0,1 % (SD: 6,4 %). La comparaison planifiée révèle que les enfants du groupe 7-8 ans surestiment leur espace péripersonnel significativement plus que les enfants des 3 autres groupes ($F(1, 75) = 95,20$, $p < 0,01$; $\eta_p^2 = 0,98$).

L'ANOVA révèle également un effet significatif de l'Angle d'approche sur la perception de l'espace péripersonnel ($F(2, 150) = 36,54$, $p < 0,01$; $\eta_p^2 = 0,32$). L'espace péripersonnel est surestimé de 11,1 % (SD: 8,7 %) quand le stimulus est présenté à gauche, de 7,1 % (SD: 8,3 %) quand le stimulus est présenté au centre, et de 8,3 % (SD: 8,7 %) quand le stimulus est présenté à droite. La comparaison planifiée montre que l'effet d'une présentation excentrique de la cible est plus grand pour les enfants du groupe 7-8 ans par rapport aux enfants de tous les autres groupes ($F(1, 75) = 37,12$, $p < 0,01$; $\eta_p^2 = 0,97$). Des comparaisons paires à paires avec des tests de Scheffé ne montrent aucune différence significative entre les conditions d'Angles d'approche de la cible pour les groupes de 9-10 ans, 11-12 ans et 13 ans et plus (tous les $p > 0,05$).

L'ANOVA montre enfin un effet principal de la Direction du mouvement ($F(1, 75) = 203,9$, $p < 0,01$; $\eta_p^2 = 0,73$). Les jugements d'atteignabilité montrent une surestimation moins importante quand le stimulus a un mouvement centrifuge ($M = 1$ %, $SD = 8,9$ %) plutôt que centripète ($M = 16,7$ %, $SD = 10,2$ %). La comparaison planifiée montre que cet effet de la

Direction du mouvement de la cible est plus important pour les enfants de 7-8 ans par rapport à tous les autres groupes.

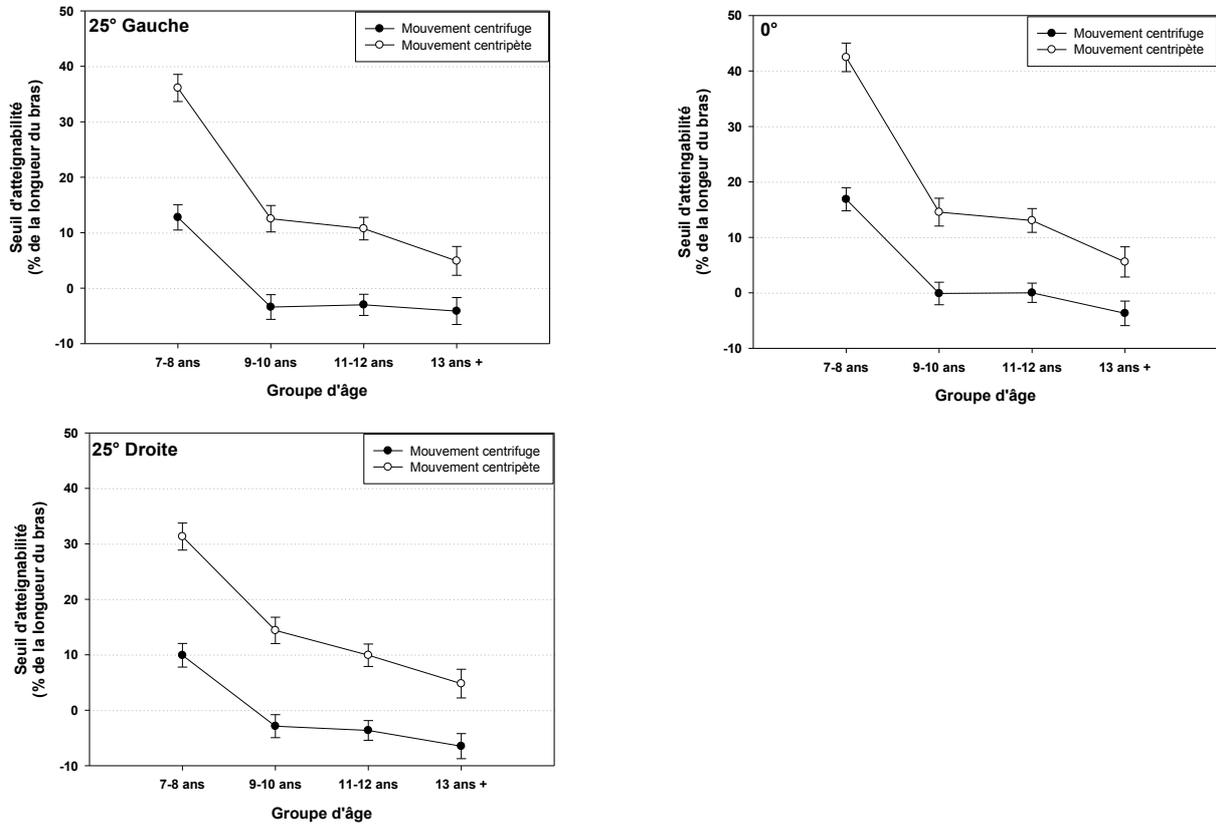


Figure 2: Seuil perçu d'atteignabilité (en % de la longueur du bras) et écart type en fonction de la direction du mouvement et du groupe d'âge pour les stimuli visuels présentés à 0°, 25° à gauche, ou 25° à droite.

3.2. Variabilité individuelle dans les jugements perceptifs

L'ANOVA montre un effet significatif du Groupe d'âge sur la variabilité intra-individuelle des jugements d'atteignabilité ($F(3, 75) = 4,17$, $p < 0,01$; $\eta_p^2 = 0,14$). La comparaison planifiée montre que la variabilité intra-individuelle des enfants du groupe 7-8

ans ($M = 4 \%$, $SD = 0,9 \%$) est significativement plus élevée que celle des enfants du groupe 11-12 ans ($M = 2,9 \%$, $SD = 0,9 \%$) , ($F(1, 75) = 8,17$, $p < 0,01$; $\eta_p^2 = 0,89$). Des comparaisons paires à paires, réalisées avec des tests de Scheffé, ne montrent aucune différence significative entre les autres groupes d'âge (tous les $p > 0,05$).

L'ANOVA, de même que les comparaisons planifiées ne révèlent aucun effet significatif des facteurs Angle d'approche ou Direction du mouvement ni aucune interaction entre ces facteurs.

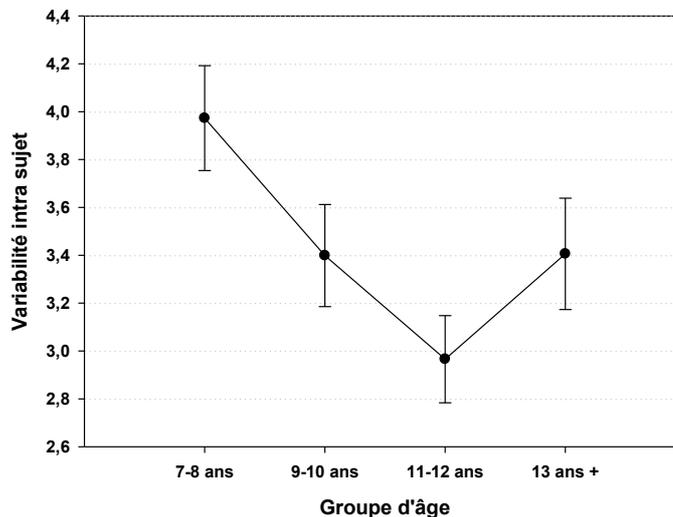


Figure 3: Variabilité intra-participants des jugements d'atteignabilité en fonction du groupe d'âge.

4. Discussion

L'objectif de cette étude était d'évaluer de manière précise l'évolution de la perception de l'espace péripersonnel chez les enfants âgés de 7 à 14 ans. Les résultats obtenus lors de cette étude mettent en évidence (1) un important effet de l'âge sur la perception de l'espace péripersonnel, les enfants les plus jeunes surestimant davantage leur espace péripersonnel que

les enfants plus âgés (24,9% pour les enfants du groupe 7-8 ans contre 0,1% en moyenne pour ceux du groupe 13 ans et plus). Ces données sont cohérentes avec les observations précédemment réalisées par Gabbard et al. (2007). Nous avons également observé un effet de l'angle d'approche et de la direction du mouvement du stimulus visuel similaire à ceux observés chez des adultes (Fischer, 2005). L'effet de l'angle renverrait à une moins grande précision de l'estimation des capacités d'action pour des stimuli visuels localisés du côté opposé à la main dominante (Milhau, Brouillet, & Brouillet, 2013; Stins, Kadar & Costall, 2001). L'effet du sens de déplacement, c'est à dire l'influence de la position de départ du stimulus visuel sur le jugement d'atteignabilité reflèterait une anticipation du déplacement du stimulus visuel et une prise en compte du temps de trajet moteur conforme à ce qui se produirait si le participant devait réellement atteindre la cible dans une tâche d'interception manuelle (Fischer, 2005; Rodríguez-Herreros, de Grave, López-Moliner, Brenner & Smeets, 2013).

Un résultat majeur qui ressort de ces données est l'évolution non linéaire de la précision des jugements d'atteignabilité au cours du développement, avec un changement brusque entre 7-8 ans et 9-10 ans (**2** et **3**). Cette discontinuité comportementale suggère une modification qualitative autant que quantitative de la perception de l'espace péripersonnel. Ainsi, les enfants de 7-8 ans montrent un patron de réponse marqué à la fois par une surestimation beaucoup plus importante de l'espace péripersonnel que les enfants plus âgés, mais également par une influence plus grande sur leurs performances des contraintes de présentation du stimulus visuel, comme l'angle ou la direction du mouvement du stimulus visuel. La différence observée selon que le stimulus visuel est présenté sur la droite ou sur la gauche est en effet significative chez les enfants de 7 et 8 ans et disparaît chez les enfants plus âgés. De même, l'effet différentiel selon que le stimulus visuel se déplace en suivant une trajectoire centrifuge ou centripète est également plus important chez les enfants de 7 et 8 ans que chez

les enfants plus âgées. Après 10 ans, la perception de l'espace péripersonnel chez les enfants atteint un niveau de performance qui semble comparable à celui des adultes, avec en moyenne une surestimation de leurs capacités d'action de 2,9%, ce qui est compatible avec les observations faites chez l'adulte (Carello et al. 1989 ; Rochat & Wraga, 1997).

La perception de l'espace péripersonnel implique une intégration des informations visuelles et motrices au sein de représentations multimodales relatives au corps et à ses capacités d'action. Il a été montré qu'au cours de la période 8-10 ans les enfants acquièrent la capacité d'intégrer de manière optimale les informations sensorielles multimodales (Gori et al. 2006) et sensorimotrices (Choudhury et al., 2007). La moins grande flexibilité des représentations sensorimotrice avant cet âge rendrait les enfants plus sensibles aux variations de présentation des stimuli visuels (Houdé, 2000), tels que l'angle et la direction du déplacement, et influencerait leur perception de l'espace péripersonnel.

En conclusion, les données recueillies au cours de cette étude mettent en évidence une discontinuité comportementale dans l'évolution de la perception de l'espace péripersonnel. Nous relierons ces résultats à d'autres exemples de discontinuité observée aux mêmes âges dans des tâches nécessitant la mise en relation d'informations visuospatiales et sensori-motrices (contrôle de l'équilibre, Assaiante & Amblard, 1995; contrôle des gestes d'atteinte manuelle, Bard, et al., 1990; et des gestes graphiques, Meulenbroek & Van Galen, 1989 ; perception de la taille et des orientations, Gori et al., 2006; ou encore intégration de signaux unimodaux, Nardini et al., 2010). Ces discontinuités développementales semblent liées à l'existence d'une période critique de réorganisation qualitative des processus de traitement de l'information visuelle et sensori-motrice sous-tendant la cognition spatiale. Cette période critique de réorganisation qualitative des traitements sensorimoteurs, influençant notamment la représentation de l'espace péripersonnel, est en accord avec la proposition de Karmiloff-Smith (1992) de l'existence de deux processus au cours du développement : un processus de

modularisation progressive par lequel des capacités générales deviennent spécialisées et un processus de redescription par lequel l'information implicite dans le système cognitif devient progressivement explicite à ce système. Ces processus et ce type de discontinuité dans la trajectoire développementale représentent un marqueur important de différence qualitative dans le développement (Fischer & Immordino-Yang, 2007). Ces marqueurs sont associés selon Fischer à des cycles de développement et de maturation cognitifs et neurophysiologiques. Ils sont caractérisés par des alternances de périodes de stabilité et de changements rapides dans les performances comportementales et dans la maturation structurale et fonctionnelle du réseau neuronal (Fischer & Immordino-Yang, 2007 ; Fischer, 2008). D'après Fischer (2008), de tels cycles de développements sont observables de la naissance jusqu'à l'âge adulte et au-delà, ils correspondent à une intégration et une mise en interaction et une coordination d'éléments cérébraux, corporels, comportementaux et environnementaux, initialement indépendants en une entité plus complexe. La description du développement ontogénétique de Fischer décrit l'existence de telles discontinuités entre 7 et 12 ans (Fischer & Immordino-Yang, 2007; Fischer, 2008). Fischer interprète ce cycle particulier comme l'acquisition de la capacité à lier entre elles des représentations mentales initialement indépendantes, en un système plus complexe, permettant une acquisition progressive des capacités d'abstraction chez l'enfant (Fischer, 1980; Fischer, 2008). L'étude présentée ici montre que la période d'âge entre 7-8 et 9-10 ans représente une période critique pour la mise en œuvre des processus de la perception visuospatiale impliquant les représentations motrices.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les enfants ayant participé cette étude, leurs parents, ainsi que les personnels de l'école Pierre Mendès-France et du collège Léo Lagrange de Fourmies, Nord-Pas-de-Calais.

Références bibliographiques

- Assaiante, C., Amblard, B. (1995). An ontogenetic model for the sensorimotor organization of balance control in human. *Human Movement Science*, 14, 13-43.
- Bard, C., Hay, L., & Fleury, M. (1990). Timing accuracy of visually directed movement in children: control of direction and amplitude components. *Journal of Experimental Child Psychology*, 50, 102-118.
- Barutchu, A., Crewther, D. P., & Crewther, S.G. (2009). The race that precedes coactivation: Development of multisensory facilitation in children. *Developmental Science*, 12, 464-473.
- Bourgeois, J., & Coello, Y. (2012). Effect of visuomotor calibration and uncertainty on the perception of peripersonal space. *Attention, perception and psychophysics*, 74, 1268-1283.
- Bourgeois, J., Farné, A., Coello, Y. (2014). Costs and benefits of tool-use on the perception of reachable space. *Acta Psychologica*, 148, 91-95.
- Brozzoli, C. Gentile, G., Petkova, V.I., & Ehrsson, H.H. (2011). fMRI adaptation reveals a cortical mechanism for the coding of space near the hand. *The Journal of Neuroscience*, 31(24), 9023–9031.
- Carello, C., Groszofsky, A., Reicher, F. D., Solomon, H. Y., Turvey, M. T. (1989). Visually perceiving what is reachable. *Ecological Psychology*, 4, 1-16.
- Caroll, J. J., & Gibson, E., J. (1981). Differentiation of an aperture from an obstacle under condition of motion by three-month-old-infants. Paper presented at the meeting of the society of research in child development, Boston, MA.
- Choudhury, S., Charman, T., Bird, V., & Blakemore, S. J. (2007). Adolescent development of motor imagery in a visually guided pointing task. *Consciousness and Cognition*, 16(4), 886-896.
- Coello, Y., Delevoye-Turrell, Y. (2007). Embodiement, space categorisation and action. *Consciousness and Cognition*, 16, 667-683.
- Cutting, J.E., & Vishton, P.M. (1995). Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth. In W. Epstein & S. Rogers (Eds.), *Handbook of perception and cognition* (pp. 69-117). San Diego, CA: Academic Press.
- Field, J. (1976). Relation of young infants reaching behaviour to stimulus distance and solidity. *Developmental psychology*, 12, 444-448.
- Fischer, M. H. (2005). Perceived reachability: the roles of handedness and hemifields. *Experimental Brain Research*, 160, 283-289.
- Frick, A., Daum, M. M., Wilson, M., & Wilkening, F. (2009) Effects of action on children's and adults' mental imagery. *Journal of experimental child psychology*, 104, 34-51.

- Gabbard, C., Cordova, A., & Ammar, D. (2007). Estimation of reach in peripersonal and extrapersonal space: a developmental view. *Developmental Neuropsychology*, 32(3), 1-8.
- Gabbard, C., Cordova, A., & Lee, S. (2009). Do children perceive postural constraints when estimating reach or motor planning? *Journal of Motor Behavior*, 41(2), 100–105.
- Gallese, V. (2005). Embodied simulation: from neurons to phenomenal experience. *Phenomenology and Cognitive Sciences*, 4, 29-48.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach in visual perception*. Boston: Houghton Mifflin.
- Gori, M., Del Viva, M., Sandini, G., & Burr, D. C. (2008). Young children do not integrate visual and haptic form information. *Current Biology*, 18, 694-698.
- Grush, R. (2004). The emulation theory of representation: motor control, imagery, and perception. *Behavioral and Brain Sciences*, 27, 377-442.
- Grusser, O. J. (1983). Multimodal structure of the extrapersonal space. In A. Hein & M. Jeannerod (Eds.), *Spatially oriented behavior* (pp. 327-352). Springer New York.
- Held, R & Hein, A. (1963). Movement-produced stimulation in the development of visually guided behaviour. *Journal of comparative and physiological psychology*, 56, 872-876.
- Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G., & Prinz, W. (2001). The theory of event coding (TEC): A framework for perception and action planning. *Behavioral and Brain Sciences*, 24, 849–937.
- Houdé, O. (2000). Inhibition and cognitive development: Object, number, categorization, and reasoning. *Cognitive Development*, 15, 63-73.
- Iriki, A., Tanaka, M., & Iwamura, Y. (1996). Coding of modified body schema during tool use by macaque postcentral neurones. *NeuroReport*, 7(14), 2325–2330.
- James, W. (1890). *The principle of psychology*. London: Macmillan.
- Jeannerod, M. (2001) Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition. *Neuroimage* 14, S103–S109.
- Karmiloff-Smith, A. (1992). *Beyond Modularity: A Developmental Perspective on Cognitive Science*. Cambridge, Mass.: MIT Press/Bradford Books.
- Maravita, A., Iriki, A. (2004). Tool for the body (schema). *TRENDS in cognitive neuroscience*, 8, 79-86.
- Meulenbroek, R. G., & Van Gallen, G. P. (1988). The acquisition of skill handwriting: Discontinuous trends in kinematics variables. In A. M. Colley & J. R. Beechs Eds., *Cognition and Action in Skill Behavior*, pp273-281. Amsterdam: North Holland.

- Milhau, A., Brouillet, T., & Brouillet, D. (2013). Biases in evaluation of neutral words due to motor compatibility effect. *Acta psychologica*, 144(2), 243-249
- Molina, M., Tijus, C., & Jouen, F. (2008). The emergence of motor imagery in children.
- Nardini, M., Bedford, R., & Mareschal, D. (2010). Fusion of visual cues is not mandatory in children. *Proceedings of the National Academy of Science-USA*, 107 (39), 17041-17046.
- Nardini, M., Jones, P., Bedford, R., & Braddick, O. (2008) Development of cue integration in human navigation. *Curr Biol* 18:689–693.
- Noe, A. (2004). *Action in perception*. The MIT press, Cambridge (MA).
- Piaget, J. & Inhelder, B. (1966). *La psychologie de l'enfant*. Presse Universitaire de France (Ed).
- Previc, F. H. (1998). The neuropsychology of 3-D space. *Psychological Bulletin*, 124(2), 123-164.
- Rochat, P. (1992). Self-sitting and reaching in 5-8 month old infants: the impact of posture and its development to early eye-hand coordination. *Journal of Motor Behavior*, 24(2), 210-220.
- Rochat, P. (1995). Perceived reachability for self and other by 3-to 5-year old children and adults. *Journal of Experimental Child Psychology*, 59, 317-333.
- Rochat, P., & Goubet, N. (1995). Development of sitting and reaching in 5-to 6- month old infants. *Infant Behavior and Development*, 18, 53-68.
- Rochat, P., & Striano, T. (2000). Perceived self in infancy. *Infant Behavior & Development*, 23, 510-530.
- Rochat, P., Wraga, M. (1997). An account of the systematic error in judging what is reachable. *Journal of Experimental Psychology*, 23(1), 192-212.
- Rodríguez-Herreros, B., de Grave, D. D. J., López-Moliner, J., Brenner, E., & Smeets, J. B. J. (2013). Shifted visual feedback of the hand affects reachability judgments in interception. *Vision Research*, 88, 30-37.
- Shin, Y.K., Proctor, R.W., & Capaldi, E.J. (2010). A Review of Contemporary Ideomotor Theory. *Psychological Bulletin*, 136, 943-974.
- Stins, J. F., Kadar, E. E., & Costall, A. (2001). A kinematic analysis of hand selection in a reaching task. *Laterality*, 6, 347-367.
- Witt, J.K., & Proffitt, D.R. (2008). Action-specific influences on distance perception: a role for motor simulation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 34, 1479-1492.
- Witt, J.K., Proffitt, D.R., & Epstein, W. (2005). Tool use affects perceived distance but only when you intend to use it. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31, 880-888.
- Wolpert, D.M. & Flanagan, J.R. (2001). Motor Prediction. *Current Biology* 11(18) R729-732.

IV. 3. Étude 2 : Relations entre perception des limites de l'espace d'action et imagerie motrice chez l'enfant

Présentation de l'étude

La première étude a permis de mettre en évidence une évolution de la perception spatiale en fonction de l'âge. Nous avons mis en place cette seconde étude transversale avec un double objectif. Dans un premier temps, nous nous attendions à répliquer les résultats obtenus lors de la première étude avec l'utilisation d'une mesure psychophysique du seuil d'atteignabilité par la méthode des stimulus constant. Dans un second temps, nous avons proposé une série de tâches d'imagerie aux participants, avec l'objectif de mesurer d'éventuelles variations concomitantes des performances dans ces tâches. Nous avons établi et proposé à des enfants de 8 à 12 ans, une tâche d'atteignabilité, ainsi que des tâches d'imagerie motrice, de rotation mentale et d'imagerie visuelle. Nous nous attendions à observer, à l'instar de l'étude 1, des variations des performances de jugements d'atteignabilité en fonction de l'âge, ainsi qu'à observer les changements plus importants entre les âges de 8 et 10 ans. De plus, nous nous attendons à des changements similaires dans les tâches d'imagerie.

Résumé des principaux résultats

Les données issues des tâches de rotation mentales et d'imagerie visuelle n'ont pas été incluses dans l'analyse finale. En effet, les résultats de ces 2 tâches papier crayon n'ont montré aucune différence entre les performances en fonction des différents groupes d'âge. D'un point de vue méthodologique, il semble pertinent d'envisager que le format choisi pour ces tâches n'ait pas été le plus adapté pour identifier la trajectoire développementale. Une étude plus approfondie de la littérature dans ce domaine montre en effet que les différences observées

dans ce type de tâches concernent généralement les données temporelles (TR et TM) plutôt que l'exactitude des réponses. Nous avons toutefois confirmé l'hypothèse d'une évolution des jugements d'atteignabilité en fonction de l'âge en répliquant les résultats de l'étude 1. De plus nous avons également confirmé que les changements les plus importants sont observés entre 8 et 10 ans. Durant cette période, les performances d'imagerie motrice évoluent également, et présentent un pattern de discontinuités indiquant également des changements qualitatifs entre les enfants les plus jeunes et les plus âgés.

Development of perception of peripersonal space and motor imagery in 8-to12-years old children.

Richez, A & Coello, Y.

Abstract

Delimitating peripersonal space which contains reachable objects requires combining visual information about objects' location with representations of the body and action possibilities, which have been shown to improve during childhood. In particular, a critical period during development between 8-10-years seems characterised by a qualitative change in the way sensory and motor information are combined in perceptual or motor tasks. In the present study, we analysed reachability judgments in 7- to 12-year-old children and adults and their motor imagery ability. Results showed that reachability judgments improved with age with a period of major change in children aged 8 to 10 years. During this period, younger children substantially overestimated their peripersonal space while older children showed much less overestimation though still above adult level. In the motor imagery task, an effect of age following an U-shaped curve was also observed, with the lowest performance being observed at 9 years of age. Considered together, these results show an age dependent representation and modulation of peripersonal space in relation to motor imagery with a critical period between 8-10-years of age, suggesting a transformation during this period in the way motor-related information influences perceptual and cognitive tasks.

Key words : spatial perception, development, motor imagery, reachability.

1. Introduction

During the last half century, philosophers, psychologists and neuroscientists have underlined the early role of action in the development of perception and cognition (e.g. Held & Hein, 1963 ; Piaget & Inhelder 1966 ; Merleau-Ponty, 1945 ; Gibson, 1979 ; Noe, 2004). In line with this, the perception of visual surfaces and 3D objects was found to depend not only on the sensitivity of the visual system to size, distances and depth cues, but also on the capacity to use information relating to our own body properties, and about previous experiences of opportunities, effects and costs of acting in the environment (Fine et al. 2003 ; Held & Hein, 1963 ; Noppeney, 2008). The field of spatial vision thus came up with definitions of several areas of space, with different properties and relying upon specific neuronal networks (Trevarthen, 1968 ; Previc, 1998). We'll focus in this paper, on the peripersonal space, defined following Fred Previc's works, as all the location in space that could be reached without any body displacement (Previc, 1998). The peripersonal space is thus by this definition a dynamic area, involving microgenetic change, such as body injuries that restraint movement, expertise on specific movements or the use of tools to reach location without any displacement (Holmes & Spence 2004 ; Coello & Delevoye-Turell, 2007 ; Previc, 1998). The perception of peripersonal space also involves the ontogenetic changes, like the growth of the body segment across age, and the possible changes in the way children process visual information in relation to action and body representation.

In adults, evidence for a contribution of the motor system to the representation of peripersonal space is now well admitted. These evidence have been principally provided by studies showing that orienting attention toward objects in peripersonal space (Culham, Gallivan, Cavina-Pratese & Quinlan, 2008) or judging whether an object is reachable (Delevoye-Turell, Bartolo & Coello, 2010) is subtended by similar (i.e overlapping) neuronal networks than when actually performing action on these objects (Coello & Bidet-Ildéi, 2012 ;

Decety, 1996 ; Sirigu, Duhamel, Cohen, Pillon, Dubois & Agid, 1996). Thus representations of peripersonal space appear to be built upon functional properties, with the need to be regularly updated with the integration of multisensorial information.

Peripersonal space seems to be detectable from very early in childhood and be determined from the appreciation of the critical distance at which objects are reachable (Clifton, Rochat, Robin & Berthier, 1994 ; Field 1976 ; Yonas and Hartman 1993). For instance, Rochat and Wraga (1997) presented children of less than one year with objects presented either within reaching distance, at the boundary of, or outside their peripersonal space. They found a marked decrease in the frequency of reach attempts for objects placed near the boundary of peripersonal space or in extrapersonal space. However, up to an advanced age, although capable of discriminating objects that can be reached, children misperceive the actual size of their peripersonal space with a tendency to overestimate it much more than adults do (Gabbard, Cordova & Ammar, 2007). A potential explanation for this overestimation is that peripersonal space representation depends on visual information but also on the level of postural control (Rochat & Goubet, 1995) and body segments control (Gabbard, Cordova & Lee, 2009 ; Yonas & Hartman, 1993). In line with this idea, the degree of control of the sitting position in young children was found to correlate with reaching attempts for targets near the boundary of peripersonal space and a decrease of errors in these reaching attempts (Yonas & Hartman, 1993 ; Rochat & Goubet, 1995). Congruently with Carello et al. seminal work (Carello, Groszofsky, Reicher, Solomon, & Turvey, 1989), Gabbard et al. (Gabbard, Cordova & Ammar, 2007) found that adults overestimate their reaching capacities while seated, but to a less extent when submitted to lower postural stability associated with the standing position.

During the ontogenetic development, as the nervous system matures, both structurally and functionally, children gradually improve their capacity to process and integrate uni- and

multi-modal information, and thus to identify objects located in their peripersonal space (Nardini, Bedford & Mareschal, 2010 ; Gori, Del Viva, Sandini & Burr, 2008). This maturation is also accompanied by an ever growing perceptual and motor experience of the world. A domain specific approach of cognitive and perceptual and motor knowledge development would argue that representations of peripersonal space are build, since birth, upon specifics networks and process of information treatments (Hermer & Spelke 1996), to produce the specifics behavioral properties exhibited by toddler and children (Yonas & Hartman, 1993 ; Rochat & Goubet, 1995). These Domain specifics knowledge and representations about the environment and its properties are believed to be progressively linked along the ontogenetic development to other domain specifics information and process, through for example, the process a modularization process by a representational redescription, as described by Annette Karmiloff-Smith (1992). The domains are, in Karmiloff-Smith approach, a set of representations, innate, and limited to a certain array of knowledge. They start to interact between each other along development, because of the structural maturation of the nervous system and the functional maturation through experience and contacts with the environment, and start by this mean to lose their specificity. Representational redescription consists thus to redescribe the world and its properties, beginning with an implicit and very narrow format to a more complex, explicit and less specifics one. The development is not for Karmiloff-Smith only focus upon acquiring new knowledge and elaborate new process, but also to build model and theories about how these procedure works. Thus on the opposite of the Piagetian theories, the driving force of cognitive development would not be a disequilibrium state, forcing children to adapt their mental structure (assimilation) or create new structure (accommodation to adapt to the world). For Karmiloff-Smith, the representational redescription is rather made possible by a certain level of stability of performance within a domain, i.e. when children had acquired a certain level of mastery in

that domain. This approach gives some heuristic tool of what should be relevant for a developmental psychologist to assess and look for in children performance to describe their cognitive development. Indeed, looking for discontinuities in the developmental trajectories of behavioral performances, with plateau period of stability, interspersed with more or less quick changes, should point to qualitative changes in the way children build and process representation of their peripersonal space. Similar theoretical and methodological concerns had been addressed by Kurt Fischer in his dynamics skills models (see for a review Immordino-Yang & Fischer, 2007; Rose & Fischer, 2008). He describes how several cerebral elements, as well as bodily and behavioral ones, progressively interacts with each other, and match and coordinate themselves into more complex and interdependent units. Along the ontogenetic development, cycles of stability and growth and quick changes are observed on these elements. Each cycle marked at its beginning by discontinuities in developmental trajectories. These cycles, would repeat at each developmental level when critical key steps are reached, in the development of specific cognitive functions and processes as well as in the cerebral development (Fischer & Bidell, 1998 ; Fischer & Rose, 1994 ; Immordino-Yang & Fischer, 2007).

In the context of spatial vision and the organization of motor behavior in peripersonal space, several previous studies have revealed the presence of such critical period of developmental discontinuities. For example, in the way children process uni-and multi-modal source of information to perform judgment about object's intrinsic properties, such as their relative size, orientation or slant (Gori & Del Viva, Sandin & Burr, 2008 ; Nardini, Bedford & Mareschal, 2010). More specifically, this very studies point out the period between 8-to10-years of age to be relevant in this context. Children before that period, appears to process sensory and sensorimotor information in a completely different fashion that after this period while the 8-to10-years period would rather be characterized by the installation of the more

mature process later observed and behaviorally marked by mixed profile in performance (Gori & Del Viva, Sandin & Burr, 2008 ; Nardini, Bedford & Mareschal, 2010). This period coincides with one of the cycle described by Rose & Fischer (2008), and is associated with several other discontinuities and qualitative changes in, motor tasks (Meulenbroek & Van Galen, 1989 ; Bard, Hay & Fleury, 1990), perceptual-motor tasks (Assaiante & Amblard, 1995 ; Jansen-Osman, Richter, Konczak, & Kalveram, 2002; Thibault and Toussaint, 2009). To account for this critical period of qualitative change, it has been suggested that before the age of 8-10 years, children have difficulty in combining multimodal information in an optimal way (Gori & Del Viva, Sandin & Burr, 2008). For example in orientation, size or slant perception, performances of children younger than 8-year-old reflect the dominance of one sensory channel upon the other depending on the task, instead of optimally combining sensory signals as older children and adults do (Nardini, Bedford & Mareschal, 2010 ; Gori & Del Viva, Sandin & Burr, 2008 ; Ernst & Banks, 2002). The difference in the performance between younger and older children was interpreted as resulting from improved capacities of combining sensory and motor information within internal predictive models subtending voluntary actions. In agreement with this, it was observed that children after the age of 8 years reveal a higher sensitivity to the desired final state of their upper limbs before producing voluntary actions (end-state comfort effect, Thibault & Toussaint, 2009 ; Adalbjornsson, Fischman & Rudisill, 2008).

During the same period, it has been observed that motor imagery capacity improves (Molina, Tijus & Jouen 2008 ; Frick, Daum, Wilson & Wilkening, 2009). Motor imagery is conceived as a dynamic state during which an individual mentally simulates a given action based on the motor representations acquired during past experiences (Decety & Grezes, 2006). It is thus the explicit use of internal representation to simulate an action that could potentially be realized in the environment, in order to figure out the output of such action or to

train and familiarize oneself with this action and as Marc Jeannerod defined I is a covert action (Jeannerod, 2001). The functional bases of motor imagery would thus be the use of the motor, visual and sensorimotor systems, and the integration of all its sources of information. During ontogenetic development, improvement in motor imagery and actual motor performance seems tightly linked (Choudhury, Chaman, Bird & Blakemore, 2007a, 2007b). As a consequence, children with functional motor impairment such as developmental coordination disorders show lower skills in motor imagery tasks than children with no motor impairments (Wilson, Maruff, Ives & Curries, 2001), and the deficit seems proportional to the severity of the functional motor impairments (Williams, Thomas, Maruff, & Wilson, 2008). The motor imagery, if often related to the broader concept of motor simulation, used in computational models of motor control such as the internal models metaphors proposed by Daniel Wolpert and his colleagues (Miall & Wolpert, 1996 ; Wolpert, 1997 ; Wolpert, Gharamani & Flanagan, 2001 ; Wolpert & Flanagan, 2001). The motor simulation theory refers to the fact that the neural system should be able to simulate, quite precisely a motor action to, for example, detect any discrepancies between an actual motor command, the desired motor output and ongoing sensorimotor feedback, and thus adapt the motor command to anticipate errors and cope with rapid or non predictable environmental changes (Voss, Bays, Rothwell & Wolpert, 2007 ; Bays, Wolpert & Randall Flanagan, 2005). The main difference between motor imagery and motor simulation, would be the explicit an active nature of motor imagery while motor simulation would be a largely implicit and unconscious process. Motor simulation is nonetheless thought to be involved for instance, in the sense of agency (being able to determine if we're the actor of our own action), or in predictions and judgement about the feasibility of potential actions (Shergill, Bays, Frith & Wolpert, 2003 ; Blakemore, Wolpert & Frith, 2000 ; Jeannerod, 2001). Accordingly, it has been proposed that improvement in detecting reachable objects in peripersonal space should be observed when

motor imagery ability improves. Indeed, previous studies have suggested that objects presented in peripersonal space but not those presented in extrapersonal space are automatically coded in motor terms (Farne & Ladavà, 2000 ; Jeannerod, 2006 ; Coello & Delevoeye-Turrell, 2007 ; Gallese, 2005, 2007) through internal forward models (Grush, 2004 ; Schwoebel, Boronat, & Coslett, 2002 ; Wilson, 2003 ; Wolpert & Flanagan, 2001) according to an egocentric frame of reference (Graziano, 1999 ; Gallese & Lakoff 2005 ; Makin, Holmes, & Zohary, 2007). Though motor imagery and simulation could be involved either explicitly or implicitly in a variety of cognitive activities including goal directed actions (Jeannerod & Frak, 1999 ; Jeannerod, 2001 ; ter Horst, van Lier, & Steenbergen, 2011), they are considered as underpinned by similar motor representations created around the motor system as well as overlapping neural networks (Jeannerod, 2006). However, despite the existing literature on perception, motor production and motor imagery improvements in children, we lack precise information on the developmental aspect of the potential relations between motor imagery ability and the representation of peripersonal space, which represents the aim of the present study. In this context, we designed a cross-sectional study to assess in 7- to 12-year-old children and adults the perception of objects' reachability in relation to motor imagery ability. Indeed, this particular period has been defined as relevant in the context of spatial perception, sensorimotor integration and motor control, and could represent a critical key period as defined by Fischer model (Immordino-Yang & Fischer, 2007).

Considering the spatial perception as a dynamical skills, we thus expect to observe some qualitative changes in the performances of children in both reachability judgement task and motor imagery tasks. More precisely, we hypothesized variation along age of the perceived limit of peripersonal space across Age-group. We thus also expect variation across Age-group of either the correlation between Actual and Imagined movement times, or correlation between ID and Executed or Imagined movement times. Reflecting a discontinuity and the

beginning of a developmental cycle, we expect to observe non linear behavioral trajectories in both those tasks, with the more changes observed during the 8-to 10-years period. According to the motor simulation assumption about the perception of peripersonal space, we should expect a certain degree of correlation between the performance in the 2 tasks, if not in all children, this correlation should be observable for children after 10-years of age.

2. Method

2.1. Participants

A total of 125 children (age range 7 years, 7 months to 12 years, 2 months ; M = 10 years 2 months, SD = 1 year 6 months) were recruited from French public elementary schools (grades 4 to 8). The children population was then divided into 5 groups, according to participants' age: 8-years-old (n = 33 ; M = 8 years 3 months, SD = 6 months ; 4 left-handed), 9-years-old (n = 34 ; M = 9 years 5 months, SD = 3 months ; 5 left-handed), 10-years-old (n = 31 ; M = 10 years 6 months, SD = 3 months ; 3 left-handed), 11-years-old (n = 25 ; M = 11 years 6 months, SD = 4 months ; 3 left-handed) and 12-years-old (n = 18 ; M = 12 years 6 months ; SD = 6 months ; 3 left-handed). Seventeen adults (M = 25 years 7 months, SD = 3 years 4 months ; 2 left-handed) also participated in the experiment.

Before starting the experiment, consents were obtained from the French National Education Services as well as from the children and their parents. Though practical information was provided, none of the children was informed prior to the experimental session about the actual aim of the study. Full explanations were however given at the end of the experiment and results were shown afterwards to the children. None of the participants

had records of developmental, neurological, psychiatric disorders or any kind of motor impairment. All had a normal (or corrected to normal) vision and were right handed.¹

2.2. Apparatus and Stimuli

Participants performed two tasks: a reachability judgment task and a motor imagery task. In the reachability judgment task, children sat in front of a 21" LCD monitor horizontally laid flat on a table along the mid-body sagittal axis. Vertical, eye-to-table, distance and horizontal, shoulder-to-table, distances were both fixed at 35 cm in order to provide similar viewing condition to all participants. To enable a precise psychophysical assessment of the reachability threshold, thirty-three targets (green dots, diameter: 16 mm) were presented on the computer screen within a range of 38.4 cm with an inter-targets interval of 1.2 cm. Responses were provided by the participant using a computer mouse held in the right hand (yes-and-no responses were assigned to the 2 mouse buttons). Colour dots and yes/no indications were present on the response button in order to facilitate the selection of the mouse button that corresponded to the children's intended response.

In order to evaluate the effect of perceive targets layout on reachability judgements, participants were randomly assigned to 2 experimental groups. In the first group (symmetrical layout), the screen position was adjusted so that the actual reaching distance corresponded to the central target (17th target upon 33). Thus, half of the targets were actually reachable by the participants (target distances ranged from -19.2 cm up to +19.2 cm from the actual threshold). In the second group (asymmetrical layout), the screen was placed so that the actual reaching distance did not correspond to the central target (13th target upon 33). Thus, about 37% of the

¹ The experimental tasks were proposed to voluntary children, and assessments were presented as a kind of practical class with a few exercises proposed in order to help the experimenter gathering scientific information. The children were then keen on participating in the study and they stayed all motivated while performing the tasks.

targets were actually reachable (targets ranged from -14.4 cm up to 24 cm according to the actual threshold). The screen adjustment was made just before the beginning of the experimental session. The experimenter passively extend the arm of each participant to adjust the position of the screen according to the experimental group he was assigned. This was made with the participant eyes' closed. Thus, the participants doesn't had any cue about which position on the screen were reachable location or not.

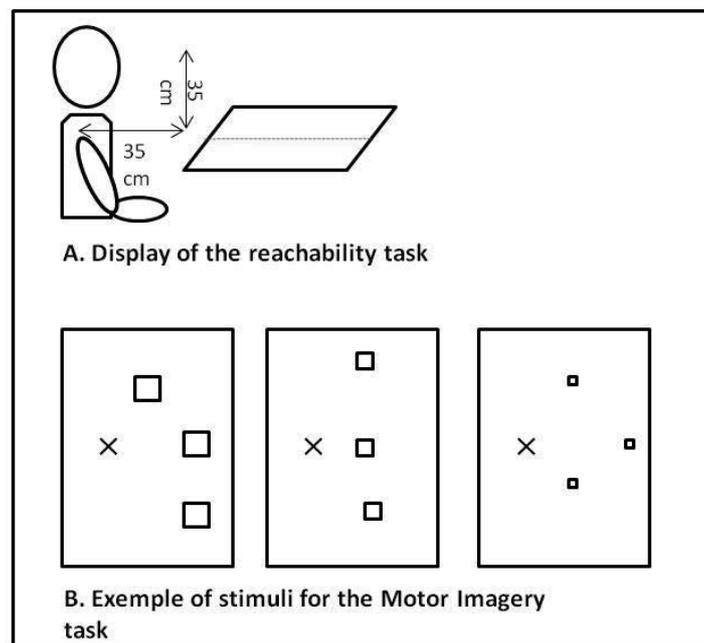


Figure 1: Experimental setup for the Reachability task (A) and the Motor Imagery Task (B)

The motor imagery task consisted in two condition: an actual movement condition and an imagined movement condition, always performed in this order. In, both condition, the stimuli consisted in an A5 sheet of paper containing a starting position represented by a cross and 3 square-shape targets visible on the right-hand side (Figure 1). Square-shape targets had a side-size of 0.5 cm, 1 cm or 2 cm and were located at 3 cm, 5 cm or 8 cm from the starting location. All targets on the same display were of same size but distance of each target from starting position could vary according to a pseudo-random order, giving then rise to 18

different target layouts. Each target size and distance combination were presented 6 times. Fitts' law was used to compute an Index of Difficulty (ID) for each target-distance combination (according the following equation: $MT = a + b * \log_2 (2D/W)$, with MT corresponding to movement time, D and W being respectively the target distance and width). Depending on the target distance and size used in the experiment, the Index of Difficulty corresponding to the different size-distance combinations were: 1.32, 1.81, 2.00, 2.32, 2.58, 2.81, 3.17, 3.46 and 4.09.

This method was originally created by Sirigu & al (1996), and from then was used several times (Choudhury & Blakemore, 2007a, 2007b ; Maruff & Wilson, 1999, Williams, Thomas, Maruff & Wilson, 2008). However, we introduce one major modification of this protocol for this study. Instead of presenting participant with several back-and-forth movements to a single target (usually 5), we asked them to realise a unique back-and-forth movements toward multiple targets. The original stimuli and procedure, using several movements, were pretested with adult participants but failed to replicate previous results (as Sirigu & al., 1996 ; or Choudhuri, Charman, Bird & Blakemore, 2007a, 2007b). Debriefing session with all the adults participant of the pretest showed that it was probably due to a counting bias while realizing the task: the motor imagery strategy was not a relevant enough strategy to perform the task because the distance and position of the center of the target relatively to the starting location was always the same. A simple counting strategy, thus not at all referring to any imagery process, has been used by most participants despite of the instructions and good will to perform the task. Multiple targets and different target location from trial to trial were thus used to elicit a true motor imagery strategy, forcing the participants to process each trial differently and to account for their relative size and distance to the starting location. The main result of this shift in procedure is a violation in Fitts law when regressing MT only on ID due to the programming of a whole motor sequence to

different targets and not the repetition of the same movement to a unique one. Indeed, the movement is a sequence of 3 pointing movements, and each movement is influenced by the previous and the following ones, thus the regression by Fitts law loses some power to explain all the variation in MT. As our aim was to perform correlation analysis between actual and imagined condition along age group this artefact was considered as acceptable, regarding to the benefits and the purpose of the study. Our actual procedure, material and instruction were thus designed to prevent this counting bias and to ensure that children participants would use a motor imagery strategy to perform the task.

A set of mirror-inversed stimuli was also created to ensure that left-handed participant could perform the task in the same condition than the right-handed, without masking the targets with their arms.

2.3. Procedure and design

During the briefing, participants (children and adults) were informed about the general aim and procedure of the experiment. During this general briefing of the experimental session, a quick laterality test was performed for each participant. We used this test to familiarize the children with the first person point of view for motor imagery. Indeed, we asked for instance to participants, which hand they would use to throw a snowball, or which feet they would use to kick a ball. To ensure that the response would be genuine and correspond to a first person point of view, we told to the children to close their eyes, to imagine themselves in the courtyard, seeing the snowball, and then to imagine themselves to throw it. For almost all children that imagery was accompanied with an actual movement of the adequate arm or foot. Furthermore, the experimenter also checked that the children were familiar with the computer and mouse devices. The order of the reachability and motor imagery task were counter balanced.

In the reachability task, the target were randomly displayed on the computer screen, and for each target participant had to estimate if they thought to be able to touch the target with the tip or their right index, remaining sat on the chair and without bending the torso (reachable) or if they were presented to far to do so (non reachable). Each target was presented 4 times in a random order for a total of 132 trials. The whole task lasted for about 5 to 10 min. Participants remained seated during the whole session, with their hand on their thighs and with the mouse used to respond in the right hand, and were off course not allowed to attempt to reach the target with their arms, providing thus reachability estimates without feedback of their actual capacities.

The motor imagery task was divided into 2 condition, the actual movement condition and the imagined movement condition. The actual movement condition was always performed first, in order to familiarize the participants to the procedure. In the actual movement condition, in each trial, participants were presented with the A5 sheet of paper containing the starting position and 3 targets. At the beginning of the trial, they had to place the pencil, held in their preferred hand, on the starting location. Then, a go signal was provided by the experimenter and the participants had to perform fast but accurate back-and-forth pointing movements from the starting position towards each of the three targets, leaving a trace on the sheet with the pencil. Movements were always performed following the same sequence, starting with a movement towards the upper target and ending with a movement towards the lower one. The instruction focused on both speed and accuracy of the movements. Participants provided verbally a stop signal each time their hand was back on the starting location. In the motor imagery condition, participant prepared themselves the exact same way than in the actual motor condition, participants placed the pencil on the starting location. They then had to imagine making fast and accurate back-and-forth pointing movements from the starting position towards each of the three targets. They were told to generate a first person

perspective of the motor image focusing on both the visual and kinaesthetic aspects of motor imagery. Participants were instructed to keep their eyes open during the whole imagery task, which was triggered by the experimenter (go signal), and to verbally provide a stop signal each time they were back on the starting position. In both condition, each combination of target distance and width was presented 6 times, for a total of 54 targets in each condition.

2.4. Data recording and analysis

In the reachability judgment task, participant's responses (yes-no) provided through the computer mouse were recorded using the E-prime2 software (Psychology software tools). The boundary of peripersonal space was determined using a maximum likelihood fit procedure to obtain the logit regression model that best fitted the distribution of each participant's response probability for the 33 positions of the target, using the following equation:

$$y = e^{(\alpha+\beta X)} / (1 + e^{(\alpha+\beta X)})$$

where y is the subject's response, x is the distance, $(-\alpha / \beta)$ is the critical value of x at which probabilities for both responses are equal to 0.5, thus expressing the perceived maximum reachable distance, and $(\beta/4)$ is a measure of the slope at the critical point. A greater slope indicated an easier discrimination of reachable and non-reachable stimuli. Before performing statistical analysis, threshold $(-\alpha / \beta)$ and discrimination $(\beta/4)$ values were pooled for each targets layout condition and each group of age. Because we are dealing here with developmental effects, maximum reachable distance was expressed in percentage of participant arm's length. Data were analysed using an age group (8, 9, 10, 11, 12 and Adult) * target layout (symmetrical vs asymmetrical) analysis of variance (ANOVA), with independent measures on both factors.

In the motor imagery task, go and stop time markers were recorded by the experimenter by pressing a keyboard key and were processed using custom matlab routines in a standard

PC computer (matlab R2008b, Mathworks), which provided movement time (MT) for all the targets. In both tasks, movement times corresponded to the interval between the go signal given by the experimenter and the stop signal provided by the participant when the hand was back to the starting location. Before the experimental session started, participants were given a few practice trials, and the experimenter was previously trained to this procedure. The 6 MTs obtained for each target size-distance combination (Index of difficulty) were pooled for data analysis. We analysed then the variation of MT through an age group (8, 9, 10, 11, 12, Adults) * motor task (actual, imagined) * ID (1.32, 1.81, 2.00, 2.32, 2.58, 2.81, 3.17, 3.46, 4.09) analysis of variance (ANOVA), with within-subjects measures for the last two factors. Post-hoc comparisons were performed using post-hoc Scheffe test. On the basis of the MTs obtained for each index of difficulty, we also computed for each participant the correlation coefficients between actual and imagined movement times (Corr A-I). These correlation coefficients were transformed into z-scores using, Fisher r-to-z transformation -Fischer-z-score = $0.5 * (\ln(1+r)-\ln(1-r))$ -, and then compared through a one-way ANOVA with age-group (8, 9, 10, 11, adults) as between-subject factor. In order to further investigate any potential effect of Age group on the Corr A-I, we also compute for each participant the correlation coefficients between Actual MT and ID (Corr A-ID) and the Imagined MT and ID (Corr I-ID). These correlation coefficients were also transformed into z-scores, and compared through a one-way ANOVA.

Before running statistical analysis, data were filtered and participants whose performance was beyond ± 1.5 standard deviations from the mean score of the group were considered as outliers and removed from the data analysis (12 out of 160 participants in the reachability judgment task and 14 out of 160 participants in the motor imagery task). Furthermore, data from 8 participants in the reachability judgment task and 21 participants in the motor imagery

task were also discarded due to self-initiated interruption of the experiment or signs of functional motor difficulties.

3. Results

3.1. Reachability judgment task

Perceived boundary of peripersonal space

Statistical analysis (ANOVA) of reachability estimates revealed a significant effect of age-group on the perceived boundary of peripersonal space ($F(5, 125) = 7.47, p < .01, \eta_p^2 = .23$). Results showed an overestimation of $M = 21.13\%$ of arm's length ($SD = 10.52\%$) for the 8-years group ; $M = 17.54\%$ ($SD = 11.65\%$) for the 9-years group; $M = 12.84\%$ ($SD = 6.96\%$) for the 10-years group; $M = 13.74\%$ ($SD = 7.74\%$) for the 11-years group ; $M = 13.70\%$ ($SD = 7.92\%$) for the 12-years group and $M = 3.78\%$ ($SD = 2.94\%$) for the adult group. Planned comparison revealed that the overestimation bias was broader for the younger children of 8-and-9-years ($M = 19.28\%$, $SD = 11.18\%$) than for the older children ($M = 13.36\%$, $SD = 7.36\%$, $F(1, 125) = 14.02, p < .01, \eta_p^2 = .10$, see Figure 2).

We also found a significant effect of the target-layout: a greater overestimation of peripersonal space was observed when presenting an asymmetrical ($M = 18.7, SD = 9.26\%$) rather than a symmetrical layout ($M = 14\%$, $SD = 9.9\%$, $F(1, 125) = 4.55, p = .03, \eta_p^2 = .035$). Although no significant interaction was observed between age-group and target-layout ($F(5, 125) = 1.34, p = .25$), planned comparison revealed an almost significant difference ($F(5, 125) = 3.67, p = .057$) meaning a greater overestimation of peripersonal space in the younger (8-9 years groups) than the older children (10-11-12 years groups) when facing an asymmetrical layout than a symmetrical one (the difference being on average 7.61% for the 8-and 9-years groups, and on average 0.98% for the 10-11 and 12-years group).

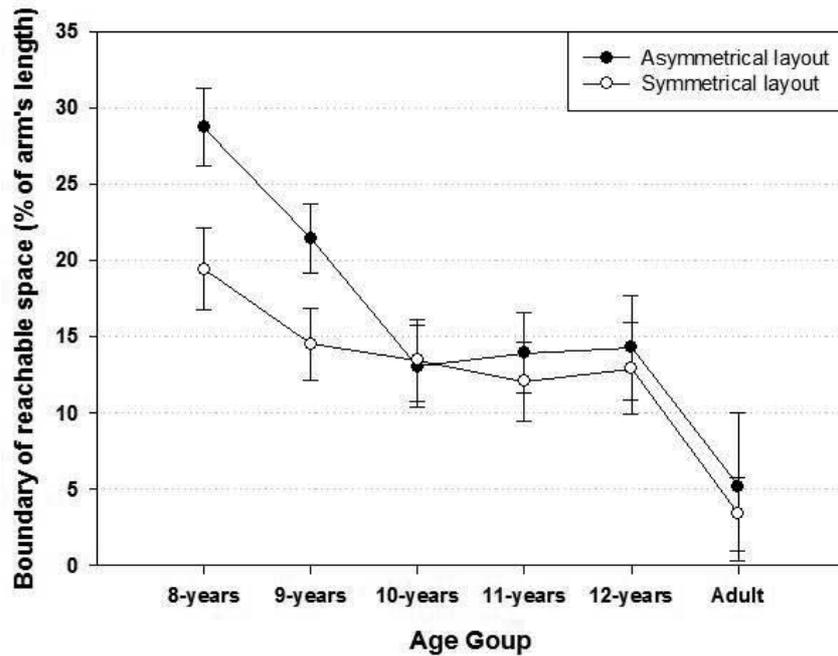


Figure 2: Estimate boundary of reachable space according Age group and Target layout (vertical bars represents standard errors).

Variability of reachability estimates

Statistical analysis (ANOVA) on slopes of logit regression at the critical value (boundary of peripersonal space) revealed that the variability of reachability estimates was influenced by participants' age ($F(5, 135) = 8.65, p < .01, \eta_p^2 = .24$). However, no significant differences were found between the children of all age ($F(5, 120) = 0.27, p = 0.89$). Post-hoc Scheffé test indicated that the slope of logit regression at the critical value was significantly steeper for adults participants ($M = 0.90, SD = 1.05$) than for children in all groups of age ($M = 0.18, SD = 0.21$; all $p < .01$), suggesting a sharper dissociation between what was perceived as reachable and unreachable in adults than in children. The statistical analysis did also not show any effect of target layout on the slopes of logit regression ($F(1, 135) = .53, p = .46$) and there was no interaction between the two factors ($F(5, 135) = .92, p = .46$).

3.2. Motor Imagery Task

Movement Time Analysis

Concerning MT, statistical analysis (ANOVA) revealed a significant effect of age-group ($F(5, 128) = 2.53, p = .03, \eta_p^2 = .09$) and a significant effect of ID ($F(8, 1024) = 182.93, p < .01, \eta_p^2 = .59$, see Figure 3a), but no effect of the executed vs imagined condition ($F(1, 128) = .98, p = .32$) and no interaction between age-group and condition ($F(5, 128) = 1.16, p = .33$). There was also a significant interaction between ID and condition ($F(8, 1024) = 32.63, p < .01, \eta_p^2 = .20$), as well as between these last two factors and age-group ($F(40, 1024) = 1.51, p < .01, \eta_p^2 = .05$). The three-factor interaction resulted from how ID differently affected MT in the different groups of age, between the 2 conditions.

In the Actual movement condition, there was a significant effect of age-group on MT ($F(5, 129) = 3.88, p < .01, \eta_p^2 = .13$). Post-hoc tests showed that performance did not vary between children ($M = 729$ ms, $SD = 214$ ms; all post-hoc Scheffe test $> .05$), but children in the 8-years group (mean: 800 ms, $SD: 219$ ms) had significant longer MT than adults ($M = 570$ ms, $SD = 1212$ ms, post-hoc Scheffe test $p < .01$). The ANOVA also revealed a significant effect of ID ($F(8, 1032) = 187.71, p < .01, \eta_p^2 = .59$) and a significant interaction between age-group and ID ($F(40, 1032) = 1.41, p < .01, \eta_p^2 = .05$, see Figure 3b). This interaction was mainly due to the effect of age on MT was broader for higher than for lower ID, adults being less affected by the increase of ID than children (see Figure 3a).

In the Imagined movement condition, there was no significant effect of age-group on MT ($F(5, 128) = 1.36, p = .24$), indicating that there was no overall difference between adults ($M = 585$ ms, $SD = 170$ ms) and children performances ($M = 704$ ms, $SD = 263$ ms) nor that there was any significant difference between children (post-hoc Scheffe test all $p < .01$). The ANOVA revealed however a significant effect of ID ($F(8, 1024) = 42.57, p < .01, \eta_p^2 = .25$)

and a significant interaction between age-group and ID ($F(40, 1024) = 1.71, p < .01, \eta_p^2 = .06$, see Figure 3b).

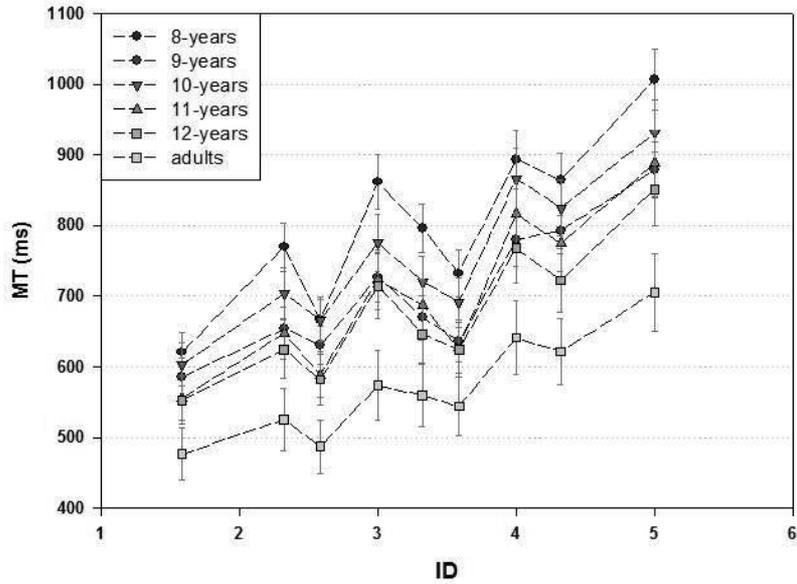


Figure 3a: Movement Time (ms) according to Index of Difficulty in Actual condition

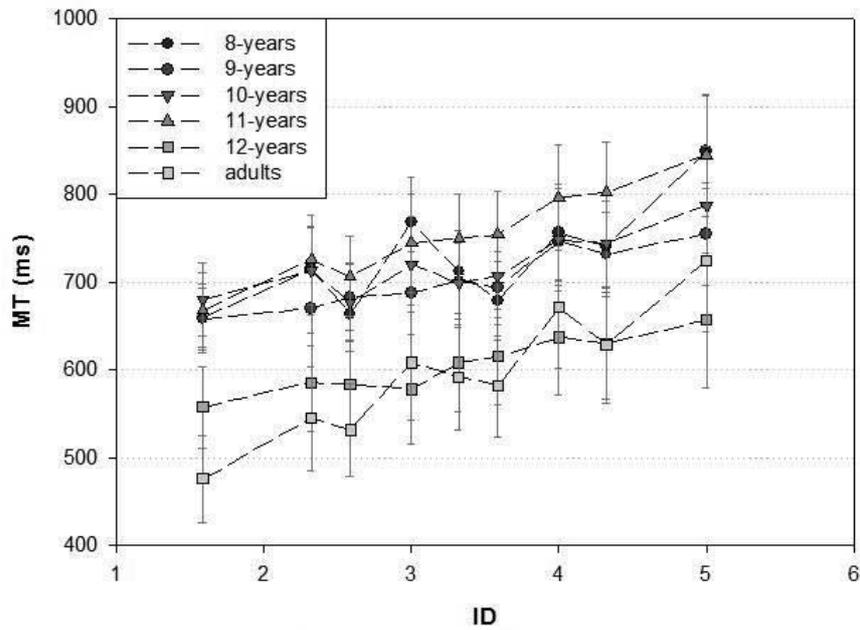


Figure 3b: Movement Time (ms) according to Index of Difficulty in Imagined condition

Correlation analysis

The ANOVA performed on the r-to-z transformations of Corr A-I revealed a significant effect of $\hat{\text{Age}}$ group ($F(5, 107) = 4.38$, $p < .01$, $\eta_p^2 = .17$). The ANOVA performed on the r-to-z transformations of Corr A-ID revealed no significant effect of $\hat{\text{Age}}$ group ($F(5, 129) = 1.240$, $p = .29$). However, the ANOVA performed in the r-to-z transformation of Corr I-ID did reveal a significant effect of Age group ($F(5, 129) = 2.95$, $p < .01$, $\eta_p^2 = .14$).

In order to test the relationship between the perception of peripersonal space and motor imagery, we computed the correlation between the perceived threshold and the z-score transformations of the motor imagery tasks. Overall We only observe a very low level of correlation between the performance of both tasks, and neither significant difference across age-group in the correlation coefficients between the reachability threshold and Corr A-I, Corr E-ID nor Corr A-ID.

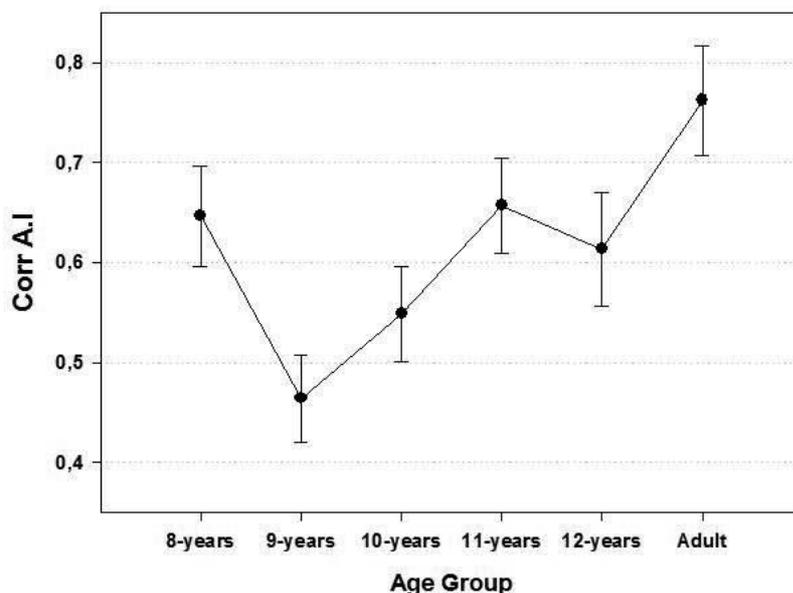


Figure 4: Correlation coefficient between Movement Time in Executed vs Imagined condition along age group (vertical bars represents standard errors).

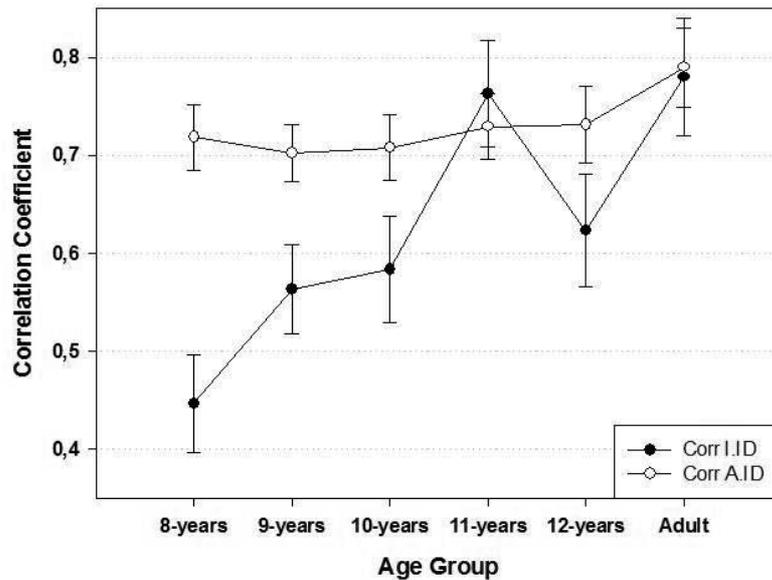


Figure 5: Correlation coefficient between Movement Time in both condition and Index of Difficulty along age group (vertical bars represents standard errors).

Statistical conclusion

The statistical analysis confirmed the hypothesis of changes across ages in the performance of both reachability and motor imagery task in children. This changes also occurred during the same period of age in both tasks. Planned comparisons revealed that the youngest participants overestimated the limit of their peripersonal space and were more affected by the distribution of the targets position than the older ones and adults. However we found no correlation between the performances of the 2 tasks that could directly support a motor simulation development hypothesis.

4. Discussion

The aim of the present study was to test the hypothesis of developmental changes of peripersonal space perception and motor imagery. In this regard, the data does show a effect of age group on the reachability judgements. We observed that children of 8- to 12-years of age overestimated the limit of their peripersonal space to a greater extent than adults,

respectively 14.8% in average for children and 4% for adults. Previous studies also noted that overestimation of reachable space greater in children than in adults (Rocha, 1995 ; Robinovitch, 1998 ; Gabbard, Cordova & Ammar, 2007 ; Gabbard, Cacola & Cordova, 2009 ; Gabbard, Cordova, & Lee, 2009). As a follow-up of these studies, the present data revealed that reachability judgements vary non linearly between 8- and 12-years of age. Indeed, a discontinuity in the performances of children across age-group was found, as the greater changes were observed between 8- and 10-years. A planned comparison confirmed our hypothesis, showing that 8- and 9-years old children overestimated the limit of their peripersonal space more than older children. The youngest children were also more affected by the distribution of the target set relatively to the actual reachability threshold.

The overestimation bias has been attributed in the past to a biased representation of postural context or task constraints (the postural stability hypothesis, Robinovitch 1998; Gabbard, Cordova, & Lee, 2009), to the preconceive potential actions based on multiple degrees of freedom whereas the experimental situation implies a restricted postural context (the whole body engagement theory, Carello, Groszfeld, Reicher, Solomon & Turvey, 1989 ; Mark, Ncmeth, Garciner, Dainoff, Paassche & Duffy 1997 ; Rochat & Wraga, 1997 ; Fischer, 2000; Gabbard, Cordova & Ammar, 2007), or to a high state of confidence about current motor possibilities (the cognitive state hypothesis, Gabbard & Ammar, 2005 ; Gabbard Ammar & Rorigues, 2005a, 2005b ; see also Delevoye-Turrell, Bartolo & Coello, 2010 for a thorough discussion). The present data suggest that the representation of peripersonal space, and the integration of all the information improved quantitatively and qualitatively during childhood. It is well established that the period of 8- to 10-years is characterised by a substantial maturation of cortical and sub-cortical neural network with improvement in sensory and motor processing as well as in attentiveness (Lakowski & Aspinall, 1969 ; Tschopp, & al., 1999). However, one could consider this phenomenon to be more correlated

with the perceptuo-motor development in general and may not be a core explanation for the observed change in children performance in the reachability judgment task. Rather, age-dependent effects found in the present study may reflect a change in how children combine sensory and motor-related information to take into account additional task-dependent constraints as they grow up. As a result of this change, older children showed a pattern of results closer to what is usually found in adults who can manipulate precise and flexible representations for perceptual judgement (Coello & Delevoye-Turrell, 2007 ; Delevoye-Turrell, Bartolo & Coello, 2010).

The concomitant variations in the motor imagery task concerning the 8- to 10-years children may then correspond to new possibilities for children to integrate different sources of information. Considering children alone MT were not overall affected by the age of the children neither in the Imagery movement condition ($M = 712$ ms) nor that in the actual movement task ($M = 692$ ms). However, when analysing the correlation between actual and imagined movement time, we found a U-shaped curve showing that the correlation decrease broadly around the age of 9-years before improving again, suggesting thus a qualitative change in the way children perform motor imagery task and integrate multimodal information at this age. Despite the reduction of MT across ages in the motor imagery task, the absence of effect of age on the correlation between MT and the index of difficulty in the Actual movement condition shows that there is no clear change in the way children integrate task constraints to plan and execute actual motor responses. Thus, a general improvement on the motor control system across ages cannot explain *per se* the observed developmental changes. Congruently, the significant effect of age group on the correlation between MT and the index of difficulty in the Imagined movement condition suggests an age-dependent qualitative change in motor imagery process. This qualitative change is to be thought in relation to the variation of performances in the reachability judgment task: as children learn, to deal with

more precise and flexible motor representation, and to integrate multimodal information for perceptual-motor purposes, they are also able to make more accurate and precise judgement about the limit of their peripersonal space. This interpretation is in agreement with the findings by Gori et al. (2008) on multimodal information processing, who reported that optimal integration of visual and haptic information in objects perception is possible only beyond the age 8-years. During the same period, between 8- to 10- years of age, similar discontinuities are observed in, unimodal integration (Nardini & al, 2010), in motor control (Moelenbroek & Van Galen, 1989 ; Bard & al 1990). It is also not until 10-years that children are able to anticipate the consequence of forthcoming action and become sensitive to the end-state of body segments during movement planning ("*end-state comfort effect*", Thibault & Toussaint, 2009). These new capacities can be interpreted as improved possibilities in combining sensory and motor information for perception and decision-taking. Before this age, children would be more dependent on direct sensory information in perceptual processing, and thus more prone to context-based bias. In support of this, we found a tendency of younger children to be more affected by the variation of the position of the screen during the experiment. Indeed, overestimation of reachable space increased in the symmetrical compared to the non-symmetrical target, but only in the 8- and 9-years old children.

The period of age between 8- and 10-years seems then to correspond to a critical period of general reorganisation of the visuo-motor system. According to the dynamical skills theory, such discontinuities are indicators of the transition to a level of development to another. These cycles of developmental change refers to the integration into a single set of representations, of various element previously independent. In this theoretical context, the absence of within-subject correlation between performances in the 2 tasks may suggest that we observed in the 2 tasks 2 different sets of high-level dynamical skills that are not directly correlated, but may share common lower-level precursors. We emphasized earlier on the

importance of development of uni- and multimodal integration, that could represent one of this common element involved in the 2 tasks (Gori & al, 2006 ; Nardini & al, 2010). If the present data do not directly support a motor simulation hypothesis for the reachability judgements, we think that the co-occurrent variations in the 2 tasks could be explained by the improvement of integration processes for the construction and use of sensori-motor representations. The reorganisation that is described by the model at 8- to 10-years, is concerned more specifically by the acquisition of a certain degree of abstraction in the mental representations of children (Immordino-Yang & Fischer, 2007). Similar conclusions were proposed by Zabalia in the context of a mental rotation task (Zabalia, 2002). Zabalia observed that the actual realisation of an action facilitate the performance of mental rotation of children, but only until they reach 10-years. This interpretation, in terms of the development of abstraction in the mental representations, and thus a diminishing influence of the actual perceptual and motor context, is congruent with our own observations. During this period, and continuing through late adolescence, the structural and functional maturation of the nervous system also improve, mostly by myelinisation and axonal pruning mechanisms, and the same developmental cycles and discontinuities are observed in the neural development (for a review see Immordino-Yang & Fischer 2007 and Lenroot & Giedd, 2007). The neural maturation could also have a positive effect on the construction and use of sensorimotor representations for reachability judgement and motor imagery.

Aknowledgements

The authos want to thanks the children that participated in that study, their parents, and the personal of the French public schools Pierre Mendès France and Léo Lagrange.

References

- Adalbjornsson, C. F., Fischman, M. G., & Rudisill, M. E. (2008). The end state comfort effect in young children. *Research Quarterly for exercise and sport*, 79 (1), 36-41.
- Assaiante C., & Amblard B. (1995). An ontogenetic model for the sensorimotor organization of balance control in humans. *Human Movement Science*, 14, 13-43.
- Bard, C., Hay, L., & Fleury, M. (1990). Timing accuracy of visually directed movement in children: control of direction and amplitude components. *Journal of Experimental Child Psychology*, 50, 102-118.
- Bays, P. M., Wolpert, D. M., & Flanagan, J. R. (2005). Perception of the consequences of self-action is temporally tuned and event driven. *Current Biology*, 15, 1125-1128.
- Blakemore, S. J., Wolpert, D. M., & Frith, C. D. (2000). Why can't you tickle yourself? *Neuroreport*, 11(113), 959-965.
- Carello, C., Groszofsky, A., Reicher, F. D., Solomon, H. Y., Turvey, M. T. (1989). Visually perceiving what is reachable. *Ecological Psychology*. 4(1). 1-16.
- Coello, Y., & Delevoye-Turrell, Y. (2007). Embodiment, space categorisation and action. *Consciousness and Cognition*, 16, 667-683.
- Choudhury, S., Charman, T., Bird, V., & Blakemore, S. J. (2007a). Adolescent development of motor imagery in a visually guided pointing task. *Consciousness and Cognition*, 16(4), 886-896.
- Choudhury, S., Charman, T., Bird, V., & Blakemore, S. J. (2007b). Development of action representation during adolescence. *Neuropsychologia*, 45, 255-262.
- Coello, Y. & Bidet-Ildei, C. (2012). Motor representation and language in space, object, and movement perception. In Coello, Y. & Bartolo, A. (Eds.), *Language and action in cognitive neuroscience*. London : Psychology Press.
- Coello, Y., & Delevoye-Turrell, Y. (2007). Embodiment, space categorisation and action. *Consciousness and Cognition*, 16, 667-683.
- Clifton, R. K., Rochat, P., Robin, D. J., & Berthier, N. E. (1994). Multimodal perception in the control of infant reaching. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20(4), 876-886.
- Culham, J. C., Gallivan, J., Cavina-Pratesi, C., & Quinlan, D. J. (2008). fMRI investigations of reaching and ego space in human superior parieto-occipital cortex. In R. L. Klatzky, M. Behrmann, & B. MacWhinney (Eds.), *Embodiment, Ego-space and Action* (pp. 247-274). Mahwah: Erlbaum.
- Decety, J. (1996). The neurological basis of motor imagery. *Behavioral Brain Research*, 77, 45-52.
- Decety, J., & Grezes, J. (2006). The power of simulation: Imagining one's own and other's behavior. *Brain Research*, 1079, 4-14.
- Delevoye-Turrell, Y., Bartolo, A., Coello, Y. (2010). Motor representation and the perception of space. In N. Gangopadhyay (Ed.) *Perception, Action and Consciousness* (pp. 217-242). Oxford University Press.
- Ersnt, M. O., & Banks, M. S. (2002). Human integrate visual and haptic information in a statistical optimal fashion. *Nature*, 415, 429-434.
- Farnè, A., & Làdavas, E. (2000). Dynamic size-change of hand peripersonal space following tool use. *Cognitive neuroscience*, 11(8), 1-5.
- Field, J. (1976). Relation of young infant's reaching behavior to stimulus distance and solidity. *Developmental psychology*, 5, 444-448.

- Fine, I., Wade, A. R., Brewer, A. A., May, M., Goodmann, D. F., Boynton, G. M., Wandell, B. A., & MacLeod, D. I. A. (2003). Long-term deprivation affects visual perception and cortex. *Nature Neuroscience*, 6, 915-916.
- Frick, A., Daum, M. M., Wilson, M., & Wilkening, F. (2009) Effects of action on children's and adults' mental imagery. *Journal of experimental child psychology*, 104, 34-51.
- Fischer, M. H. (2000). Estimating reachability: whole body engagement or postural stability. *Human movement Science*, 19, 297-318.
- Fischer, K. W. & Bidell, T. R. (1998). Dynamic development of psychological structures in action and thought. In W. Damon & R. M. Lerner (Eds), *Handbook of child psychology: theoretical models of human development* (5th ed., vol.1 pp. 467-561). New York: Wiley.
- Fischer, K. W. & Rose, S. P. (1994). Dynamic development of coordination of components in brains and behavior: a framework theory and research. In G. Dawson & K. W. Fischer (Eds), *human behavior and the developing brain* (pp. 3-66). New York: The Guilford Press.
- Gabbard, C., & Ammar, D. (2005). Visual cues and perceived reachability. *Brain and cognition*, 59, 287-291.
- Gabbard, C., Ammar, D., & Rodrigues, L. (2005a). Hands effects on mentally simulated reaching. *Human Movement Sciences*, 24, 484-495.
- Gabbard, C., Ammar, D., & Rodrigues, L. (2005b). Perceived reachability in hemispace. *Brain and Cognition*, 58, 172-177.
- Gabbard, C., Cacola, P., and Cordova, A. (2009). Is perceived motor competence a constraint in children's action planning (estimating reach)? *Journal of Genetic Psychology*, 170(2), 151-158.
- Gabbard, C., Cordova, A., & Ammar, D. (2007). Estimation of reach in peripersonal and extrapersonal space: a developmental view. *Developmental neuropsychology*, 32(3), 1-8.
- Gabbard, C., Cordova, A., and Lee, S. (2009). Do children perceive postural constraints when estimating reach (motor planning)? *Journal of Motor Behavior*, 41(2), 100-105.
- Gallese, V. (2005). Embodied simulation: from neurons to phenomenal experience. *Phenomenology and the Cognitive Science*, 4, 23-48.
- Gallese, V. (2007). Before and below 'theory of mind': embodied simulation and the neural correlates of social cognition. *Philosophical transactions of the royal society of biological sciences*, 362, 659-669.
- Gallese V, Lakoff G (2005) The brain's concepts: the role of the sensory-motor system in conceptual knowledge. *Cognitive Neuropsychology*, 22, 455-479.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach in visual perception*. Boston: Houghton Mifflin.
- Gori, M., Del Viva, M., Sandini, G., & Burr, D. C. (2008). Young children do not integrate visual and haptic form information. *Current Biology*, 18, 694-698.
- Graziano, M.S. (1999). Where is my arm? The relative role of vision and proprioception in the neuronal representation of limb position. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 96, 10418-10421.
- Grush, Rick (2004). The emulation theory of representation: motor control, imagery, and perception. *Behavioral and Brain Sciences*, 27, 377-442.
- Held, R., & Hein, A. (1963). Movement-produced stimulation in the development of visually guided behavior. *journal of comparative and physiological psychology*, 56(5), 872-876.

- Hermer, L., & Spelke, E. (1996). Modularity and development: the case of spatial reorientation. *Cognition*, 61, 195-232.
- Holmes, N. P., & Spence, C. (2004). The body schema and the multisensory representation(s) of peripersonal space. *Cognitive Processing*, 5, 94-105.
- Immordino-Yang, M. H., & Fischer, K. W. (2007). Dynamic development of hemispheric biases. . Coch, Fischer, K. W., & Dawson, G. (Eds.), *Human behavior, learning and the developing brain-typical development* (pp. 3-29). New York: The Guilford Press.
- Jeannerod, M. (2001). Neural simulation of action: A unifying mechanism for motor cognition. *NeuroImage*, 14, 1103-1109.
- Jeannerod M (2006) *Motor cognition: what actions tell to the self*. Oxford: Oxford University Press.
- Jeannerod, M., & Frak, V. (1999). Mental imaging of motor activity in humans. *Current Opinion in Neurobiology*, 9, 735-739.
- Jansen-Osman, P., Richter, S., Konczak, J., & Kalveram, K. T. (2002). Force adaptation transfers to untrained workspace regions in children: evidence for developing inverse dynamic motor models. *Experimental Brain research*, 142, 212-220.
- Karmiloff-Smith, A. (1992). *Beyond Modularity*. Boston (MA): M.I.T Press.
- Lakowski, R., & Aspinall, P. A. (1969). Static perimetry in young children. *Vision Research*, 9(2), 305-312.
- Lenroot, R., K., Giedd, J. N. (2007). the structure development of the human brain as measures longitudinally with magnetic resonance imaging. In D. Coch, K. F. Fischer, & G. Dawson (Eds.), *Human behavior, learning and the developping brain: typical development* (pp. 50-73). New York: Guilford.
- Makin, T.R., Holmes, N.P., & Zohary, E. (2007). Is that near my hand? Multisensory representation of peripersonal space in human intraparietal sulcus. *Journal of Neuroscience*, 27,731-740.
- Mark, L. S., Ncmeth, K., Garciner, D., Dainoff, M. J., Paasche, J., & Duffy, M. (1997). Postural dynamics and the preferred critical boundary for visually guided reaching. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23, 1365-1379.
- Maruff, P., Wilson, P., Trebilcock, M., & Currie, J. (1999). Abnormalities of imagined motor sequences in children with developmental coordination disorder. *Neuropsychologia*, 37, 1317-1324.
- Molina, M., Tijus, C., & Jouen, F. (2008). The emergence of motor imagery in children. *Journal of experimental child psychology*, 99, 196-209.
- Merleau-Ponty , M. (1945). *Phénoménologie de la perception*. Paris : Gallimard.
- Meulenbroek, R. G., & Van Gallen, G. P. (1988). The acquisition of skill handwriting: Discontinuous trends in kinematics variables. In A. M. Colley & J. R. Beechs (Eds.), *Cognition and Action in Skill Behavior* (pp273-281). Amsterdam: North Holland.
- Miall, R. C., & Wolpert, D. M. (1996). Forward model for physiological motor control. *Neural Networks*, 9(6), 1265-1279.
- Nardini, M., Bedford, R., Mareschal, D.(2010). Fusion of visual cues is not mandatory in children. *Proceeding of the national. academy of science. U. S. A*, 107(39), 17041-17046.
- Noe, A. (2004). *Action in perception*. Cambridge: The MIT press.

- Noppeney, U. (2008). The neural systems of tool and action semantics: A perspective from functional imaging. *Journal of physiology*, 102, 40-49.
- Piaget, J. & Inhelder, B. (1966). *La psychologie de l'enfant*. Paris: Presse Universitaire de France.
- Previc, F. H. (1998). The neuropsychology of 3-D space. *Psychological bulletin*, 124(2), 123-164.
- Robinovitch, S. N. (1998) Perception of postural limits during reaching. *Journal of motor behavior*, 30(4), 352-358.
- Rochat, P., & Goubet, N. (1995). Development of sitting and reaching in 5- to 6- month-old infants. *Infant behavior and development*, 18, 53-68.
- Rochat, P., Wraga, M. (1997). An account of the systematic error in judging what is reachable. *Journal of experimental psychology*, 23(1), 192-212.
- Rose, L. T., & Fischer, K. W. (2008). Dynamic systems theory. In R. A. Shweder (Ed.), *Chicago companion to the child*. Chicago: University of Chicago Press.
- Schwoebel, J., Boronat, C. B., & Coslett, H. B. (2002). The man who executed “imagined” movements: Evidence for dissociable components of the body schema. *Brain and Cognition*, 50, 1-16.
- Shergill, S. S., Bays, P. M., Frith, C. D., & Wolpert, D. M. (2003). Two eyes for an eye: the neuroscience of force escalation. *Science*, 301, 187.
- Sirigu, A., Duhamel, J., Cohen, L., Pillon, B., Dubois, B., & Agid, Y. (1996). The mental representation of hand movements after parietal cortex damage. *Science*, 273, 1564-1567.
- ter Horst, A.C., van Lier, R., & Steenbergen, B. (2011). Spatial dependency of action simulation. *Experimental Brain Research*, 212, 635-644.
- Thibault, J. P., & Toussaint, L. (2009). Developing motor planning over ages. *Journal of Experimental Child Psychology*, 105, 116-129.
- Trevarthen, C. (1968). Two visual mechanisms of vision in primates. *Psychologische forschung*, 31, 299-337.
- Tschopp, C., Viviani, P., Reicherts, M., Bullinger, A., Rudaz, Mermoud, C., & Safran, A. B. (1999). Does visual sensitivity improve between 5 and 8 years? A study of automated visual field examination. *Vision Research*, 39, 1107-1119.
- Voss, M., Bays, P. M., Rothwell, J. C., & Wolpert, D. M. (2007). An improvement in perception of self-generated tactile stimuli following theta-burst stimulation of primary motor cortex. *Neuropsychologia*, 45, 2712-2717.
- Williams, J., Thomas, P. R., Maruff, P., & Wilson, P. H. (2008). The link between motor impairment level and motor imagery ability in children with developmental coordination disorder. *Human Movement Science*, 27, 270-285.
- Wilson, M. (2003). Imagined movements that leak out. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 53-55.
- Wilson, P. H., Maruff, P., Ives, S., & Currie, J. (2001). Abnormalities of motor and praxis imagery in children with DCD. *Human Movement Sciences*, 20, 135-159.
- Wolpert, D. M. (1997). Computational approaches to motor control. *Trends in cognitive sciences*, 1(6), 209-216.
- Wolpert, D.M., Flanagan, J. R. (2001). Motor prediction. *Current Biology*, 11(18), 729-734.

- Wolpert, D. M., Gharamani, Z., & Flanagan, J. R. (2001). Perspectives and problems in motor learning. *Trends in cognitive sciences*, 5(11), 487-495.
- Yonas, A. and Hartman, B. (1993). Perceiving the affordance of contact in 4- and 5-month-old infants. *Child Development*, 64, 298 – 308.
- Zabalía M. (2002). Action et imagerie mentale chez l'enfant. *L'Année Psychologique*, 102, 409-422.

IV. 4. Étude 3 et 4 : Exploration de la compatibilité stimulus-réponse: effet d'une localisation spatiale non pertinente.

IV. 4. 1. Étude 3 : Effet de Compatibilité Stimulus Réponse de la distance sur la sélection et l'exécution des réponses

Présentation de l'étude

La première expérience de cette troisième étude est issue du développement d'un pre-test, chez des sujets adultes d'une tâche d'amorçage visuomoteur, transférable ensuite à une population d'enfants. Cette tâche avait pour objectif de pouvoir mesurer les effets de Compatibilité Stimulus Réponse (CSR) entre la distance perçue du stimulus et l'amplitude du gestes d'atteinte de la clé de réponse (répliquant ainsi les données obtenues par Olivier, 2006). La tâche a ainsi été construite pour mettre en évidence l'avantage des situations de compatibilité, par rapport aux situations d'incompatibilité, à la fois sur la phase de sélection de la réponse et sur sa programmation/exécution. La seconde expérience a été conçue comme le prolongement de la première, avec la mesure des paramètres cinématiques des mouvements de réponse. L'ensemble de ces 2 expériences avait pour objectif l'exploration de la CSR ainsi que de la dynamique temporelle de ces effets. Le recueil des données adultes a donc permis d'identifier les marqueurs de la CSR sur la sélection et la programmation/exécution de la réponse. Ce travail a donc été utilisé pour approfondir l'interprétation des données obtenues chez l'enfant en même temps que d'apporter des données nouvelles concernant la CSR chez l'adulte.

Principaux résultats de l'étude

Les résultats de ces 2 expériences mettent en évidence un effet de la distance non-pertinentes du stimulus sur la sélection et la programmation/exécution d'une réponse motrice ultérieure. Nous avons observé un avantages pour les situations de compatibilité par rapport aux situations de incompatibilité, au niveau des données temporelles, TR et TM. Dans la seconde expérience, nous avons également mis en évidence un effet de la distance de présentation du stimulus ainsi que de la CRS sur les paramètres cinématique des mouvements de pointage utilisés comme réponse. Nous avons également observé la dynamique temporelle de ces effets. L'apport de ces données est discuté en relation avec la vaste littérature des effets de CSR et dans le cadre du modèle de recouvrement dimensionnel de Kornblum (1994).

**Distance effect on action selection and execution
in a Stimulus-Response Compatibility task.**

Richez, A., Ott, L., Coutté, A., Olivier, G., & Coello Y

Abstract

Stimulus response compatibility effect occurs when the manual response to a relevant stimulus attribute is influenced by a non-relevant spatial attribute of the stimulus. SRC usually produces an increase of time required for selecting the appropriate motor response and a decrease of response accuracy. The effect of SRC on parameters of motor execution, however, is not very well known in the compatibility about stimulus distance. Through a spatio-temporal and kinematic analysis, we tested SRC effect in 2 tasks consisting in responding to the colour of a visual stimulus located at different distances, using a proximal-distal manual response. In experiment 1, we found SRC effect on both reaction time and movement time. In experiment 2, we replicate the previous results, and observed indicators of an SRC influence on response execution in the kinematic parameter of response movements. We interpret these results in relation the existent SRC litterature and the Kornblum dimensional model.

Keywords: Stimulus-Response-Compatibility (SRC) effect, , amplitude compatibility effect, motor planning/control.

Introduction

Over the past decades, cognitive scientists, neuropsychologists, and developmental psychologists have emphasized the influence of action on both perception and cognition (James, 1892 ; Held & Hein, 1963 ; Piaget & Inhelder, 1966 ; Merleau-Ponty, 1945 ; Gibson, 1979 ; Noe, 2004). Perception and action system are tightly linked from the very firsts days of life, and one of the consequences is that priming effect could arise from one system to another. Among the many evidences of an action-dependent perceptual system, the studies of Tucker and Ellis (1998, 2001, 2004) on visuomotor priming emphasized that the perception of an object could influence the selection and the realisation of a subsequent motor response. To explain visuomotor priming effects, they suggested that the objects and events of the environment could be perceived in a motor format to be able facilitate or interfere with the motor response (Tucker & Ellis, 1998 ; Craighero, Fadiga, Rizzolatti & Umiltà, 1998). This interpretation was supported by the observation, in fMRI studies, that brain motor areas are activated during passive viewing of manipulable objects even when there is no explicit intention to interact with them (Chao & Martin 2000 ; Grezes, Tucker, Armony, Ellis & Passingham, 2003). Similarly, actions and sensorimotor judgements about their costs and consequences, are thought to be guided partially by the sensory input (Delevoye-Turrell, Bartolo & Coello, 2010 ; Jeannerod, 1997 ; Glover, 2004). The consequences of these results, is that perceptual and motor representations may necessarily share some functional and structural components to explain this kind Stimulus-Response-Compatibility (James, 1892 ; Hommel, Müsseler, Aschersleben & Prinz, 2001 ; Hommel, 2011).

In this ideomotor view modern theories, such as the Theory of Event Coding or TEC (Hommel, 2011) and the Kornblum model (Kornblum, Hasbroucq & Osman, 1990 ; Kornblum, 1994) provide a framework to analyse the wealth of data gathered on SRC. The TEC describe how the perceptual and motor representations could be integrated in a common representational system (Hommel et al., 2001 ; Hommel, 2011). This common system is thought to be amodal, or supramodal, in order to allow influence of a stimulus feature on the motor response. The Kornblum model, describe two distinct routes linking perception to action (Kornblum, Hasbroucq & Osman, 1990 ; Kornblum, 1994). In the

first route, the indirect route, a perceptual feature is arbitrary linked to a pre-specified motor response by the instructions. Along the second one, the direct route, objects and events of the environment could directly activate a motor response that share a certain degree of similarity. To describe and explain a large array of priming effect, Kornblum propose the dimensional overlap concept. The dimensional overlap is a property of mental representations and describe the degree of perceptual, structural or conceptual similarity. According to the dimensional overlap model, any property of the stimulus set could be linked to a property of the response set as long as they share this dimensional overlap (Kornblum, Hasbroucq & Osman, 1990 ; Kornblum, 1994).

The various implementation of SRC effects had proven this kind of paradigm to have a great heuristic value in the exploration of perception action links and the nature of the spatial coding of stimulus and response set (Hommel, 2011). When a stimulus code directly activate a response code by the mean of the dimensional overlap, the response automatically activated could be the right one, (a facilitation, in *congruent* trial), or an incorrect one,(an interference, in *incongruent* trial). In incongruent situations, a conflict arise between the 2 potential responses, and its resolution via the inhibition of the incorrect response (Welch & Elliott, 2004 ; Buetti & Kerzel, 2008, 2009). Faster reaction times, and fewer error are indeed generally observed in congruent situation compared to incongruent situations. Kornblum dimensional overlap model emphasize that any stimulus or response dimension could interfere or facilitate each other, and thus induce SRC effects (Kornblum, 1994). A vast array of study had demonstrate the perception of intrinsic properties of the stimulus, as its color or the orientation of a object, could facilitate a motor response (Tucker and Ellis, 1998, 2001, 2004). On the other hand, it also have been showed that extrinsic dimensions of the stimulus, commonly its spatial location, could induce SRC effects. We'll focus in this papers on the spatial aspects of SRC effects. On this regard, the founding work of Simon, on the task now know as the Simon task, established long ago that a same extrinsic spatial code could be shared by the stimulus and the response (Simon & Rudell, 1967 ; Simon & Small, 1969 ; Simon, 1990 ; Eimer, Hommel & Prinz, 1995 ; Hommel, 2011 ; Kornblum, Hasbroucq & Osman, 1990). The Simon effect is characterized by an advantage in congruent situation when both the stimulus and the response are delivered on the same

hemifield. The stimulus and the response were coded "*left*" or "*right*" depending on the hemifield where they were presented or produced. These findings suggest that moving attention to a particular object or to a particular location results in an automatic coding of the spatial features of the stimulus that interact with the spatial features of the response (Hommel & Lippa, 1995 ; Hommel, 2011; Simon 1990). In the classic Simon task, all the dimensions of the stimulus and all the aspects of the response were localised in the same or the opposite hemifield but later implementations of the paradigm tried to decorrelate the several spatial features of the stimulus and the response to disentangle the nature of their spatial coding. Several studies have for example underlined that the spatial consequences of action (e.g. the switching of a light) more than its location in space could contribute to the Simon effect (Hommel, 1993 ; Hommel, 1996 ; Kornblum & Lee, 1995). Another example, of a functional spatial coding of action is when crossing the hands to operate on right and left keys in a Simon task, the facilitation is carried by the location of the key but not of the hand (Wallace, 1971), suggesting that it is the action rather than the localisation of the motor effector that counts. In the same vein, it was found that responding with one hand at a central location to lateralised stimuli resulted also in a SRC effect when motor responses were associated with lateralised sounds (Mewaldt, Connelly, & Simon, 1980). This latter result showed then that this is not only the action that counts, but more precisely the action-related effects in the environment, in agreement with the ideomotor theory of action representation. Finally, the background or the context of stimuli presentation was also found to be a determinant factor subtending spatial SRC effect (Hommel & Lippa, 1995 ; Kerzel, Hommel, & Bekkering, 2001). Some authors have also pointed out that the orientation of attention could also create a frame of reference for spatial coding. Some studies have dissociated visual fixation point from attention orientation in a Simon task, and showed that SRC effect depends on the position where attention is directed rather than gaze direction (Nicoletti & Umiltà, 1989). Finally Lamberts, Tavernier and d'Ydewalle (1992) showed that different spatial frame of references (retinocentric, egocentric and allocentric) can each simultaneously create their SRC effects. All these results are congruent with the dimensional overlap model that do not postulate any pre-eminence of one dimension upon any others in the purpose of describing SRC effects.

Another major prediction of Kornblum model is that SRC influences only the response selection stage but would left untouched the response programming and execution (Kornblum, 1994). For Kornblum, these stages are thought to be serially linked, the response having to be selected for the response to be initiated. This has also been suggested by most of the studies that reported an increase of reaction time in incongruent conditions. In relation to this issue, Rubichi, Nicoletti, Umiltà & Zorzi (2000) and Rubichi and Pellicano (2004) tested the Simon effect in different response conditions requiring to displace the hand from a central position to one of the lateral response keys. In one condition, participants were instructed to release the starting position as soon as the stimulus was presented, and to select the correct response afterwards. In another condition, participants were instructed to select the response before movement initiation. In the first condition, the results showed a Simon effect in movement time but not in reaction time. In the second condition, the Simon effect was present only in reaction time. From these observations, the authors concluded that only response selection, and not response execution, was affected by the Simon effect. We think that, rather than proving that Simon effect only affect the response selection, Rubichi and colleagues had put out evidence for the response selection and programming/execution to overlap in time, and to be more parallel processes. More recently, Buetti & Kerzel (2008, 2009) analysed the response time and kinematic parameters of motor response in a classic Simon task. They found evidence for response conflict in reaction time expressing response selection but also on kinematics parameters of the motor response suggesting that the conflict resolution was not fully achieved after response selection and occurred during the execution phase of the motor response. Controversial data exist then concerning the presence of Simon effect during movement execution. One explanation might be related to the paradigm used. In most studies, participants used to same hand for responding laterally (Hietanen & Rämä, 1995 ; Rubichi & Pellicano, 2004 ; Buetti & Kerzel, 2008), which may represent a potential source of confounds as the same right hand was used for responding to right and left stimuli. This is particularly the case if we consider the recent finding that the left hemisphere plays an important role in the control of complex motor skills and trajectory execution, whereas the planning of voluntary action relies predominantly on the right hemisphere (Bartolo et al., 2014 ; Schaefer, Haaland & Sainburg, 2009). Furthermore, the presence of the Simon effect during movement execution could be

related to the strategy used by participants as a function of the task constraints. Indeed, task instructions focussing on fast responses as soon as the stimulus appears (Buetti & Kerzel, 2009 ; Rubichi & Pellicano, 2004) may induce action initiation before the complete selection of the direction of the movement on the basis of the relevant attribute, resulting in broader SRC effect during movement execution (Rubichi et al., 2000 ; Rubichi & Pellicano, 2004). Finally, the presence or absence of SRC effects during movement execution is also dependent on whether the task implies on-line movement guiding or rather focuses on simple and automatic stereotypical responses. To evaluate the respective contribution of off-line and on-line processing leading to SRC effect during response selection and execution, it appears then necessary to test motor responses according to spatial features of the stimulus not restricted to right-left dissociation, with no specific constraints on response time and in a task emphasizing online action control.

The vast amount of literature we previously quickly reviewed here concerned mainly the Simon effect, i.e. a very specific and quite narrow case of spatial SRC effects. Indeed, in all these studies, the spatial congruency manipulated always concerned the direction of the stimulus to perceive or of the response to made. In Simon tasks, the spatial code manipulated is indeed a *left-right* or *up-down* reference system. The orientation or direction of a movement is not the only spatial parameters to consider when acting in the environment, one as to consider the distance of the displayed stimuli and of the response keys. Distance and direction are two spatial parameters that are thought to rely on different neural mechanisms sub-serving the execution of unconstrained goal directed movements (Riehle & Requin, 1989 ; Rosenbaum, 1980). It is furthermore known that distance parameter of a motor response is less accurately computed than direction parameter through the sensorimotor system (Coello, Orliaguet & Prablanc, 1996 ; Gordon, Ghilardi & Ghez, 1994). As a consequence, directional parameter is thought to be inherent to the decisional process of motor response (Georgopoulos, Kalaska & Massey, 1981 ; Georgopoulos, 1995), while distance parameter is considered as controlled more flexibly through a combination of off-line and on-line processes (Shadmehr, Smith, Krakauer, 2010). In this respect, it is worth noting that SRC was also recently observed when focusing on the proximal-distal dimension, instead of the right-left. For instance, Olivier (2006) demonstrated that

initiation of proximal-distal grasping responses performed with the right hand as a function of the colour of a chess piece was affected by the near-far location of the chess pieces on the chessboard. Response time increased in the incongruent condition, namely when responding with a short movement to a far chess piece or the opposite, exactly as predicted by the Kornblum model for SRC. Testing the SRC with a manual response while varying the proximal-distal location of a visual stimulus seems particularly appropriate to the assessment of SRC effect in the selection and execution stages of motor response. Indeed, when one attempts to reach a piece on a chessboard, or a response key in a laboratory test, the movement could be initiated before the end point location be determined.

We tested SRC effect between the distance of presentation of a stimulus and the distance where the response had to be delivered while responding with the right hand to the colour of a visual stimulus. We expected that this paradigm produced a SRC effect with better performances in the congruent than the incongruent condition. To get more insight into these processes, we tested the SRC we analysed the response parameters as a function of reaction time.

Experiment 1

Experiment 1 aimed at testing SRC along the radial axis in task where participant responded with a proximal or distal motor action according to the colour of a pawn on a chessboard presented on a chessboard at either a proximal or distal location.

Methods

Participants

Thirty-two adults participated in the experiment. They were recruited among the students of University Lille 3. Participants were not aware of the purpose of the experiment and had normal or corrected-to-normal vision. All participants except for 2 were right handed. They gave their informed

consent prior to the experiment, which was performed in accordance with the local ethical committee guidelines and with the principles of Helsinki declaration.

Apparatus and stimuli

Participants were invited to sit in front of a table in a dimly lit room and to perform a colour discrimination task. Responses were provided by reaching one of two switches fastened on a 30-cm-square wooden panel response device positioned horizontally along the participant's mid-body sagittal axis. The 2 response switches corresponded to small cubes with 2 cm side length placed 10 cm and 25 cm away from the starting location. The switch was turned on when the cube was grasped with the thumb and the index finger. The starting location corresponded to a flat square with 2 cm side length situated 1 cm from the proximal edge of the response device and was activated when touching its surface with the index finger (see Figure 1).

Visual stimuli were displayed on a computer monitor (22" Mitsubishi, sample rate 100 Hz) placed vertically on the table approximately 57 cm away in front of the participant. Each target stimulus consisted of a colour picture (1280 x 857 px, 300 dpi) representing a 3D view of a pawn on a chessboard (30 x 30 cm). The photographs reproduced the visual perspective that a player would have when looking at an actual chessboard. Each pawn was placed on one of the squares of the 2 central columns to compensate for the different colour of the squares. The pawn could be presented either in the proximal (3rd row) or distal space (7th row). Half of the pawns presented were black and the other half were white (see Figure 1). Four other pictures were used for the training session. They represented black and white pawns located centrally relative to the other stimuli (5th row). Another photograph represented an empty chessboard and was used as a preparatory signal at the beginning of each trial.

Procedure

After being informed about the design of the experiment, participants were invited to sit in front of the apparatus and to adjust their chair and body position so that they can easily respond manually. They then performed a short training session following the same procedure as in the experimental session (except for the pictures used). Depending on the colour of the stimulus (presented always at

the same distance in the training session), the proximal response consisted in grasping the nearest switch whereas the distal response consisted in grasping the farthest one. Participants provided their responses with the right hand while the left hand remained at rest on the table during the whole experiment. Half of the participants were instructed to perform a proximal action in response to the white stimulus and a distal response to the black stimulus. The other half received the opposite instructions. At the beginning of each trial, a preparation signal was displayed on the screen to indicate the participant to place the responding hand on the starting location. Immediately following the detection of the contact of the index finger with the switch at the starting location, the picture of an empty chessboard was displayed on the screen for 500 ms, immediately followed by a chessboard with a fixation cross for a random period of 500-1500 ms. The fixation cross was positioned on the chessboard at a location corresponding to the position of the starting location on the response device (1 cm from the near edge of the chessboard, along the mid-body sagittal axis). The chessboard with the fixation cross then disappeared and the chessboard with the stimulus was displayed on the screen until participants provided their response. An error signal was also displayed when participants anticipated their response (lift their finger before the apparition of the stimulus) or produced a wrong answer.

The actual experiment started following the training session, i.e. when the participants was able to respond accurately using smooth motor responses without constant visual guidance. The experimental session was performed in one block, with five repetitions for the black and white stimuli located at the proximal or distal location, for a total of 40 trials presented in a random order. During the experimental session, for every participants, all trials with error, anticipation were automatically excluded and repeated at the end of the blocks as well as trials for which the reaction times were outside of the 2 standard deviation criterion. That precaution was set to ensure that the experiment won't stop before reaching a total of 40 correct response.

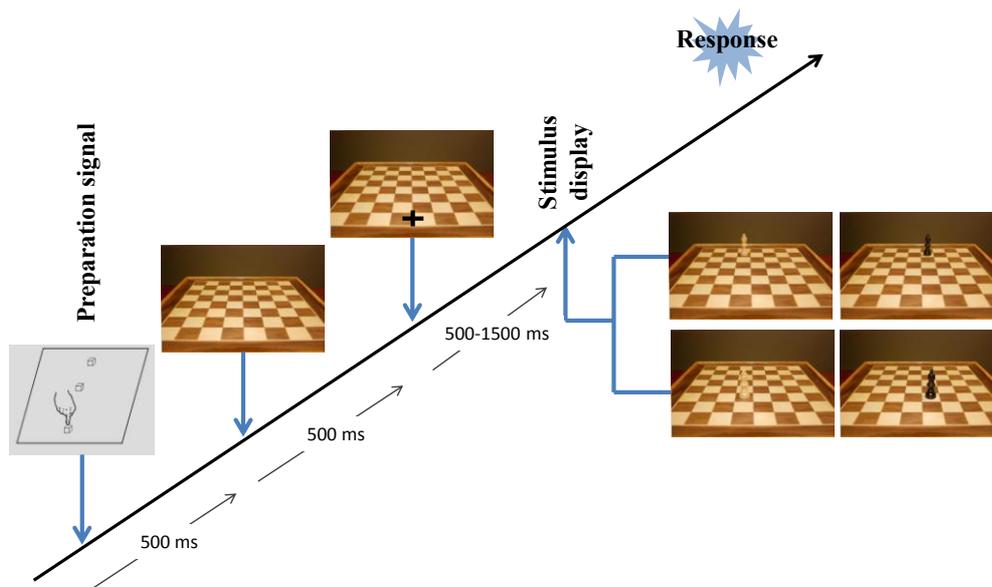


Figure 1: experimental design for experiment 1.

Data recording and analysis

Stimuli display and response recording were under the control of Matlab routines (Matlab R2008b from MathWorks). For each trial, we analysed reaction time (RT), i.e. the time elapsed between the presentation of the stimulus on the screen and the release of the contact of the index finger with the starting location, and movement time (MT), i.e. the time elapsed between the release of the starting location and the grasping of either response switch. For both RT and MT, we computed the mean value and standard deviation of the performances achieved by each participant in the 10 trials performed in each condition. To test the time course of the SRC effect, we rank ordered RTs in each condition and divided them into 3 bins, the first containing the fastest RTs and the last bin the slowest (Vincentisation procedure, Ratcliff, 1979). A 2 (Stimulus Location: proximal, distal) x 2 (Response: proximal, distal) x 3 (Bins: 1, 2, 3) x 2 (Instruction: proximal response for white stimuli, proximal response for black stimuli) Analysis of Variance (ANOVA) was run on the dependent measures with repeated measures for the first three factors.

Results

Reaction time

The ANOVA performed on mean revealed a significant Stimulus Location x Response interaction ($F(1, 30) = 38.82, p < .01, \eta_p^2 = .56$). When responding to the proximal switch, participants responded faster when the target was proximal than distal. Conversely, when responding to the distal switch, participants responded faster when the target was distal than proximal. The ANOVA performed on within participant variability revealed no significant interaction between Stimulus Location and Response location, but a three way significant interaction was observed between this last two and Bins ($F(2, 60) = 5.15, p < .01, \eta_p^2 = .14$). The RT's within-subject variability was lower in congruent than in incongruent trials, but only for the slowest Bin ($F(1, 30) = 4.36, p < .01, \eta_p^2 = .13$).

Movement time

The ANOVA performed on MT revealed a Stimulus Location x Response interaction ($F(1, 30) = 10.06, p < .01, \eta_p^2 = .25$). Responses towards the proximal switch had a shorter duration when participants responded to a proximal than a distal stimulus. Conversely, responses towards the distal switch had a shorter duration when participants responded to distal than the proximal stimulus. The ANOVA performed on within participant variability reveal no interaction between Stimulus Location and Response location.

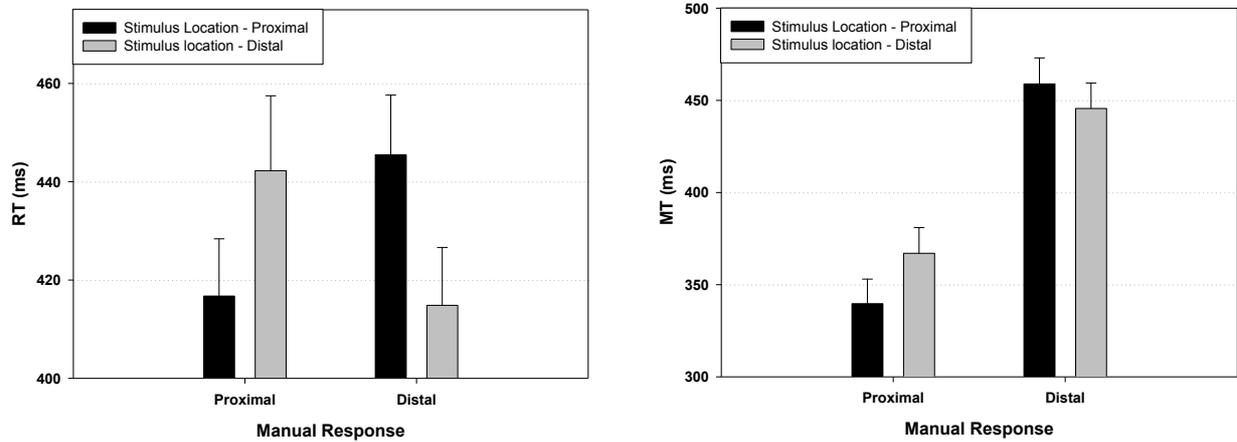


Figure 2: Results of the experiment 1 for the mean RTs and MTs. Error bars represent standard errors.

Discussion

The aim of Experiment 1 was to test SRC effect along the mid-body sagittal axis when varying proximal-distal responses to white-black colour of the visual stimuli presented at a proximal or distal location. In agreement with previous studies (Olivier, 2006), we observed that SRC effect is present when varying the proximal-distal location of the visual stimulus. Indeed, though the relevant feature for providing the response was the (white-black) colour of the stimuli, responding with a short or long movement was influenced by whether the stimulus was located in the proximal or distal part of the visual scene. Importantly, the present experiment demonstrated the presence of SRC effect on both RT and MT measures. Concerning RT, we found no difference when considering proximal and distal responses in the presence of congruent proximal-distal visual information (415 ms on average). Thus, varying the amplitude of the motor response did not affect RT, which do not confirmed that RT increases as a function target distance as predicted by Fitt's law (Munro, Plumb, Wilson, Williams & Mon-Wiliams, 2007). A positive relationship between RT and MT was reported in the past (Klapp, 1995 for a review), but it is worth noting that some other studies found no relation (e.g., Bourgeois & Coello, 2009) or an inverse relationship (e.g., Klapp, 1975). The controversy might be related to the time allowed for reacting to the stimuli. Indeed, Munro et al. (2007) reported that RT is unaffected by distance if enough advance time for response preparation is allowed. This is indeed the case in our study since there was no strong time constraints induced by the task as indicated by the mean RT which was above 400 ms. Another interpretation for the lack of variation of RT as a function of

movement amplitude might be that we used a grasping task instead of a pointing task as used before (Munro et al., 2007), for which the temporal control was reported to be differently influenced by target distance (Jeannerod, 1988). Despite the lack of effect of distance on RT, we found a strong effect of the location of the stimulus on RT, depending on the association with the response suggested by the colour of the stimulus. Indeed, we observed a significant variation of about 30 ms when comparing the congruent and incongruent conditions, suggesting that the irrelevant location of the stimulus interfered with the selection of the motor response in the colour discrimination task. This effect was within the range of SRC effect reported in the past (e.g., 432 vs. 477 ms in Buetti & Kerzel, 2009 ; 444 vs. 477 ms in Olivier, 2006 ; 415 ms vs. 444 ms in the present study), and suggested that a competition occurred between two different spatial codes interfering with the response selection, one induced by the task instructions and the other associated with the automatic processing of stimulus location (Buetti & Kerzel, 2009 ; Hommel, 2011). The increase of time may thus be attributed to the inhibitory processes required for selection the appropriate response, which need time to develop (Welch & Elliott, 2004).

The other interesting outcome of the study was that SRC effect was found not only on RT, but also MT. Indeed, although movement time increased when increasing response amplitude (109 ms for 15 cm), which was expected, we also observed that movement time was affected by SRC effect. Indeed, performing a movement to respond to the colour of a stimulus in incongruent trials resulted in an increase of movement time compared to congruent trials. One interpretation for these variations of MT is that they depend on the variation of RT. Indeed, previous studies have found that preparation time in simple aiming movements increases with target distance as MT do (Munro et al., 2007). Another plausible interpretation, thus, is that conflict resolution that occurred during response selection, as suggested by the increase of RT in the incongruent condition, remained still present during movement execution. This results contrasts with the finding that within-participant variability of RT was not affected by SRC effect, suggesting a certain degree of independence between RT and MT. This finding is quite surprising since no time constraint was induced by the task and thus no time pressure was exerted on the participants. Accordingly, we may have expected an effect of SRC on RT,

which was observed, but not on MT. Although this was not expected, this finding confirms nevertheless previous observations that MT can be affected by SRC effect (Buetti & Kerzel, 2009; Rubichi & Pellicano, 2004), generalising these previous observations made in a Simon task to the coding of distance parameter (Olivier, 2006). We can thus speculate that SRC effect interfered with movement execution because response selection occurred during both response selection and response execution (Buetti & Kerzel, 2009 ; Glover, 2004). In agreement with this, no SRC effect on MT has been reported in the past when task instructions imply to select the correct response before initiating the response action (Rubichi & Pellicano, 2004). It is thus possible that the irrelevant spatial code automatically activated by the stimulus disturbed response selection processes occurring before response initiation, but also during movement execution when on-line sensory information is processed to drive the arm at the correct location. Indeed, on-line control of voluntary motor action is thought to involve a comparison between actual and predicted sensory information. Assuming that predicted sensory information involved the same cognitive processes in movement guiding as those involved in movement selection, one may expect inhibition processes to also influence response execution. In order to further assess SRC effect during movement execution, we performed a second experiment in which the target to reach was weakly defined and kinematic aspects of the motor responses were analysed.

Experiment 2

In experiment 2 we investigated SRC effect on movement execution through temporal and kinematic analysis. We replace the response device by a 3D recording system of movement responses while pointing to target which was weakly spatially defined. Participants responded indeed to the colour of the stimulus by manually reaching a large proximal or distal area. Furthermore, visual stimuli were presented at different distances within the proximal and distal space, and we analysed response spatial accuracy and kinematics as a function of reaction time. Assuming that SRC effect on both movement selection and execution was related to the competition between the different spatial

codes suggested by the visual target, we expected movement end-point to veer towards the irrelevant target, and kinematic characteristics to be modified in the direction of the parameters characterising the response towards the irrelevant location.

Methods

Participants

Twenty-four adult naive participants recruited at the University Lille 3 participated in the experiment. All participants were right handed, except for 2 left-handed, and they had normal or corrected-to-normal vision. They were naive as to the purpose of the study and gave their informed consent prior to the experiment, which was performed in accordance with the local ethical committee guidelines and with the principles of the Helsinki declaration.

Apparatus and stimuli

The experiment setup was similar to the one used in experiment 1. The main difference was the use of a 3D motion capture device (zebrisTM ultrasound recording device, sample rate 100 Hz) and a pointing horizontal surface instead of a device composed of switches to record participants' responses. A single ultra sound transmitter was placed on the participants' forefinger to track and record movements trajectory. The starting location was represented by a 5 cm square placed at the same location as in experiment 1. The horizontal surface separating the participant from the computer screen was divided into 2 areas: a proximal area extending 15 cm from the starting location, and a distal area extending between 15 cm and 30 cm from the starting location. Proximal and distal areas were visually separated by a coloured strip. Participant provided their responses by pointing towards either the proximal or distal area as soon as the stimulus was presented, depending on its colour. No instruction was provided concerning the expected location of movement end-points in each area. Each pawn was placed on one of the squares of the 2 central columns to compensate for the different colour

of the squares. The pawn could be presented either in the proximal (1st, 2nd or 3rd row) or distal space (6th, 7th or 8th row). Half of the pawns presented were black and the other half were white (see Figure 4).

Procedure, data recording and analysis

With the exception of response modalities and possible locations for the visual stimulus, all other aspects of the study were similar as in experiment 1. Participants performed the colour discrimination task with visual stimuli presented at different distances within the proximal and distal area. The whole task was performed in one block, with ten repetitions for each position of the black and white pawns, for then a total of 240 trials presented in a randomized order. Because of the use of the 2 central columns, each target stimulus was thus slightly presented either on the left or the right hemifield. All trials with error (anticipated or incorrect responses, failure in data acquisition), or when reaction time was inferior to 200 ms or superior to 1000 ms, were repeated at the end of the block of trials. Stimulus display and response recording were under the control of matlab routines (matlab R2008b from MathWorks). The Zebris recording system registered the on-line (x, y, z) coordinates of the ultra-sound emitter placed on the participants' forefinger. Movement initiation was defined as the first time hand velocity reached 5 mm.s⁻¹ for at least 50 ms. Movement end-point was defined as the first time hand velocity dropped below 5 mm.s⁻¹ for at least 50 ms and when the elevation of the participant index finger was less than 15mm. For each trial, we recorded reaction time (RT), i.e. the time elapsed between the presentation of the stimulus on the screen and the time of movement initiation, and movement time (MT), i.e. the time elapsed between movement initiation and movement end-point. From trajectory coordinates, we also analysed kinematic parameters such as the peak velocity, the peak acceleration, and the times to these peaks from the beginning of the movement. Finally, we use the same vincentisation procedure as in experiment 1. A 2 (Response: proximal, distal) x 2 (Stimulus Laterality: left, right) x 6 (Stimulus Location: 3 proximal, 3 distal) x 3 (Bins: 1, 2, 3) x 2 (instruction: proximal response to white stimuli, distal response for white stimuli) analysis of variance (ANOVA) was run on the dependant measures with repeated measures for first four factors.

Results

Temporal parameters

The ANOVA performed on mean RT revealed a Response x Stimulus Location interaction ($F(5, 110) = 8.28, p < .01, \eta_p^2 = .27$). RTs for proximal responses increased with the distance of the visual stimulus, whereas mean RTs for distal responses decreased with the distance of the visual stimulus. This interaction was not found for the RTs' within-subject variability.

The ANOVA performed on mean MT revealed a significant main effect of target distance ($F(5, 110) = 5.04, p < .01, \eta_p^2 = .18$). The mean MTs tends to increase with the stimulus distance, but the Response x Stimulus Location significant interaction ($F(5, 110) = 18.64, p < .01, \eta_p^2 = .45$) revealed that was only true for the proximal responses. The ANOVA performed on the MTs' within-subject variability also revealed a significant Response x Stimulus Location interaction ($F(5, 110) = 7.89, p < .01, \eta_p^2 = .26$).

Kinematic analysis

Peak velocity

The ANOVA performed on the *Peak velocity* of motor responses revealed main effects of Response ($F(1, 22) = 302, p < .01, \eta_p^2 = .93$) and Stimulus location ($F(5, 110) = 19.99, p < .01, \eta_p^2 = .47$). The peak velocity logically greater for distal than for proximal responses, but it also actually increase significantly with the stimulus distance. This last effect seems to be greater for the faster than the slower bins as revealed by the significant Stimulus Location x Bins interaction ($F(10, 220) = 1.89, p < .05, \eta_p^2 = .08$).

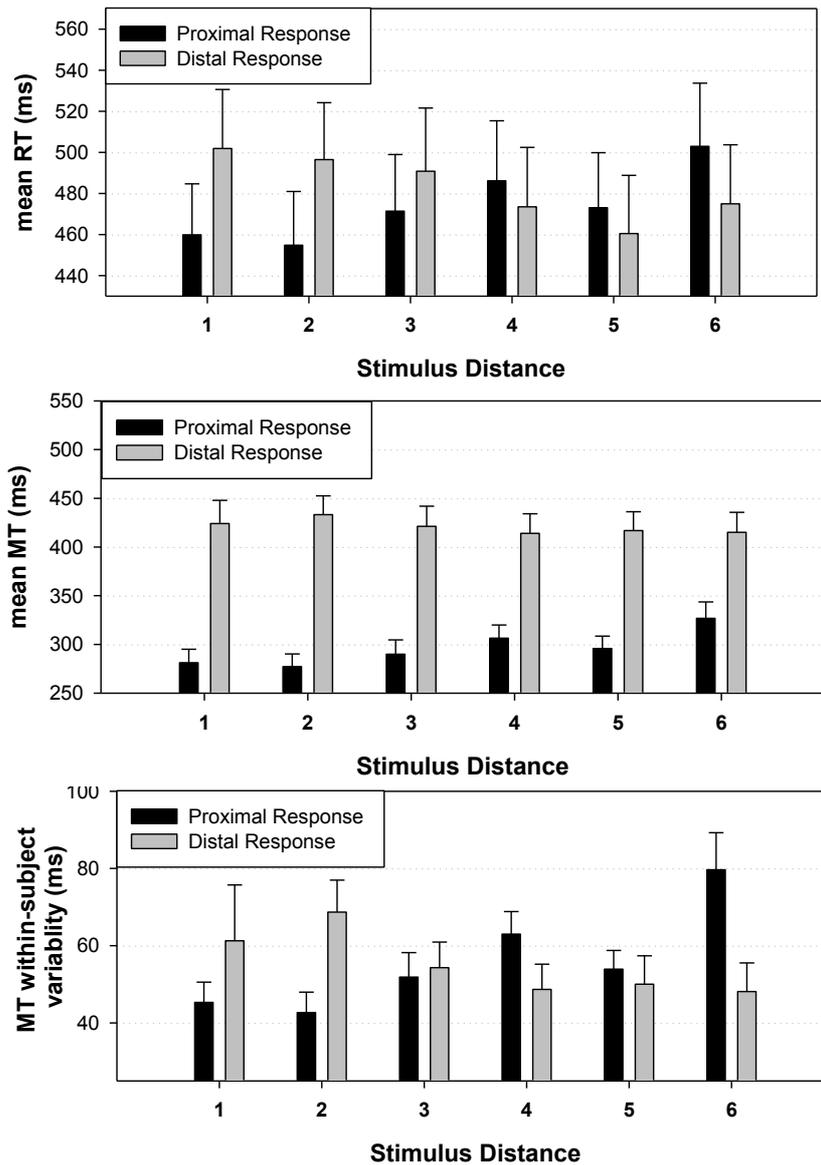


Figure 3: Results of experiment 2 with from top top to bottom, the mean RTs, mean MTs and the MT within-subject variability. Error bars represent standard errors.

The ANOVA performed on *Time to peak velocity* revealed a main effect of the Responsefactor. The peak velocity was reached faster in time for proximal than for distal responses ($F(1, 22) = 222.02$, $p < .01$, $\eta_p^2 = .90$). The ANOVA also revealed a Response x Stimulus Location interaction ($F(5, 110) = 11.59$, $p < .01$, $\eta_p^2 = .35$). The time to reach the peak velocity for the proximal responses increase as stimulus distance goes up but decrease the same time for the distal responses.

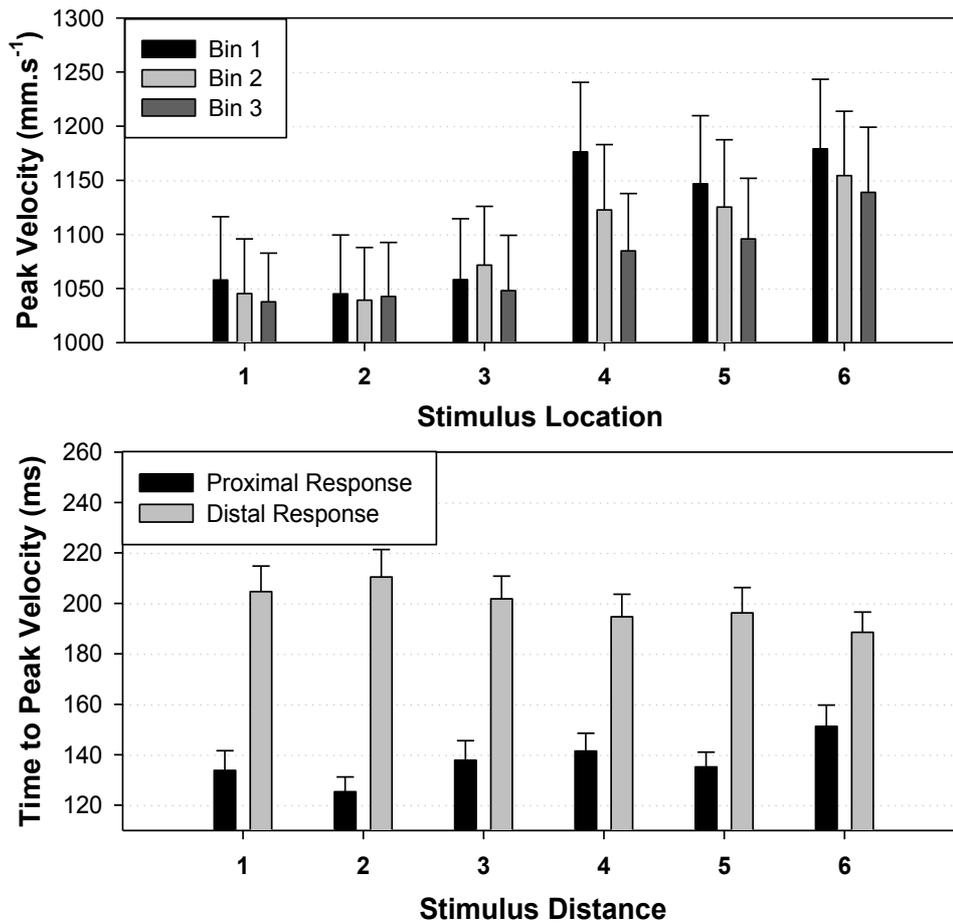


Figure 4: Results of experiment 2 for the Peak Velocity and time to Peak Velocity. Error bars represent standard errors.

Peak Acceleration

The ANOVA performed on the *acceleration peak* of motor responses revealed main effects of Responses ($F(1, 22) = 36.40, p < .01, \eta_p^2 = .62$) and Stimulus location ($F(5, 10) = 7.25, p < .01, \eta_p^2 = .25$). The peak acceleration was higher for distal than proximal response, but also increased as the stimulus distance increased. This appears to be the fact only for the distal responses as revealed by the significant Stimulus Location x Response interaction ($F(5, 110) = 4.28, p < .01, \eta_p^2 = .16$).

The ANOVA performed on the time of acceleration peak only revealed a significant main effect of Response ($F(1, 22) = 8.31, p < .01, \eta_p^2 = .27$). The acceleration peak was reached faster in time for proximal than for distal responses.

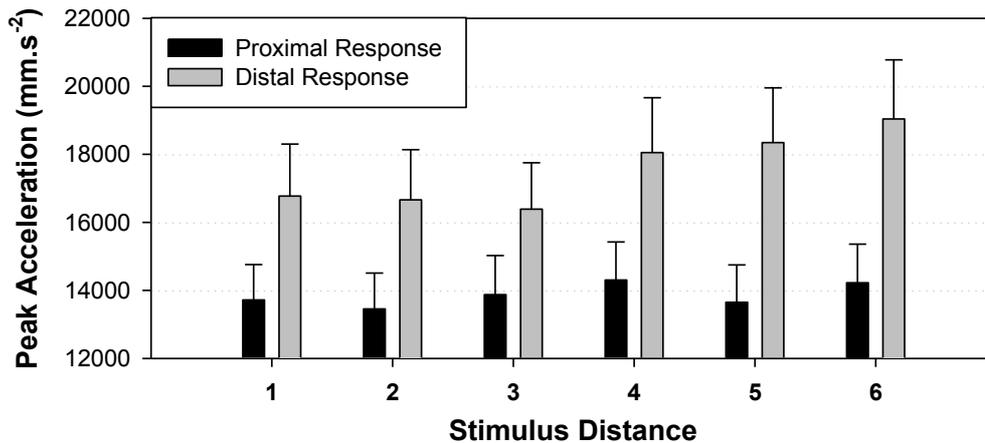


Figure 5: Results of experiment 2 for the Peak Acceleration. Error bars represent standard errors.

X position

The ANOVA performed on the X position (amplitude) of the motor response at velocity peak revealed main effects of Response ($F(1, 22) = 496.5, p < .01, \eta_p^2 = .95$) and Stimulus Location ($F(5, 110) = 8.53, p < .01, \eta_p^2 = .28$). The x position at the velocity peak obviously increased for distal compared to proximal responses but also with stimulus distance. This increase with stimulus distance was greater for proximal than for distal response as showed by the significant Stimulus Location x Response interaction ($F(5, 110) = 11.16, p < .01, \eta_p^2 = .34$). Finally, this difference was greater for the faster bin than for the slower ($F(10, 220) = 2.20, p < .01, \eta_p^2 = .09$).

The ANOVA performed on the X position of the motor response at the end of the movement revealed main effects of Response ($F(1, 22) = 1,222.87, p < .01, \eta_p^2 = .98$) and Stimulus Location ($F(5, 110) = 17.1, p < .01, \eta_p^2 = .39$). the general amplitude of the movement logically increased for distal compared to proximal responses, but also with stimulus distance. This increase with stimulus distance was greater for proximal than for distal response as showed by the significant Stimulus Location x

Response interaction ($F(5, 110) = 4.53, p < .01, \eta_p^2 = .17$). Finally, this difference was greater for the faster bin than for the slower ($F(10, 220) = 2.21, p < .01, \eta_p^2 = .09$).

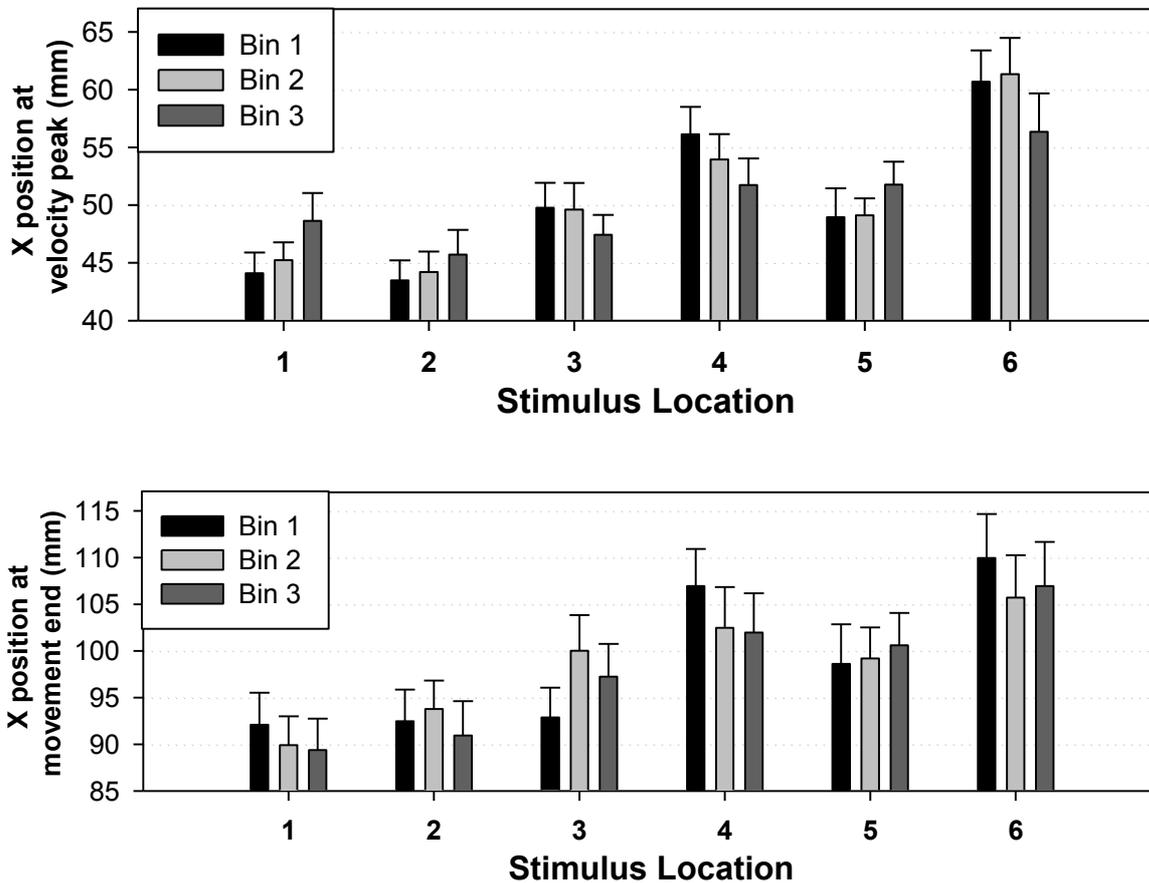


Figure 6: Results of experiment 2 for the proximal response of the X position at peak velocity and at movement end. Error bar represent standard errors.

Y position

The ANOVA performed on the Y position (direction) of the motor response revealed a main effect of Stimulus Laterality both at the peak velocity ($F(1, 22) = 15.01, p < .01, \eta_p^2 = .40$) and at the end of movement ($F(1, 22) = 13.70, p < .01, \eta_p^2 = .38$). The movement tends to veer more to the right when a right stimulus is displayed than when a left stimulus is displayed.

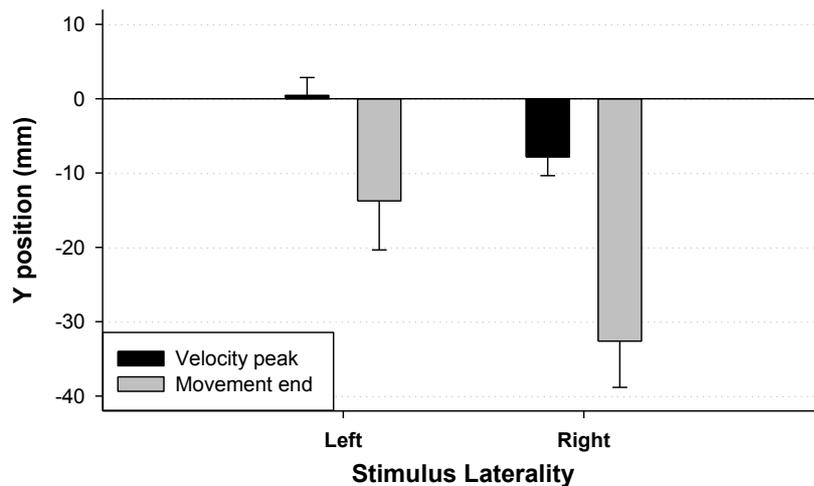


Figure 7: Results of experiment 2 for the Y position at peak velocity and movement end. A positive value represent a deviation to the left, and a negative value a deviation to the right. error bars represent standard errors.

Discussion

The aim of experiment 2 was to evaluate SRC effect of the stimulus distance on response selection and execution and to explore the temporal dynamics of this effect. First we replicate the results of Olivier (2006) about an SRC effect of stimulus amplitude. The results of the 2 tasks are quite coherent and point out that this effect influences of amplitude on both the selection and execution stages of the response.

We think that we gather many evidence that the programming and execution of the response is influenced by the dimensional overlap of distance coding between the stimulus and response code. We indeed observed that the SRC effect is present not only on RTs but also on MTs. One possible interpretation for these effects is that movement selection was not entirely accomplished before movement onset, and thus part of the selection process occurred during movement execution (Rubichi et al., 2000 ; Rubichi & Pellicano, 2004 ; Glover, 2004). Nonetheless, in experiment 2, we observed an effect of the stimulus location on the position of the hand during and at the end of the movement which cannot *per se* be explained by the sole influence of SRC on the response selection. Indeed the

position of the hand at the velocity peak and the end of the movement was significantly veered toward the position of the displayed stimulus, both in terms of amplitude and distance. The effect of stimulus distance and the SRC effect on the time and value of the velocity and acceleration peak also confirmed that stimulus location and dimensional overlap influence the movement in its onset, i.e. on the acceleration stage. This interpretation is compatible with what Buetti & Kerzel (2008, 2009) proposed. They observed SRC effects on the initiate movement angle of the response in a Simon task. The authors suggest that response selection and its programming/execution are parallel processes and that the conflict that arise from the dimensional overlap influence both processes. Even when the corrects response is selected, the SRC could still automatically activate the incongruent motor program. This program would only be partially inhibited when the response is produced and could thus influence the trajectory and the temporal dynamic of the movement.

Another interesting result from this set of data is about the temporal dynamics of the SRC effect. Classically, SRC effect are believed exert a strong influence early after the stimulus displays that decay over time. However this kind of temporal pattern has only been observed for classical Simon Task (Craighero, Fadiga, Rizzolatti & Umiltà, 1998 ; Buetti & Kerzel, 2008 ; Hommel, 1994). In the 2 experiments we did not observe any variation of SRC effect through time indicating a stronger SRC that decay over time. However, we did found a variation of SRC influence on the kinematic parameter through time. The pattern of result suggest that the SRC influence on the response programming/execution is stronger for the fastest than the slowest RT. It thus seems that the more the response initiation is delayed, the more time is given to select and program it, and thus the less influence of SRC is observed on these processes. We also observed that the effect of the stimulus location on the kinematic parameters is stronger for distal response than for proximal ones. Distal response took longer to produce and thus participant are confronted with the SRC for more time during the movement itself. The data suggest that the magnitude of SRC influence do not decay over time, but rather stay constant during the task. However it seems that over time, inhibitory processes are built to resolve the SRC conflict (Welch & Elliott, 2004 ; Buetti & Kerzel, 2009), and on-line control has more time to affect and correct the motor response. But the fact that stimulus location still

affect the kinematic parameter for the slowest bins suggest that this inhibition is only partial as the incongruent automatically activated motor code remain in the neural circuit. Indeed the stimulus was displayed to the participant through the duration of the whole trial, until his response was delivered. In this context, it is possible that a non decaying SRC effect continue to affect the cognitive system by automatically activating response code compatible to that stimulus. As suggested in the past (Howard & Tipper, 1997 ; Tipper, Howard and Jackson, 1997 ; Meegan & Tipper, 1998), competing spatial targets for actions during the initial analysis of a stimulus activates the corresponding response, regardless of whether the stimulus is to be responded to or not. Motor programs to the different spatial code of the stimulus will thus compete for the control of effectors involved in the response (Tipper, Howard, & Houghton 1999). In order to correctly reach the target, the non-relevant spatial activation has to be inhibited. The success and smoothness of the response depend then on the efficiency of inhibitory processes (Welsh and Elliott, 2004). In particular, movements are expected to be biased toward the irrelevant information when inhibition is incomplete. One could also point out the difference between the two tasks, in terms of both data pattern and methodological differences. On the contrary from the second experiment the data from the first one lack a detail kinematic analysis, and do not clearly show a temporal tendency for the SRC to decay, or increase, over time. The first task also involved a reach-to-grasp response whereas the second involved a pointing movement. We already mentioned that the study of the temporal dynamic of SRC rely mostly on data from classical Simon Task (Craighero, Fadiga, Rizzolatti & Umiltà, 1998 ; Buetti & Kerzel, 2008 ; Hommel, 1994). Although we did not manipulate the dimensional overlap of the direction coding, we did also used a pointing movement to offer very low spatial constraints for the responses. The diminution of these spatial constraints would need less resources during response programming, and thus diminish the control mechanism needed to resolve the SRC conflict.

The data of the present experiments are also compatible with the ideomotor theory of cognitive processes (James, 1892 ; Stock & Stock, 2004 ; Hommel, 1997, 1998 ; Hommel et al., 2001). The TEC claims for instance that perceived events (i.e., stimuli) and produced events (i.e., actions) are represented in the same way and by using the same kinds of coding (Prinz, 1990 ; Hommel, 2011).

The important point of this theory is that ideomotor representations serve both action selection and on-line control of action execution. Accordingly, spatial information interfering with action selection is supposed to interfere also with on-line control of action execution since the same representational substrate is supposed to be involved. This is indeed what we observed in the present study. The interfering spatial information inherent to the (irrelevant) location of the stimulus was found to influence reaction time, movement time and kinematic parameters, as predicted in the context of this theoretical framework.

Conclusion

The present study three conclusions. First, SRC effect occurs both in response selection and execution. Second, taking more time before responding reduce SRC effect on kinematic parameters, suggesting that leaving time for selecting the correct response reduces the effect of spatial competition during response execution. Third, SRC effect do not vary *per se* over time but its influence seems to relatively decrease as the inhibitory and on-line movement control processes progressively set up to counteract SRC.

References

- Bartolo, A., Carlier, M., Hassaini, S., Martin, Y., & Coello, Y. (2014). The perception of peripersonal space in right and left brain damage hemiplegic patients. *Frontiers in human neuroscience*, 8, 3.
- Bourgeois J. & Coello, Y. (2009). Role of inertial properties of the upper limb on the perception of the boundary of peripersonal space. *Psychologie Française*, 54, 225-239.
- Buetti, S., & Kerzel, D. (2008). Time course of the Simon effect in pointing movements for horizontal, vertical, and acoustic stimuli: Evidence for a common mechanism. *Acta psychologica*, 129, 420-428.
- Buetti, S., & Kerzel, D. (2009). Conflicts during response selection affect response programming : reaction toward the source of stimulation, *journal of experimental psychology: Human perception and performance*, 35, 816-834.
- Chao, L. L., & Martin, A. (2000). Representation of manipulable man-made objects in the dorsal stream. *NeuroImage*, 12, 478-484.

- Coello, Y., Orliaguet, J. P., & Prablanc, C. (1996). Pointing movement in an artificial perturbing inertial field: A prospective paradigm for motor control study. *Neuropsychologia*, 34, 879-892.
- Craighero, L., Fadiga, L., Rizzolatti, G., & Umiltà, C. (1999). Action for perception: a motor-visual attentional effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25, 1673-1692.
- Delevoeye-Turrell, Y., Bartolo, A., Coello, Y. (2010). Motor representation and the perception of space. In N. Gangopadhyay (Ed.) *Perception, Action and Consciousness* (pp. 217-242). Oxford University Press.
- Eimer, M., Hommel, B., & Prinz, W. (1995). S-R compatibility and response selection. *Acta Psychologica*, 90, 301-313.
- Georgopoulos, P. (1995). Current issues in directional motor control. *Trends in Neurosciences*, 18, 506-510.
- Georgopoulos, A. P., Kalaska, J. F., & Massey, J. T. (1981). Spatial trajectories and reaction times of aimed movements: effects of practice, uncertainty and change in target location. *Journal of Neurophysiology*, 46, 725-743.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach in visual perception*. Boston: Houghton Mifflin. Held, R., & Hein, A. (1963). Movement-produced stimulation in the development of visually guided behavior. *Journal of comparative and physiological psychology*, 56(5), 872-876.
- Glover, S. (2004). Separate visual representations in the planning and control of action. *Behavioral brain science*, 27, 3-26.
- Gordon, J., Ghilardi, M. F., & Ghez, C. (1994). Accuracy of planar reaching movements. I. Independence of direction and extended variability. *Experimental Brain Research*, 99, 97-111.
- Grèzes, J., Tucker, M, Armony, J. L., R. Ellis, Passingham, R. E. (2003). Objects automatically potentiate action: an fMRI study of implicit processing. *European Journal of Neuroscience*, 17, 2735-2740.
- Hietanen, J. K., & R m , P. (1995). Facilitation and interference occur at different stages of processing in Simon paradigm. *European Journal of Cognitive Psychology*, 7(2), 183-199.
- Hommel, B. (1993). Inverting the Simon effect by intention: Determinants of direction and extent of effects of irrelevant spatial information. *Psychological Research*, 55, 270-279.
- Hommel, B. (1994). Spontaneous decay of response code activation. *Psychological Research*, 56, 261-268.
- Hommel, B. (1996). S-R compatibility effects without response uncertainty. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 49, 546-571.
- Hommel, B. (1997). Toward an action-concept model of stimulus-response compatibility. In Hommel, B., & Prinz, W. (Eds.), *Theoretical issues in stimulus-response compatibility* (pp. 281-320). Amsterdam : North-Holland.
- Hommel, B. (1998). Event files: Evidence for automatic integration of stimulus-response episodes. *Visual Cognition*, 5, 183-216.
- Hommel B. (2011). The Simon effect as tool and heuristic. *Acta Psychologica*, 136, 189-202.
- Hommel, B., & Lippa, Y. (1995). S-R compatibility effects due to context-dependent spatial stimulus coding. *Psychonomic Bulletin & Review*, 2, 370-374.
- Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G., & Prinz, W. (2001). The Theory of Event Coding (TEC): A framework for perception and action planning, *Behavioral and Brain Sciences*, 24, 849-937.

- Howard, L. A., & Tipper, S. P. (1997). Hand deviations away from visual cues: Indirect evidence for inhibition. *Experimental Brain Research*, 113, 144–152.
- James, W. (1892). *Psychology. the briefer course*. New York: Henry Holt Company.
- Jeannerod, M. (1988). *The Neural and Behavioural Organization of Goal-Directed Movements*. Oxford: Oxford University Press.
- Jeannerod, M. (1997). *The cognitive neuroscience of action*. Oxford: Blackwell Publishers.
- Kerzel, D., Hommel, B., & Bekkering, H. (2001). A Simon-effect induced by induced motion: Evidence for a linkage between cognitive and motor maps. *Perception & Psychophysics*, 63(5), 862-874.
- Klapp, S. T. (1975). Feedback versus motor programming in the control of aimed movements. *Journal of experimental psychology: Human perception and Performance*, 104, 147-153.
- Klapp, S. T. (1995). Motor response programming during simple choice reaction time: the role of practice. *Human perception and performance*, 21(5), 1015-1027.
- Kornblum, S. (1994). The way irrelevant dimensions are processed depends on what they overlap with: The case of Stroop- and Simon-like stimuli. *Psychological Research*, 56, 130-135.
- Kornblum, S., Hasbroucq, T., & Osman, A. (1990). Dimensional overlap: Cognitive basis of stimulus–response compatibility: A model and taxonomy. *Psychological Review*, 97, 253-270. Merleau-Ponty, M. (1945). *Phénoménologie de la perception*. Paris: Gallimard.
- Kornblum, S., & Lee, J. W. (1995). Stimulus–response compatibility with relevant and irrelevant stimulus dimensions that do and do not overlap with the response. *Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance*, 21, 855–875.
- Lamberts, K., Tavernier, G., & d'Ydewalle, G. (1992). Effects of multiple reference points in spatial S–R compatibility. *Acta Psychologica*, 79, 115–130.
- Meegan, D. V., & Tipper, S. P. (1998). Reaching into cluttered visual environments: Spatial and temporal influences of distracting objects. *Quarterly Journal of Experimental Psychology: Human Experimental Psychology*, 51(A), 225–249.
- Mewaldt, S. P., Connelly, C. L., & Simon, J. R. (1980). Response selection in choice reaction time: Test of a buffer model. *Memory & Cognition*, 8, 606–611.
- Munro H., Plumb M. S., Wilson A. D., Williams J. H., Mon-Williams M. (2007). The effect of distance on reaction time in aiming movements. *Exp. Brain Res*, 183, 249–257.
- Nicoletti, R., & Umiltà, C. (1989). Splitting visual space with attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 15, 164–169.
- Noe, A. (2004). *Action in perception*. Cambridge: The MIT press.
- Olivier, G. (2006). Visuomotor priming of a manual reaching movement during a perceptual decision task. *Brain Research*, 1124, 81-85.
- Piaget, J. & Inhelder, B. (1966). *La psychologie de l'enfant*. Paris: Presse Universitaire de France.
- Prinz, W. (1990). A common coding approach to perception and action. In O. Neumann, & W. Prinz (Eds.), *Relationships between perception and action* (pp. 167–201). Berlin: Springer Verlag.

- Ratcliff, R. (1979). Group reaction time distributions and an analysis of distribution statistics. *Psychological Bulletin*, 86, 446-461.
- Rosenbaum, D. A. (1980). Human movement initiation: Specification of arm, direction, and extent. *Journal of Experimental Psychology: General*, 109, 444-474.
- Riehle, A., & Requin, J. (1989). Monkey primary and premotor cortex: single-cell activity related to prior information about direction and extent of an intended movement. *Journal of Neurophysiology*, 61, 534-549.
- Rubichi, S., Nicoletti, R., Umiltà, C., & Zorzi, M. (2000). Response strategies and the Simon effect. *Psychological research*, 63, 129-136.
- Rubichi, S. & Pellicano, A. (2004). Does the Simon effect affect movement execution? *European journal of cognitive psychology*, 16, 825-840.
- Schaefer, S. Y., Haaland, K. Y., & Sainburg, R. L. (2009). Dissociation of initial trajectory and final position errors during visuomotor adaptation following unilateral stroke. *Brain Research*, 1298, 78-91.
- Shadmehr R, Smith MA, Krakauer JW (2010). Error correction, sensory prediction, and adaptation in motor control. *Annual Reviews of Neuroscience*, 33, 89-108.
- Simon, J. R. (1990). The effects of an irrelevant directional cue on human information processing. In R. W. Proctor & T. G. Reeve (Eds.), *Stimulus-response compatibility: An integrated perspective* (pp. 31-86). Amsterdam: Elsevier.
- Simon, J. R., & Rudell, A. P. (1967). Auditory S-R compatibility: The effect of an irrelevant cue on information processing. *Journal of Applied Psychology*, 51, 300-304.
- Simon, J. R., & Small, A. M., Jr. (1969). Processing auditory information: Interference from an irrelevant cue. *Journal of Applied Psychology*, 53, 433-435.
- Stock, A., & Stock, C. (2004). A short history of ideo-motor action. *Psychological Research*, 68, 176-188.
- Tipper, S. P., Howard, L. A., & Houghton, G. (1999). Behavioral consequences of selection form neural population codes. In S. Monsell & J. Driver (Eds.), *Attention and performance XVIII* (pp. 223-245). Cambridge: MIT Press.
- Tipper, S. P., Howard, L. A., & Jackson, S. R. (1997). Selective reaching to grasp: Evidence for distractor interference effects. *Visual Cognition*, 4, 1-38.
- Tucker, M. & Ellis, R. (1998). On the relations between seen objects and components of actions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24, 830-846.
- Tucker, M. & Ellis, R. (2001). The potentiation of grasp types during visual object categorization. *Visual Cognition*, 8, 769-800.
- Tucker, M. & Ellis, R. (2004). Action priming by briefly presented objects, *Acta Psychologica*, 116, 185-203.
- Wallace, R. J. (1971). S-R compatibility and the idea of a response code. *Journal of Experimental Psychology*, 88, 354-360.
- Welsh, T.N., & Elliott, D. (2004). Movement trajectories in the presence of a distracting stimulus: Evidence for a response activation model of selective reaching. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 57, 1031-1057.

IV. 4. 2. Étude 4 : Effets de compatibilités manuelle et d'amplitude dans une tâche de décision perceptive

Présentation de l'étude

Dans cette quatrième étude, nous avons adapté le paradigme de CSR utilisé précédemment pour évaluer la présence et l'interaction entre 2 effets de compatibilité: un effet de compatibilité entre la latéralité du stimulus et l'effecteur moteur utilisé ; et un effet de compatibilité entre la distance du stimulus et l'amplitude de la réponse manuelle. La manipulation conjointe de ces différents effets de CSR avait pour but d'évaluer si les effets induits par plusieurs codes spatiaux simultanés présentaient les caractéristiques d'une interaction, et d'approfondir les études sur la dynamique temporelle de tels effets.

Principaux résultats

Les principaux résultats de cette étude ont été de montrer la présence simultanée des différents effets de CSR (effet Simon et effet de l'amplitude). Les analyses montrent en effet que chacun des codes spatiaux manipulés ici induit un effet de CSR (à la fois sur les TR et les TM). De plus, le degré de similarité entre le stimulus et la réponse est d'autant plus grand lorsque les 2 types de codes sont compatibles avec la réponse, que lorsqu'ils ne sont pas mutuellement compatibles. Ces résultats montrent donc l'additivité des différents codes spatiaux dans les effets de CSR. Ces différents codes correspondant ainsi à différentes dimensions des codes du stimulus et de la réponse (Kornblum, 1994). De plus, les résultats suggèrent que les magnitudes de ces effets de compatibilité sur le TR et les TM varient en fonction de la latence de réponse. Ces différents résultats sont discutés en relation de la littérature des liens perception-action.

Independent influences of manual and amplitude compatibility effects during a perceptual decision task

Coutté, A., Richez, A., Coello, Y., & Olivier, G.

Abstract

Accounts of Stimulus-Response compatibility (SRC) effect usually claim that when a stimulus is presented, a spatially congruent manual response is automatically activated, which modulates the speed of the to-be-executed response. Spatial SRC effects can be based on the compatibility between either (1) stimulus location and manual response goal (Simon effect), or (2) the distance to the stimulus and the manual response amplitude (Amplitude SRC effect).

In the present experiment, we conjointly manipulated a Simon effect and an Amplitude SRC effect during a color discrimination task. The results pointed out that the stimulus position potentiates conjointly a Simon effect and an Amplitude SRC effect: the more the to-be-executed response is congruent with the response activated by this property, the faster is its execution. Moreover, our results suggest that the magnitude of the Amplitude SRC effect on response latency and execution time reflect the temporal aspects of the response motor planning.

Keywords: stimulus-response compatibility effect, Simon effect, amplitude compatibility effect, motor planning/control, action/perception coupling

Introduction

Efficient manual interactions with the environment usually require reciprocal relationships between action and perception (Craighero, Fadiga, Rizzolatti, & Umilta, 1999; Hommel, Müsseler, Aschersleben, & Prinz, 2001; Schütz-Bosbach & Prinz, 2007). These relationships have been emphasized in particular using the spatial Stimulus-Response compatibility (SRC) paradigm (Hommel, 2011; Olivier, 2006; Tucker & Ellis, 2004). Spatial SRC effect expresses the fact that a manual response to a stimulus is more efficient (faster and more accurate) when the spatial characteristics of stimulus and response match compared to when they do not. Most of theoretical accounts of spatial SRC effects claim that perception and action are linked through two processing routes (Hommel, 2011; Kornblum, 1994; Proctor, 2011). On the one hand when a stimulus is presented, a direct route automatically activates a motor response congruent with the spatial dimensions of the stimulus. On the other hand an indirect route activates the to-be-executed response through arbitrary codes (e.g., experimental instructions). Response efficiency therefore varies according to the compatibility between the properties (location, distance...) of perceived stimuli and produced actions.

A widely studied SRC effect focusing on the spatial dimensions of the task is the Simon effect (Simon & Small, 1969). In classical Simon tasks (Hommel, 2011), participants have to execute a manual response as a function of the color of a stimulus (stimulus location is irrelevant to the task). The more the to-be-executed response is spatially congruent with the stimulus (on horizontal and vertical axis), the faster is its execution (Ansorge & Wühr, 2004). More precisely, it was found that the spatial consequences of action more than its location contribute to the Simon effect (Hommel, 1993). For instance, responding with one hand at a central location to lateralized stimuli resulted in a Simon effect when motor responses were associated with lateralized sounds (Mewaldt, Connelly, & Simon, 1980). A Simon effect can

also be observed in Go/NoGo Simon tasks, in which the to-be-executed motor response is precued before stimulus presentation (Buetti & Kerzel, 2009; Hommel, 1996).

Recently, several studies suggested that motor control models may allow to understand more precisely Simon effect (Buetti & Kerzel, 2009; Coutté, Olivier, & Faure, 2014). Indeed, manual motor control is known to rely on planning and on-line control processes (Schmidt, 1975): whereas movement planning is generally prominent before and during initiation of the movement, on-line control gradually increases during movement execution (Glover, 2004). Respective contributions of both planning and on-line control are partly determined before the movement onset and dynamically adapted according to the spatio-temporal constraints of the task: fast movement execution requires a near complete specification of the motor response before execution onset, whereas slower movement execution allows for on-line corrections so as to respond to task complexity or changing context (Glover, 2004). According to Buetti and Kerzel (2009), during a Simon task, Simon effect affects both planning and execution of the manual response: Simon effect is observed on reaction time (latency of response initiation), movement time (duration of response execution) and movement kinematic parameters. When stress is put on movement initiation (e.g. using precue or instructions), the Simon effect influences movement time but not reaction time. By contrast, precueing the correct response before stimulus presentation (Go/NoGo Simon task) reduces Simon effect on movement parameters while not affecting Simon effect on reaction time. These results suggest that temporal characteristics of Simon effect may reflect the dynamical properties of the planning and execution components of manual responses (Buetti & Kerzel, 2009; Olivier & Velay, 2009).

Additionally to classical Simon effect, SRC effect was also observed when manual responses were selected according to their amplitude instead of their direction (Olivier, 2006). In a color discrimination task consisting in grasping a proximal or distal switch depending on

the color of a chess piece, the author showed that participants initiated their response faster when the motor response was congruent with the distance of the chess piece on the chessboard. According to the author, visual object presentation activated a reaching response compatible with its distance. In the non-congruent condition (e.g., proximal motor response in the presence of a distal stimulus) the motor response induced by the stimulus location interfered with the motor response selected from its color. However, whether SRC effect in tasks focusing on the amplitude of the response influences only planning processes of the motor response or also the control of motor execution has not been studied yet.

In this context, the aim of the present study was twofold. The first aim was to assess the temporal dynamic of the Amplitude SRC effect, i.e. whether Amplitude SRC effect is observed on both on RTs (expressing mainly motor planning processes) and MTs (expressing planning and/or motor on-line control processes), and whether the effect on RTs and MTs is dependent on response temporal dynamics. The second aim of the study was to evaluate whether Amplitude and Simon like SRC effect interact together or not.

Method

Participants

Thirty-six right-handed students (mean age = 22.8, SD = 4.2) from Nice University volunteer to participate in this experiment. They all had normal or corrected-to-normal visual acuity and were unaware of the purpose of the experiment. They all gave their written informed consent before participating in the experiment.

Apparatus & Stimuli

The experimental apparatus consisted of a vertical computer screen and a horizontal response device. The screen (size 19 inches, refresh rate 120 Hz) was positioned on the table

57 cm from the participant and with the top part aligned with eyes level. The response device was positioned on the table 20 cm from the participant. It was composed of 6 push-button switches: two switches for the starting locations of the right and left hand, and two switches positioned at a proximal (12 cm from starting switch) or distal (26 cm from starting switch) location. The near and far switches were horizontally separated by 16 cm (Figure 1). Activating the near and far switches required a precision grip movement.

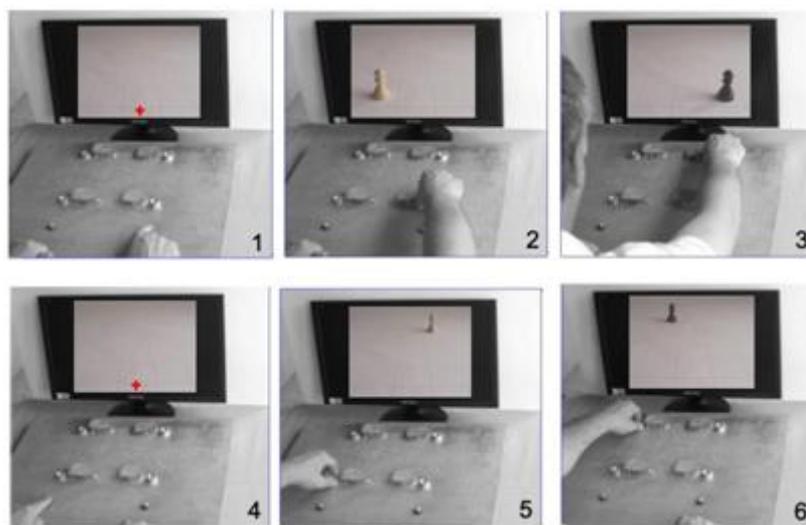


Figure 1: *Experimental device used for presenting stimuli and registering responses.*

From distinct starting location (1;4), the right and left hand could execute either a proximal (2;5) or distal response (3;6).

The visual stimuli consisted of 8 color photographs (height 20 cm * width 26 cm; 200 dpi) presenting one chess pawn at different locations on a graph paper (Figure 2). Chess pawn (either black or white) were placed either on left or right hemifield, at a proximal or distal location. The photographs reproduced the visual perspective that a player would experience if he/she would face a similar but actual display.

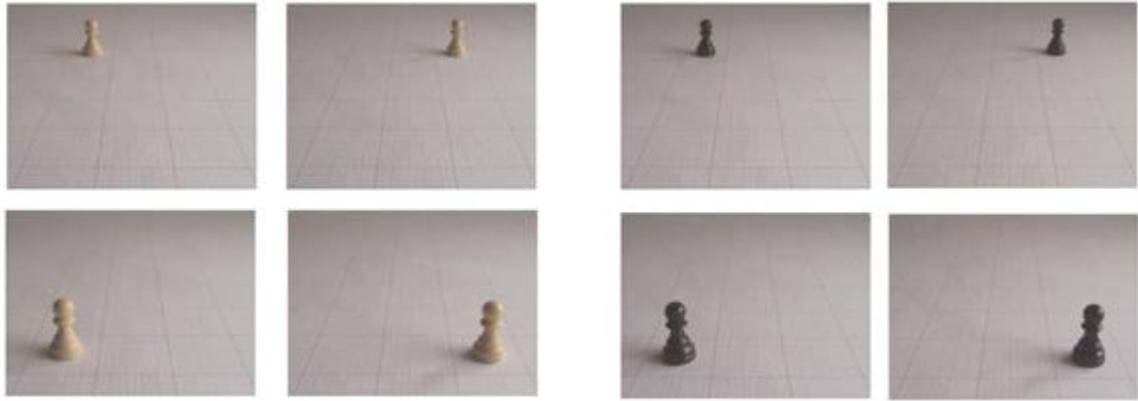


Figure 2: illustration of the 4 possible locations for both black and white chess pawns.

Procedure

Participants were facing the screen. Before each trial, written instructions were displayed on the screen indicating which hand had to be put on the starting location (right starting button for right hand, or left starting button for left hand). The other hand had to rest closed to the alternative starting position. The participant then pressed on the starting button with the indicated hand to initiate the trial. When pressure on the button was sustained for one second, a picture of the graph paper without any chess pawn was displayed: 500 ms later, a fixation cross centered at the bottom on the graph paper appeared for 300 ms. Then, a chess pawn was displayed at one of the 4 possible locations and remained visible until the participant released the starting button to grasp either the proximal or distal switch located in the same hemifield (Figure 3).

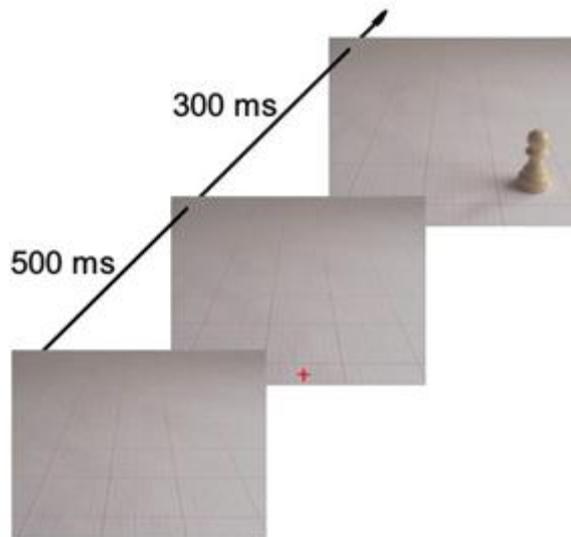


Figure 3: *Time sequence of a particular trial.*

The task consisted in reaching and grasping the proximal or distal switch depending on the stimulus color (distal or proximal response for respectively white or black pawns for 50% of participants, and the opposite for the other 50%). Participants were asked to respond as fast and accurately as possible. For each response, the computer recorded reaction time (RT), i.e. time elapsed between the presentation of the chess pawn and the release of the starting push-button switch; movement time (MT), i.e. time elapsed between the release of the starting push-button switch and the grasp of the response switch; and the response. Before starting the experimental session, participants performed a training session (about 20 trials), so that their reach-and-grasp movements were performed smoothly while keeping their gaze on the screen during the motor responses. However, in the training session the target was always presented at the center of the screen. The whole experimental session (80 trials) resulted from the possible combination of the response hand's laterality (right vs left), response amplitude (proximal vs distal), target's lateral location (right vs left) and target's distance (distal vs proximal), with 10 trials per condition.

Data analysis

With respect to our hypotheses, mean RTs and MTs were submitted to a repeated measures Analysis of Variance (ANOVA) with (1) Amplitude compatibility between response switch and target's in-depth location (compatible vs incompatible) and (2) Hand compatibility between response hand's laterality and target's lateral location (compatible vs incompatible) as within-subject factors. For RTs and MTs analysis, values higher or lower than the mean score ± 2 SD were replaced by this threshold value (1,9% of trials). We also computed for each participant the magnitude (i.e. difference between performance in incompatible and compatible condition) of the Amplitude compatibility effect and the Hand compatibility effect. We further examined the relationships between RTs and the magnitudes of both these compatibility effects (on RTs and MTs) by calculating Pearson correlation coefficients. Wrong response trials (reaching and grasping the wrong switch), were excluded from further analyses (2,4% of data).

Results

Reaction time

ANOVA performed on RTs revealed a significant effect of Amplitude compatibility, $F(1, 35) = 7.1, p < .05, \eta^2 = .17$: RTs were shorter in the compatible condition ($M = 390$ ms ; $SD = 74$) compared to the incompatible one ($M = 398$ ms ; $SD = 81$). ANOVA also revealed a significant effect of Hand compatibility on RTs, $F(1, 35) = 34.8, p < .001, \eta^2 = .50$: RTs were significantly shorter in the compatible condition ($M = 386$ ms ; $SD = 75$) compared to the incompatible one ($M = 403$ ms ; $SD = 79$). Amplitude compatibility and Hand compatibility didn't interact significantly, $F(1, 35) = 0.95, p = .34$. Amplitude compatibility effect and Hand compatibility effect magnitudes were respectively 8 ms and 17 ms.

Movement time

ANOVA performed on MTs revealed a significant effect of Amplitude compatibility , $F(1, 35) = 38, p < .001, \eta^2 = .52$: MTs were shorter in the compatible condition ($M = 565$ ms ; $SD = 134$) compared to the incompatible one ($M = 604$ ms ; $SD = 134$). ANOVA also revealed a significant Hand compatibility effect on MTs, $F(1, 35) = 5.7, p < .05, \eta^2 = .14$: MTs were significantly shorter in the compatible condition ($M = 576$ ms ; $SD = 131$) compared to the incompatible one ($M = 593$ ms ; $SD = 140$). Amplitude compatibility and Hand compatibility effects did not interact significantly, $F(1, 35) = 1.56, p = .29$. Amplitude compatibility effect and Hand compatibility effect magnitudes were respectively 39 ms and 17 ms.

Correlation analysis

Correlation analysis revealed a positive significant correlation between RTs and the magnitude of Amplitude compatibility effect on RTs, $r = .42, p < .05$. Moreover, RTs were negatively correlated with magnitude of Amplitude compatibility effect on MTs, $r = -.37, p < .05$.

Discussion

In the present experiment, participants were asked to reach and grasp a target-switch (proximally or distally located) according to the color of the stimulus presented on the screen, which could be located at a proximal or distal location either on the right or left side of the workplace. Before each trial, participants were asked to select either their right or left hand to respond. We expected that the response rapidity should vary as a function of an Amplitude SRC effect, and a Simon effect. Statistical analysis confirmed the presence of both the Amplitude and Simon SRC effects. Moreover, the correlation analysis showed that the

response latency positively correlated with the magnitude of Amplitude SRC effect on RTs, and negatively correlated with the magnitude of Amplitude SRC effect on MTs.

Our results are consistent with previous research on Amplitude SRC effect (Olivier, 2006). They suggest that the presentation of a right or left visual stimulus activates a lateralized motor response for which the specification of amplitude corresponds to the distance to the stimulus. As a consequence, RTs and MTs vary as a function of the compatibility between amplitude of this potentiated response and amplitude of the to-be-executed response. When they are compatible, responses are faster planned and executed than when they are incompatible. Additionally to Amplitude SRC effects, our results also highlighted significant hand compatibility effect. This Simon effect (Buetti & Kerzel, 2009) relies on compatibility between stimulus location and precued motor effector: spatial laterality of the presented stimulus activates a manual action whose spatial goal is congruent with the stimulus location. When the spatial goal of the to-be-executed precued manual response is congruent with this stimulus location, its realization is faster (on RTs and MTs) than when it is incongruent.

Interestingly, Hand compatibility effect was significant on RTs and MTs, but did not interact with Amplitude compatibility effect. In relation to our second hypothesis, these results suggest that stimulus location induced conjoint emergences of two independent and specific SRC effects: Simon effect and Amplitude SRC effect. Both these SRC effects had their own cumulative influences on response initiation and execution. In other words, stimulus location potentiated a manual response characterized by a specific goal's location and a specific amplitude. When participant had to respond, the rapidity of the response varied gradually as a function of its compatibility with the target-dependent potentiated responses. When both goal's location and response amplitude were congruent, responses were faster than when only one property was congruent. Similarly, responses were faster when one property

was congruent than when both were incongruent. This cumulative influence of both SRC effects was observed on response selection and programming (RTs), but also on movement execution (MTs).

In a more speculative way, one may ask whether the occurrence timing of the Simon effect influenced the occurrence timing of the Amplitude SRC effect. Indeed, Amplitude SRC effect on RTs was only 8 ms in this experiment (in which participants had to respond with either their right or left hand) whereas it was 29 ms in the study of Olivier (2006) (in which participants responded exclusively with the right hand). Previous research suggested that during a manual response planning, hand selection and response amplitude planning are serially planned (Bonnet, Requin, & Stelmach, 1982; Rosenbaum, 1980). In the present study, the participant had to select the response hand before stimulus presentation and before responding. The Amplitude SRC effect might therefore have been brought later, so that it became weaker on RTs (8 ms) and greater on MTs (39 ms). Follow-up studies would be necessary to further test this interpretation.

Finally, correlation analysis brought out complementary clues to understand dynamical specificities of Amplitude SRC effect with regard to the framework of motor control issue. In the present experiment, and in line with Glover's motor control model (2004), one may suggest that correlations between RTs and magnitudes of Amplitude SRC effect on RTs and MTs reflect the dynamics of the control of manual response. More precisely, when RT increases (which allows more time for motor planning processes before response initiation), magnitude of Amplitude SRC effect is greater on RT, but smaller on MT. In other words, when response is more exhaustively planned before response initiation, Amplitude SRC effect occurs mainly before response initiation. When response is less extensively planned before response initiation, Amplitude SRC effect occurs mainly during

motor execution. Our results thus suggest that the temporal aspects of motor planning subtend the magnitude of Amplitude SRC effect (on RTs and MTs).

To sum up, this study points out that during a color discrimination task, a single property of the stimulus (spatial position) may potentiate conjointly a Simon effect and an Amplitude SRC effect: the more the expected motor response is congruent with the response activated by this property, the faster is its execution. Moreover, because of the dynamical dimension of the coupling between perception and action, magnitude of Amplitude SRC effect is closely linked to the characteristics of response control. Complementary investigations with kinematic measures would be necessary to further investigate spatial and temporal specificities of these processes: kinematic assessment would notably allow to explore whether Amplitude SRC effect is driven by the visuomotor priming of a compatible response, or by an inhibition of the incompatible spatial location (Couth, Gowen, & Poliakoff, 2014).

References

- Ansorge, U., & Wühr, P. (2004). A response discrimination account of the Simon effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 30 (2), 365-377.
- Bonnet, M., Requin, J., & Stelmach, G. E. (1982). Specification of direction and extent in motor programming. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 19 (1), 31-34.
- Buetti, S., & Kerzel, D. (2009). Conflicts during response selection affect response programming: Reactions towards the source of stimulation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35(3), 816-834.
- Couth, S., Gowen, E., Poliakoff, E. (2014) Dissociating affordance and spatial compatibility effects using a pantomimed reaching action. *Experimental Brain Research*, 232(3), 855-

- Coutté, A., Olivier, G., & Faure, S. (*in press*). Influence of goal and laterality of a prepared hand response on a co-occurring visual search. *Swiss Journal of Psychology*
- Craighero, L., Fadiga, L., Rizzolatti, G., & Umiltà, C. (1999). Action for perception: a motor-visual attentional effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25, 1673-1692.
- Glover, S. (2004). Separate visual representations in the planning and control of action. *Brain and Behavioral Science*, 27, 3–78.
- Hommel, B. (1997). Toward an action-concept model of stimulus-response compatibility. In B. Hommel & W. Prinz (Eds.), *Theoretical issues in stimulus-response compatibility* (pp. 281-320). Amsterdam: North-Holland.
- Hommel, B. (1993). Inverting the Simon effect by intention: Determinants of direction and extent of effects of irrelevant spatial information. *Psychological Research*, 55, 270-279.
- Hommel, B. (2011). The Simon effect as tool and heuristic. *Acta Psychologica*, 136, 189-202.
- Hommel, B. (1996). S-R compatibility effects without response uncertainty. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 49A, 546-571.
- Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G., & Prinz, W. (2001). The Theory of Event Coding (TEC): A framework for perception and action planning. *Behavioral and Brain Sciences*, 24, 849-937.
- Komblum, S. (1994). The way irrelevant dimensions are processed depends on what they overlap with: The case of Stroop and Simon-like stimuli. *Psychological Research*, 56, 130-135.
- Mewaldt, S. P., Connelly, C. L., & Simon, J. R. (1980). Response selection in choice reaction time: Test of a buffer model. *Memory & Cognition*, 8, 606-611.
- Olivier, G. (2006). Visuomotor riming of a manual reaching movement during a perceptual decision task. *Brain Research*, 1124, 81-85.

- Olivier, G., & velay, J. L. (2009). Visual objects can potentiate a grasping neural simulation which interferes with manual response execution. *Acta Psychologica*, 130, 147-152.
- Pellicano, A., Iani, C., Borghi, A. M., Rubichi, S., & Nicoletti, R. (2010). Simon-like and functional affordance effects with tools: The effects of object perceptual discrimination and object action state. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 63, 2190–2201.
- Proctor, R. W. (2011). Playing the Simon game: Use of the Simon task for investigating human information processing. *Acta Psychologica*, 136, 182-188.
- Rosenbaum, D. A. (1980). Human movement initiation: specification of arm, direction, and extent. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 109, 444-74.
- Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82, 225–260.
- Schütz-Bosbach, S., & Prinz, W. (2007). Perceptual resonance: action-induced modulation of perception. *Trends in Cognitive Science*, 11(8), 349-55.
- Simon, J. R., & Small, A. M. (1969). Processing auditory information: Interference from an irrelevant cue. *Journal of Applied Psychology*, 53, 433–435.
- Tucker, M., & Ellis, R. (2004). Action priming by briefly presented objects. *Acta Psychologica*, 116, 185–203. doi:10.1016/j.actpsy.2004.01.004

IV. 5. Étude 5 Compatibilité Stimulus Réponse, effet de la distance perçue: étude développementale

Présentation de l'étude

La quatrième étude est également un protocole transversal, proposant à des sujets de 8 à 11 ans, la tâche développée dans la première expérience de l'étude 3. Les objectifs principaux de cette étude étaient, dans un premier temps d'établir une exploration des effets de CSR chez l'enfant (ce qu'à notre connaissance n'a pas encore été réalisé), et dans un second temps de comparer l'évolution des performances des enfants dans la tâche d'amorçage avec leur évolution dans les tâches de perceptions spatiales des 2 premières études.

Principaux résultats

Les résultats de l'étude mettent en évidence une évolution en fonction de l'âge de l'effet de CSR. Les enfants de 8 ans ne sont pas affectés par la CSR de la distance perçue du stimulus. Le pattern de réponse des enfants évolue avec l'âge et les enfants de 10 et 11 ans présentent un avantage pour les situations de compatibilité par rapport aux situations d'incompatibilité. Cet avantage est observé à la fois sur les TR et les TM, ce qui suggère, tout comme observé chez des sujets adultes, que la CSR influence à la fois la sélection de la réponse et sa programmation/exécution.

Stimulus-Response Compatibility, effect of irrelevant perceived distance: a developmental study.

Richez, A., Olivier, G., & Coello, Y.

Abstract

In the field of spatial perception the Stimulus Response Compatibility (SRC), has shown a great heuristic value. Priming effects were found in adults to be elicited by the non relevant orientation of the stimulus or distance. Little is known however about the developmental trajectory of such effects. We proposed, in this exploratory study, to a population of 8- to 11-years olds children a visuo-motor priming task. We observed an evolution of the effect of the non-relevant stimulus distance through age. The youngest children were not affected by the SRC and progressively start to exhibit a classical SRC advantage for congruent trials. The oldest children, as adults in a comparable task, present indicators of an SRC influence on both the response selection and response programming stages.

Introduction

It appears now clearly that the perception and action system share strong links and are structurally and functionally co-dependent (Hommel, Müsseler, Ascherslberg, 2001 ; Chemero, 2003; Coello & Delevoye-Turell, 2007). A wealth of data has now clearly shown these links in adult population. The developmental psychology literature has also very early emphasized the importance of the interaction between perception and action systems to the ontogenetic development of cognitive ability (Piaget & Inhelder, 1969 ; Wallon, 1945). Indeed in this field one may not ignore the work of Piaget or Wallon that had both clearly

stated of the necessary role of acting in the environment and getting sensorimotor feedback about those actions in the development of intelligence (Piaget & Inhelder, 1969; Wallon, 1945). It is also rather obvious that important quantitative and qualitative changes take place during the ontogenesis, with for instance the structural maturation of the brain and the body. According to us, the 2 main issues of developmental studies are to show when these changes occur and to identify their nature. As infants and children grow-up the processing of perceptual and sensori-motor information also change, but these change cannot be entirely explain as a function of brain maturation alone. Indeed, most developmental models identified several stages of development to account for qualitative differences in the way perception and action systems interact.

In this study we'll emphasize on one particular critical period of perceptual and motor reorganization occurring between 8- and 10-years. Empirical studies in several different fields indeed showed evidence of such a critical period during this very age span. For instance a stage is identified in postural control around the age of 8-years (Assaiante & Amblard, 1995). Eight-years-old children behave in a different way of younger children and of adolescents and adults. An evolution has also been observed in motor planning and execution also qualitatively during this period of 8-to over 10-years of age. During this period children produce type of error that are not committed by younger ones in task with a high or low level of motor constraints such as writing (Meulenbroek & Van Galen, 1988) or just pushing a lever (Bard, Hay & Fleury, 1990). It is also at the age of 10-years that children exhibit the end-state-comfort-effect whereas 8-years-olds children do not (Adalbjornsson, Fischman & Rudisill, 2008; Thibaut & Toussaint, 2010). To explain the mechanism of the developmental change occurring during this particular critical period one may relate these results with another interesting observation mad by Gori and colleagues (Gori, Del Viva, Sandini & Burr, 2008). She has showed that visuo-haptic integration for perceptual judgement is not observed

in 5- and 6-year-old children, they rather exhibit a clear dominance of one modality upon the other. On the other hand at 10-years they show a pattern a statistically optimal integration which is also observed in adults (Ernst & Banks, 2002). Between these 2, she observed evidences of reorganization with children's performance that were not marked by either of the pattern of younger children nor of the older ones. This capacity to relate sensori-motor and visual information appeared to be a major determinant of the qualitative change observed during this period of age. It could be described as an example of representational redescription (Karmiloff-Smith, 1996): implicit knowledge and representations of environment properties that are originally restrained to specific treatments are progressively linked to other sources of information and translated into more explicit formats, so as to be available in other contexts. The object of the representation do not changed but is rather complexified and enriched.

As this visuo-motor reorganisation appeared to be spread along a large span of abilities implying the integration of visual and sensorimotor information, we wondered if it could be observed with another paradigm, often used to assess the perception-action links: the Stimulus-Response Compatibility (SRC). SRC effect are characterized by better performance (in terms of errors and of Reaction Times) when the stimulus and the response feature are congruent than when they are not, the clearer example being the classic Simon effect (Simon & Rudell, 1967 ; Simon & Small, 1969). This paradigm appeared as a valuable tool to identify these links and to explain the nature of the processes involved (Hommel, 2011 ; Buetti & Kerzel, 2009). Indeed, empirical data on SRC tasks suggested that the perception-action links are not mediating through a unique mechanism. The translation between the 2 sides of this complex system may not be a holistic process but appears to depend on the nature of the different feature perceived from a stimulus and of a particular response and their respective coding (Kornblum, 1994 ; Eimer, Hommel & Prinz, 1995).

Both of the above-mentioned authors suggest the existence of 2 distinct routes from the stimulus to the response, a direct and an indirect one. The first one, the direct route, describes an automatic activation of the response if stimulus and response features overlap. The second one, the indirect route, links S and R in an arbitrary fashion (via experimental instructions). Hommel and Colleagues (Hommel et al., 2001) proposed for instance that the overlap between the 2 codes happens in a common coding system if a stimulus feature directly match one of the response. This common coding system is an amodal representational system constituted of various features codes (e.g left, right, high or low pitch and so on) that are bound together. For instance, if the stimulus codes are “*high*” and “*right*”, because a high pitch has been delivered in a right location, a right response would be easier and faster because it uses a feature that has already been activated by the perception of that stimulus. In that case, a left response would be delayed and prone to more error because this automatic activation produces a conflict that has to be resolved to select and to program the correct response (Hommel, 1997). SRC effects are thought to affect the response selection as well as its programming and execution (Buetti & Kerzel, 2008, 2009). It does not depend of the relevant or irrelevant nature of SR features for the task, but just of the presence of an overlap between the 2 (Kornblum, 1994).

We thus chose to implement a SRC task in a population of children from 8-years to over 11-years of age to catch the developmental changes during the whole critical period, and discuss the nature of the processes involved. We expected to observe a change in the SRC effect between across age, with a gradual apparition of the classical pattern of advantage for congruent situation relatively to incongruent ones for the oldest children. This evolution should be observed both in the response selection stage, assessed with the Reaction Time (RT) measurement and during the response programming and execution stages, assessed with Movement Time (MT) of children’s response movement. We designed an experiment similar

to the implementation of SRC paradigm proposed by Olivier (2006). We manipulate the compatibility of the perceived distance of stimuli and response movements (the irrelevant feature) during a simple perceptual task of color discrimination (the relevant feature). Thus the interfering (irrelevant) feature of the displayed stimuli would not facilitate per se any of the responses as it could have been the case in some example of the literature (Parsons & Fox, 1998; Tucker & Ellis, 1998; 2001).

Methods

Participants

A total of 163 children (age range 8 years, 1 month to 12 years, 3 months; $M = 10$ years, $SD = 1$ year) were recruited from French public elementary schools (grades 4 to 7). The population was then divided into 4 groups, according to participant's age: 8-years-old ($n = 33$; $M =$ age 8 years 8 months, $SD = 3$ months), 9-years-old ($n = 59$; $M = 9$ years 6 months, $SD = 3$ months), 10-years-old ($n = 36$; $M = 10$ years 6 months, $SD = 3$ months), 11-years-old ($n = 35$; $M = 11$ years 6 months, $SD = 4$ months).

During the recruitment, consents were obtained from the French National Education Services as well as from the children and their parents. Though practical information was provided, none of the children was informed prior to the experimental session about the aim of the study. Full explanations were however given at the end of the experiment and results were shown to children. None of the participants had records of neurological, psychiatric history or any kind of structural or functional motor impairment. All had a normal (or corrected to normal) vision.

Apparatus and stimuli

The experimental apparatus consisted in 2 parts: a computer screen and a response device. A flat screen (22" wide, 100Hz) was placed on a table in front of the participant at a distance of approximately 50 cm. The screen was parallel to the participant's frontal plane. The response device was set on the table between the participant and the screen. It consisted of 3 hand-operated switch fixed on a 30-cm-square wooden panel. The 3 switches were placed in the participant's mid body sagittal plane. The closest switch from the participant ("starting location switch") was a flat 2-cm-square and was situated at 1 cm from the edge of the panel and could be operated by resting the finger on it. The 2 other switches were cubic (2*2*2cm), the first one was placed 10 cm away from the starting location and the second one 25 cm away. Both of them needed a precision grip to be operated.

A set of 9 colored photographs (1280*857, 300 dpi) representing a square-chessboard (30*30 cm) were used as stimuli. The photographs reproduce the visual perspective that a player would have when looking at an actual chessboard. One picture represented an empty chessboard. The others show a pawn. Each pawn was placed on one of the square of the 2 central columns. Four possible locations were designed as follow: 2 proximal locations (placed on the 3rd row) and 2 distal locations (placed on the 7th row). Half of the pawns were black and the other half were white. Four other pictures were used for the training session. They represented black and white pawns placed on a central location relatively to the other stimuli (row 5).

Procedure

Briefly informed about the sequence of the experiment, participants were invited to sit in front of the apparatus to perform a short training session following the same procedure as

the experimental session. The actual experiment started when participants were able to perform the response movement correctly and fluently without constant visual guidance.

Before the beginning of the experiment participants were allowed to adjust their chair and position to ensure that he could easily perform both manual responses. The proximal response consisted to grasp the nearest switch whereas the distal response consisted to grasp the farthest one. They performed the responses with their right hand, the left one remaining on the table in a resting position during the whole task. Half of the participants were instructed to perform a proximal response to a white stimulus and a distal response to a black stimulus. The other half received the opposite instructions. At the beginning of each trial, a pictogram was displayed to the participants to indicate that they should place their hand on the starting location. Once they did so, the photograph of the empty chessboard was displayed. After 500 ms a fixation cross appeared, it was placed on the chessboard in a location that would match the position of the starting location on the response device (at 1 cm of the bottom edge of the chessboard, along the mid-body sagittal plane). After a random period of 500-150 ms the fixation cross disappeared and the stimulus was displayed. Response had to be made as fast and accurately as possible and the stimuli remained visible until the participants gave their response. An error signal was displayed if participants anticipated their response (lift their finger before the apparition of the stimulus) or produced a wrong answer. The whole task consisted in 1 block, with 5 repetitions of the black and white, proximal and distal stimuli in a randomized order, for a total of 40 trials. All trials with error or anticipation were repeated at the end of the block as well as trials were the response time was inferior of 200 ms or superior of 1000 ms. The experimental design was as follow: $P_{16} * I_2 < R_2 * S_2 >$, with P for participants, R for manual response (proximal or distal), S for stimulus location on the chessboard (proximal or distal) and I for instruction (white pawn = proximal response or white pawn = proximal response). The computer recorded the reaction time (RT), movement time (MT) and the

response the participant gave. Reaction times were computed as the time between the display of the stimulus and the response initiation (the lift of the switch in starting location). Movement times were computed as the time between the release of the starting location switch and the press on either response switch. For both of these dependant measurements we recorded in each experimental condition the total of the 10 trials in each condition. Both stimulus display and response recording were operated using matlab R2008b (mathworks).

In order to precisely catch the temporal dynamics we wanted to use a more precise method of temporal analysis than relying on a mere measure of the central tendency (as it is usually done with the calculation of the mean and standard deviation). It is now clear that these measures may lose important information when dealing with RT and MT measures and ones may need to find a statistical method that can deal with the shapes of entire temporal distribution (Mosteller & Turkey, 1977 ; Ratcliff, 1979; Heathcote, Popiel, & Mewhart, 1991). Indeed the mundane distribution of reaction or movement time, for obvious reason, is often more shifted to the long than the short duration (a rightward asymmetry). This asymmetry is not taken into account with the normal tendency assumption of classical analysis. We thus chose the ex-Gaussian distribution to fit our temporal data with these constraints (Ratcliff, & Murdock, 1976, Lacouture & Cousineau, 2008). Moreover, we think that this procedure is also well fitted to take into account the variability associated developmental acquisitions (Immordino-Yang & Fischer, 2007 ; Rose & Fischer, 2008). The ex-Gaussian distribution is a convolution of a normal and an exponential distribution. It is described by 3 parameters: mu, sigma and tau rather than just 2. The mu and sigma parameters describe respectively the mean and standard deviation of the normal component of the distribution, reflecting thus respectively the within-subject mean performance and variability. The tau parameter represents the mean of the exponential component of the distribution, reflecting the amount of long response (a greater tau meaning a larger amount of

long response). The probability density function of the ex-Gaussian is given by the following equation:

$$f(x|\mu,\sigma,\tau) = \frac{1}{\tau} \exp\left(\frac{\mu}{\tau} + \frac{\sigma^2}{2\tau^2} - \frac{x}{\tau}\right) \Phi\left(\frac{x - \mu - \sigma^2/\tau}{\sigma}\right)$$

where Φ represents the value of the cumulative density of the Gaussian distribution.

The mean of the Ex-Gaussian distribution is

$$E(x) = \mu + \tau$$

and its variances

$$Var(x) = \sigma^2 + \tau^2$$

All the fit were done using the DISTRIB toolbox for matlab and were computing with the matlab implementation of the simplex search method (Lacouture & Cousineau, 2008). Unlike other temporal data fitting model, as for example the Ratcliff diffusion model (1979), the ex-Gaussian fit parameters cannot directly be interpreted in terms of cognitive processes. The choice was made regarding to the good fitting property of the ex-Gaussian model to temporal data and the ease to implement it regarding to the previously cited method.

Results

A 2*2*2 Analysis of Variance (ANOVA) was run on all the dependant measures with Instruction and Age Group as between-subject factor and Manual response and Stimulus location as within-subject factors.

RT

The ANOVA performed on the mu parameter of the RT revealed a significant interaction between stimulus location and manual response ($F(1, 155) = 3.95, p < .05$). Overall, when participants were presented with a proximal stimulus they gave their response faster when they had to respond grasping the proximal switch ($M = 428$ ms, $SD = 95$ ms) than when they had to grasp the distal switch ($M = 443$ ms, $SD = 103$ ms). When the participants perceived a distal stimulus, their reaction were faster when they had to grasp the distal switch ($M = 429$ ms, $SD = 97$ ms) than when they had to grasp the proximal one ($M = 435$ ms, $SD = 91$ ms). The ANOVA also revealed an interaction between these last 2 factors and age group ($F(3, 155) = 2.89, p < .05$). The pattern above-mentioned do not describe the performance of every age group. Indeed, 8-year-old group rather showed a slight advantage for incongruent ($M = 448$ ms, $SD = 92$ ms) trial in comparison with congruent ones ($M = 460$ ms, $SD = 110$ ms). Nine-year-old group did not show any meaningful pattern and their performance do not reveal any advantage for one condition upon one another. Ten-year-old group showed a slight advantage for congruent ($M = 421$ ms, $SD = 79$ ms) trials in comparison with incongruent ones ($M = 439$ ms, $SD = 93$ ms), and 11-year-old group showed the classic pattern of SRC with a clear advantage for congruent trials ($M = 425$ ms, $SD = 96$ ms) in comparison with incongruent ones ($M = 460$ ms, $SD = 111$ ms),

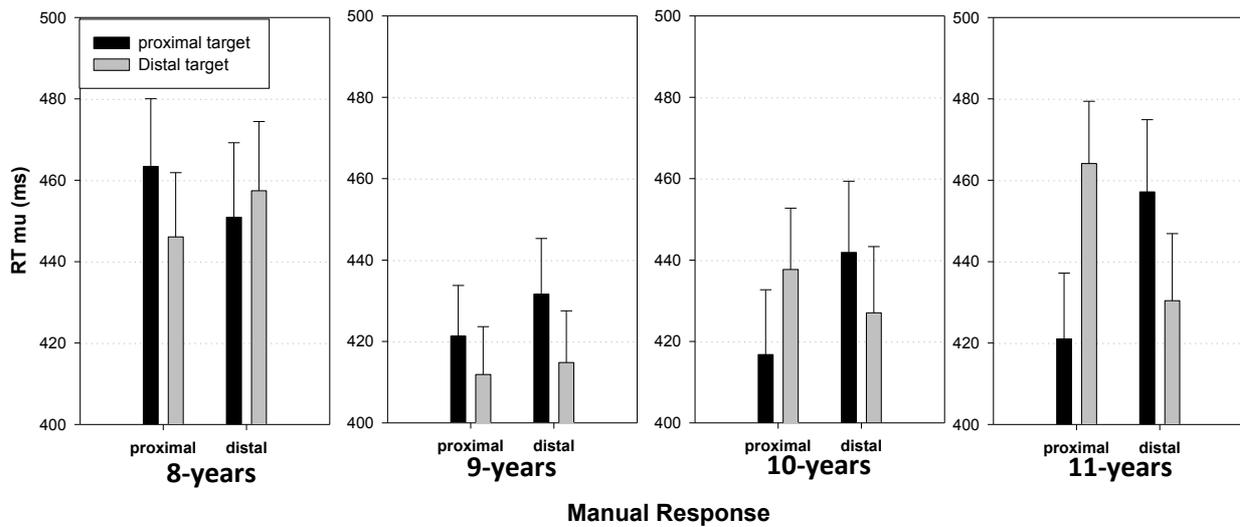


Figure 1 : SRC effect of stimulus distance for the mu parameter of the RTs. Error bars represent standard errors.

The ANOVA performed on the sigma parameter of the RT only revealed a significant interaction between stimulus location, manual response and age group ($F(3, 155) = 3.46, p = .017$). Here again we observed different pattern among the age groups. The 8-year-old group showed an advantage for incongruent trials ($M = 52$ ms, $SD = 55$ ms) in comparison the congruent ones ($M = 71$ ms, $SD = 74$ ms). The 9-and 10-year-old groups did not show any meaningful pattern, and the 11-year-old group show the classic pattern of SRC with an advantage for congruent trials ($M = 49$ ms, $SD = 46$ ms) in comparison with incongruent ones ($M = 66$ ms, $SD = 57$ ms). The ANOVA performed on the tau parameter of the RT did not reveal any significant effect.

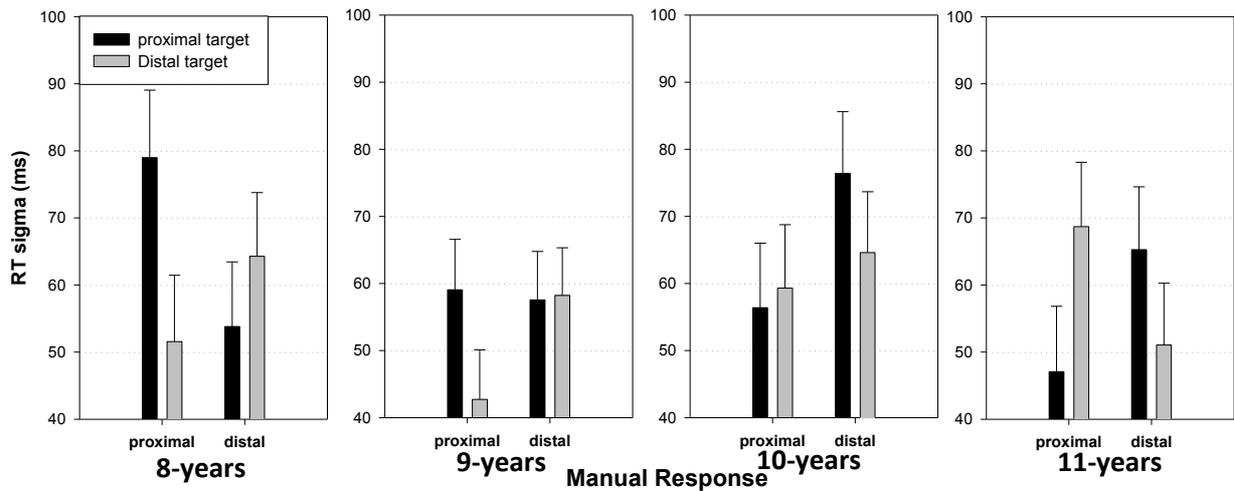


Figure 2 : SRC effect of stimulus distance for the sigma parameter of the RTs. Error bars represent standard errors.

MT

The ANOVA performed on the mu parameter of the MT only revealed main effects of both stimulus location ($F(1, 155) = 12.56, p > .001$) and manual response ($F(1, 155) = 233.91, p > .001$). Overall participant's responses were shorter when the stimulus was displayed in a proximal location ($M = 412$ ms, $SD = 108$ ms) than in a distal location ($M = 428$ ms, $SD = 123$ ms). Participant's response were shorter when they produced proximal response ($M = 378$ ms, $SD = 105$ ms) than when they produced distal response ($M = 463$ ms, $SD = 111$ ms).

The ANOVA performed on the sigma parameter of the MT revealed a main effect of stimulus location ($F(1, 155) = 4.25, p = .04$). Within-subject variability was greater when the stimulus was displayed in a proximal location ($M = 34$ ms, $SD = 39$ ms) than when it was displayed in a distal one ($M = 40$ ms, $SD = 51$ ms).

The ANOVA performed on the tau parameter of the MT revealed a significant interaction of stimulus location and manual response ($F(1, 155) = 5.43, p = .02$). When participants executed proximal responses, they produce a smaller amount of long responses if

the stimulus was displayed in a proximal location ($M = 137$ ms, $SD = 131$ ms) than if it was displayed in a distal location ($M = 148$ ms, $SD = 130$ ms). When the participant executed distal responses, they produce a smaller amount of long responses if the stimulus was displayed a distal location ($M = 127$ ms, $SD = 134$ ms) in than if it was displayed in a proximal location ($M = 149$ ms, $SD = 102$ ms). Despite the interaction of these last 2 factors and age group was not significant, post-hoc comparisons revealed that this pattern was not observed in younger children ($F(1, 155) = .0135$, $p = .71$) but is only significant in the 11-years group ($F(1, 155) = 6.58$, $p = .01$).

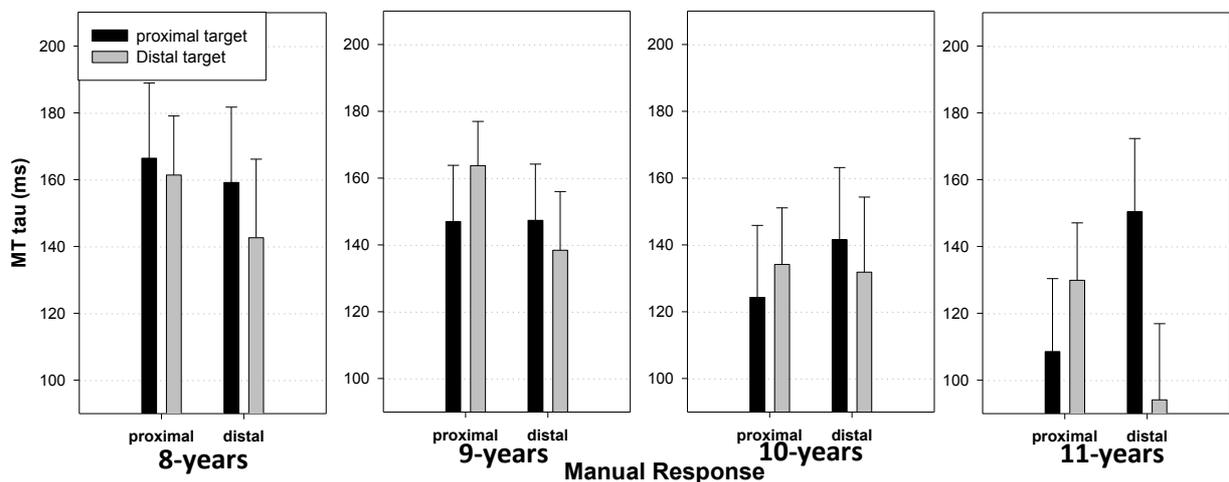


figure 3 : SRC effect of stimulus distance for the tau parameter of the MTs. Error bars represent standard errors.

Discussion

The main objective of this study was to explore the period between 8-to-10-years through a SRC task. We observed here that overall, children participants showed better performance for congruent trials than in incongruent ones. This effect is observed both for the RT (μ and σ parameter) and the MT (τ parameter). However group analysis revealed

that this pattern is greatly affected by age as only the 11-years children showed a statistically significant SRC pattern of performance. This pattern could also be observed in the 10-years group in form of a statistical trend. Older participants showed faster and less variable reaction time, and produce fewer long-term movements in congruent trial than in incongruent ones. This pattern of performance, classically observed in SRC task in adults (Tucker & Ellis, 2001 ; Olivier, 2006 ; Buetti & Kerzel, 2008), is not found in younger participants. Not only the 8- and-9-years groups did not show the SRC effect, but it also seemed that the 8-years had a trend for the opposite pattern with a slight advantage for incongruent trial in comparison to congruent ones (this was more visible for the mu parameter of the RT).

The absence of main effect of stimulus location or manual response on the RT suggested that the task difficulty and stimuli visibility were homogeneous across all the condition and for all age group. The absence of main effect of instruction on the RT also meant that no previous associations were made between the color of the pawns and the response movements. We thus think that the internal validity of the paradigm and its implementation on this population is sufficient enough to discuss the observed shift in performance and the mechanisms underlying the SRC effect.

The present findings are thus compatible with the idea of a critical period of qualitative change in the way environment are perceived in relation to sensori-motor information. The pattern observed in 11-years old children is compatible with the theory of event coding (Hommel & al, 2001) that argues that stimulus and response coding are not independent but share a common level of processing. These results are also compatible with Kornblum's dual route model (Kornblum, & al, 1990 ; Kornblum, 1994). This model postulate independent and non-serial response selection and response programming stage that could overlap in time. Effect found on RT measures may thus reflect the conflict between relevant and irrelevant

features on the response selection stage: faster response initiation and less variable RT are indeed observed for the 11-years old in congruent trials in comparison to incongruent ones.

To account on the interaction of manual response and stimulus location on the MT we refer to a modification of Kornblum's model, initially proposed by Buetti & Kerzel (2009).

In order to select and program the correct response during incongruent trials, the automatically activate motor program have to be inhibited. According to Buetti & Kerzel, this inhibition may not be an all-or-none process. The incorrect motor program activated could linger in the system and affects later motor programs. A partially inhibited motor program could thus bias the response movement of correct response in incongruent trial. The SRC effect observed in the MT measure could reflect evidence of this conflict during the response programming stage (Buetti & Kerzel, 2008, 2009).

It seemed that for younger participants these 2 routes are not yet available, or at least not fully functional, and did not provide automatic activation of a response by the mere perception of an irrelevant stimulus feature.

Referring to a common coding system, to the TEC point of view, could only be possible if children did have the capacity to translate information through different modality-specific channel, i.e to relate visual to sensori-motor information. As evoked in the introduction, Gori and colleague (2006) just pointed out that it is not until 8-to 10-years that multimodal integration become statistically optimal. One may argue that children learned to relate those different channels since birth, or even prenatally, to form their representation of the environment and the rule that apply to a body acting in it (Piaget & Inhelder, 1969). Our position is not an extreme view without any multimodal interaction until children reached 10-year (as we did observe on overall effect of stimulus location on the MT for children of all groups). We rather think that these multimodal representations are less precise and less

accurate in young children than in older children or adults because the functional maturation of integration processes is not sufficient enough. In line with this, it has been shown that the period of 9-to-10-years may be characterized by improvement in the capacities of sensori-motor integration and prediction, in motor planning and the ability to adapt to new or fickle environmental constraints (Gori & al, 2006 ; Jansen-Osman, Richter, Konczak & Kalveram, 2002 ; Thibaut & Toussaint, 2010). This critical period could thus be described through the metaphor of representational redescription proposed by Annette Karmiloff-Smith (1996).

To summarize, the present study investigate the developmental effects of conflict relevant and irrelevant stimulus feature during response selection and response programming in a classical SRC task. We observed that the RT and MT were affected by this conflict, reflecting thus both the selection and programming of response movements, but only for the 11-years-old participants. We suggest that the present results present evidence of general reorganization of the perception and sensor-motor system. This critical period leads to more efficient processes of multimodal integration after the age of 8-years and reaches its ends around 10-years.

Aknowledgements

The authos want to thanks the children that participated in that study, their parents, and the personal of the French public schools Pierre Mendès France and Léo Lagrange.

References

- Adalbjornsson, C, F., Fischman, M, G., & Rudisill, M, E. (2008). The end state comfort effect in young children, *Research Quarterly for exercise and sport*, 79 (1), 36-41.
- Adalbjornsson, C, F., Fischman, M, G., & Rudisill, M, E. (2008). The end state comfort effect in young children. *Research Quarterly for exercise and sport*, 79 (1), 36-41.

- Assaiante C, & Amblard B. (1995). An ontogenetic model for the sensorimotor organization of balance control in humans, *Human Movement Science*, 14, 13-43.
- Bard, C., Hay, L., & Fleury, M. (1990). Timing accuracy of visually directed movement in children: control of direction and amplitude components, *Journal of Experimental Child Psychology*, 50, 102-118.
- Buetti, S., & Kerzel, D. (2008). Time course of the Simon effect in pointing movements for horizontal, vertical, and acoustic stimuli: evidence for a common mechanism, *Acta Psychologica*, 129, 420-428.
- Buetti, S., & Kerzel, D. (2009). Conflicts during response selection affect response programming : reaction toward the source of stimulation, *journal of experimental psychology: Human perception and performance*, 35, 816-834.
- Chemero, A. (2003). An outline of a theory of affordances, *Ecological Psychology*, 15, 181-195.
- Coello, Y., Delevoeye-Turrell, Y. (2007). Embodiement, space categorisation and action, *Consciousness and Cognition*, 16, 667-683.
- Eimer, M., Hommel, B., & Prinz, W. (1995). S-R compatibility and response selection, *Acta Psychologica*, 90, 301-313.
- Ernst, M. O., & Banks, M. S. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion, *Nature*, 415, 429-433.
- Gori, M., Del Viva, M., Sandini, G., & Burr, D. C. (2008). Young children do not integrate visual and haptic form information, *Current Biology*, 18, 694-698.
- Heathcote, A., Popiel, S. J., & Mewhart, D. J. K. (1991). Analysis of response time distributions: An example using the Stroop task. *Psychological Bulletin*, 109, 340-347.
- Hommel, B. (1997). Toward an action-concept model of stimulus-response compatibility. In B. Hommel & W. Prinz (Eds.), *Theoretical issues in stimulus-response compatibility* (pp. 281-320). Amsterdam: North-Holland.
- Hommel, B. (2011). The Simon effect as tool and heuristic, *Acta Psychologica*, 136, 189-202.
- Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G., & Prinz, W. (2001). The theory of event coding (TEC): A framework for perception and action planning, *Behavioral and Brain Sciences*, 24, 849-878.
- Immordino-Yang, M. H., & Fischer, K. W. (2007). Dynamic development of hemispheric biases. . Coch, Fischer, K. W., & Dawson, G. (Eds.), *Human behavior, learning and the developing brain-typical development* (pp. 3-29). New York: The Guilford Press.
- Jansen-Osman, P., Richter, S., Konczak, J., & Kalveram, K. T. (2002). Force adaptation transfers to untrained workspace regions in children: evidence for developing inverse dynamic motor models, *Experimental Brain Research*, 142, 212-220.

- Karmiloff-Smith, A. (1996). *Beyond Modularity: A Developmental Perspective on Cognitive Science*, Cambridge, MA: MIT Press.
- Kornblum, S. (1994). The way irrelevant dimensions are processed depends on what they overlap with: The case of Stroop- and Simon-like stimuli. *Psychological Research*, 56, 130-135.
- Kornblum, S., Hasbroucq, T., & Osman, A. (1990). Dimensional overlap: Cognitive basis of stimulus–response compatibility: A model and taxonomy. *Psychological Review*, 97, 253-270.
- Lacouture, Y., & Cousineau, D. (2008). How to use Matlab to fit the ex-Gaussian and other probability functions to a distribution of response times, *Tutorials for quantitative methods in psychology*, 4, 35-45.
- Meulenbroek, R. G., & Van Gallen, G. P. (1988). The acquisition of skill handwriting: Discontinuous trends in kinematics variables, In A. M. Colley & J. R. Beechs Eds., *Cognition and Action in Skill Behavior*, pp273-281. Amsterdam: North Holland.
- Mosteller, F., & Turkey, J. W. (1977), *Data Analysis and Regression*, Indianapolis: Addison-Wesley.
- Olivier, G. (2006). Visuomotor riming of a manual reaching movement during a perceptual decision task, *brain research*, 1124, 81-85.
- Parsons, L. M., Fox, P. T. (1998). The neural basis of implicit movement used in recognizing hand shape, *Cognitive Neuropsychology*, 15, 583-615.
- Piaget, J & Inhelder, B. (1969). *The psychology of the child*, New York (NY): Basic Books.
- Ratcliff, R. (1979). Group reaction time distributions and an analysis of distribution statistics. *Psychological Bulletin*, 86, 446-461.
- Ratcliff, R., & Murdock, B. B., Jr. (1976). Retrieval process in recognition memory. *Journal of experimental psychology: learning memory and cognition*, 16, 163-178.
- Rose, L. T., & Fischer, K. W. (2008). Dynamic systems theory. In R. A. Shweder (Ed.), *Chicago companion to the child*. Chicago: University of Chicago Press.
- Simon, J. R., & Rudell, A. P. (1967). Auditory S–R compatibility: The effect of an irrelevant cue on information processing. *Journal of Applied Psychology*, 51, 300-304.
- Simon, J. R., & Small, A. M., Jr. (1969). Processing auditory information: Interference from an irrelevant cue. *Journal of Applied Psychology*, 53, 433-435.
- Thibault, J. P., & Toussaint, L. (2009). Developing motor planning over ages. *Journal of Experimental Child Psychology*, 105, 116-129.
- Tucker, M., & Ellis, R. (1998). On the relation between seen object and components of potential actions, *journal of experimental psychology: human perception and performance*, 24, 830-846.

Tucker, M., & Ellis, R. (2001). The potentiation of grasp types during visual object categorization. *Visual Cognition*, 8, 769–800.

Wallon, H. (1945). *Les origines de la pensée chez l'enfant*, Paris : PUF.

IV. 5. Perspective de recherche: protocole de recherche clinique Compétence motrice et développement ontogénétique (C.O.M.O.D.O)

IV. 5.1 Objectif du projet

Les différents protocoles mis en place au cours de ce travail de thèse ont permis de rassembler un certain nombre de données sur le développement normal de la perception spatiale. Nous avons également évoqué dans la première partie de ce document l'intérêt que peut présenter l'étude de populations pathologiques dans la compréhension des mécanismes cognitifs. Cet intérêt est également présent en psychologie du développement avec l'étude des trajectoires déviant du développement typique.

C'est dans ce cadre que nous avons mis en place un protocole de recherche clinique, actuellement encore en cours, visant à étudier la problématique de la perception spatiale chez une population d'enfant et d'adolescent présentant des troubles moteurs fonctionnels.

Ce protocole exploratoire consiste en une série de protocoles expérimentaux associés à la récolte de données psychométriques. En évaluant les performances d'une telle population d'enfants lors de protocoles expérimentaux et en appariant ces données avec des enfants au développement typique, nous pensons obtenir des données pertinentes sur les relations entre les représentations spatiales et les compétences motrices.

IV. 5. 2. Descriptif du projet

Population cible

Le protocole COMODO est orienté vers le recrutement d'une population d'enfants présentant des troubles moteurs fonctionnels d'origine développementale, i.e. un déficit dans les réalisations motrices. Ces troubles sont objectivés par le bilan de plusieurs spécialistes (pédiatre, neuropsychologue, ergothérapeute et psychomotricien), mais ne correspondent pas nécessairement à un diagnostic de dyspraxie "*officiellement*" posé. La présence de troubles attentionnels et/ou cognitifs modérés à sévère est un critère d'exclusion. Les enfants ainsi recrutés présentent donc un profil de performances déficitaire dans des tâches praxiques, ou de motricité fine par exemple, mais en l'absence de déficit perceptif ou de handicap moteur de type infirmité motrice cérébrale.

Recrutement et passation

Le recrutement des enfants est effectué au sein du centre de référence des troubles des apprentissages (CERTA) de l'hôpital Lénval à Nice. La sélection des participants potentiels est faite au sein des patients du CERTA dans le cadre des activités du service de bilan, d'orientation et de suivi. Les données psychométriques sont obtenues par les membres du CERTA. Une fois sélection des participants effectuée, et les consentements des parents et des enfants obtenus, les passations sont réalisées soit dans les locaux du CERTA soit au domicile.

tâches proposées

Le protocole COMODO consiste en une série de 4 tâches expérimentales simples liées à la manipulation de représentation motrice et spatiale. La première tâche consiste en une mesure du seuil d'atteignabilité, selon un design similaire à celui de l'étude 2. La seconde est une mesure de l'effet de CSR, similaire à l'étude 4. La troisième est une tâche d'imagerie motrice, et la quatrième, une mesure de l'effet de confort de l'état terminal du mouvement ("*end-state-comfort-effect*").

déroulement du projet

Le protocole COMODO est actuellement encore en cours. Les spécificités de recrutement de la population cible, de même que le refus de participer au protocole d'une grande partie des familles contactées imposent un rythme de recrutement très lent. Le nombre de passations actuellement réalisées ne permet pas de présenter des données pertinentes associées à ce projet. Toutefois, pour une description plus détaillée du protocole et des tâches proposées, nous renvoyons le lecteur à l'annexe A.

Partie 3: Conclusion

Chapitre V. Discussion

The trouble with having an open mind, of course, is that people will insist on coming along and trying to put things in it.

Terry Pratchett

V. 1. Résumé des principaux résultats obtenus

Dans notre première étude, nous avons observé un important effet de l'âge sur la perception des limites de l'espace d'action entre 7 et 13 ans. Les données mettent en évidence de manière claire 2 patrons de résultats en fonction de l'âge des enfants. Chez les enfants les plus jeunes (jusqu'à l'âge de 8 ans environ) nous avons observé une surestimation massive des limites de l'espace d'action, accompagnée d'une forte influence des contraintes de la tâche et du contexte de présentation des stimuli, comme l'excentricité de la cible par rapport à l'effecteur utilisé pour réaliser le jugement ou la direction du mouvement de la cible. À partir de 9 ans, nous avons observé une réduction à la fois de cette surestimation ainsi que de l'effet des contraintes de la tâche. Les enfants de 10 à 13 ans présentent un patron de résultats beaucoup plus proche de celui qui est classiquement observé chez des adultes dans ce type de tâche que de ceux d'enfant plus jeune (Carello & al, 1989 ; Rochat & Wraga, 1997). À partir de 10 ans, les jugements d'atteignabilité sont directement corrélés à leurs capacités d'action réelles. Les résultats de la seconde étude ont confirmé cet effet du développement sur la perception des limites de l'espace d'action. Cette étude comportait également des effectifs et un nombre d'essais plus importants. Toutefois, dans cette seconde expérience les enfants de 9

ans apparaissent comme étant entre les 2 patrons de résultats décrits plus haut puisque s'ils présentent une surestimation plus faible que les enfants de 8 ans, celle-ci est tout de même plus importante que la surestimation observée pour des enfants de 10 ans et plus. Ces résultats semblent confirmer l'existence d'une période de réorganisation qualitative des jugements d'atteignabilité. Cette réorganisation marque le début d'un nouveau cycle de développement et semble intervenir aux alentours de la 9^e année.

La seconde étude montre également une variation concomitante des capacités à produire une simulation explicite de gestes d'atteinte. Nous observons également que malgré une amélioration significative de leurs performances au cours du développement, les performances des enfants de 12 ans ne sont pas comparables à un groupe d'adulte dans une tâche similaire.

Dans notre cinquième étude, nous avons exploré les effets de compatibilité stimulus-réponse chez des enfants de 8 à 12 ans, ainsi que chez une population d'adulte. Nous avons mis en évidence un effet de compatibilité de la localisation spatiale non pertinente d'une cible sur la préparation et l'exécution d'une réponse motrice ultérieure. L'effet de compétition entre les dimensions pertinente et non pertinente dans une tâche de catégorisation perceptive évolue de manière importante avec l'âge. Les enfants de 11 ans présentent un patron de CSR classique, avec une facilitation de la sélection (effet sur les TR) et de la programmation de la réponse (effet sur les TM) dans les situations congruentes, et une interférence dans les situations incongruentes. Ce patron de réponse est celui observé chez les adultes dans ce type de tâche. Nous avons observé que ce patron de résultats n'est pas retrouvé chez les enfants plus jeunes. En effet à 8 ans, les enfants montrent une tendance inverse avec un léger avantage pour les situations incongruentes, à 9 ans les performances les enfants ne révèlent pas de tendance particulière et à 10 ans on observe que l'avantage pour les situations congruentes commence à apparaître, sous forme de tendance, avant de s'installer

significativement à 11 ans. À notre connaissance, cette étude est la première à montrer un effet du développement sur la compatibilité stimulus-réponse.

Nous avons également mis en évidence, dans les études 3 et 4, des données nouvelles sur les processus de la CSR et sa dynamique temporelle chez l'adulte. Les expériences de cette étude ont émergé des prétests lors de l'élaboration de l'étude 4, et de la mise en évidence d'effet de CSR de distance à la fois sur les RT et le TM. Les données obtenues ont permis de préciser l'influence de la CSR sur les processus de sélection et de programmation de la réponse, ainsi que les marqueurs de cette influence. Ceci a permis de renforcer l'interprétation des données de l'étude 5. Nous ne discuterons toutefois pas plus avant dans ce manuscrit des données spécifiques à l'adulte des études 3 et 4, et nous renvoyons le lecteur à une lecture approfondie de l'article concernant cette étude.

V. 2. Le jugement d'atteignabilité

V. 2.1. Mise en évidence d'une trajectoire développementale

Apport de nos données par rapport à la littérature

Le principal apport des études menées au cours de cette thèse est l'observation d'un effet développemental dans les jugements d'atteignabilité des enfants entre 7 et 13 ans. Cet effet est robuste, car nous avons observé le même patron de performances lors de 2 études menées avec des méthodologies différentes (respectivement la méthode des limites pour la première expérience et la méthode des stimuli constants pour la seconde). À notre connaissance, aucune étude antérieure n'a mis en évidence, d'autres effets de l'âge sur la perception des limites de l'espace d'action, qu'une simple différence enfant-adultes. Une expérience ayant évalué les jugements d'atteignabilité chez les enfants a montré que des

jugements calibrés sur les propriétés anthropométriques étaient observables dès 3 à 5 ans (Rochat, 1995). Cette étude montre également que les jugements des enfants sont également marqués par un biais de surestimation, sans toutefois, apporter de réelle réponse sur la période d'intérêt que nous avons définie (cf II. 3.3. pour une explication plus détaillée). D'autres ont montré que les performances des enfants étaient marquées par un biais de surestimation dans leurs jugements plus important que chez les adultes (Gabbard, Cordova, & Ammar, 2007 ; Gabbard, Cacola, & Cordova, 2009 ; Gabbard, Cordova, & Lee, 2009).

Nos expériences apportent donc des résultats pouvant apparaître de prime abord comme contradictoires avec la littérature en ce domaine. Pour tenter d'expliquer ces différences, nous mettons principalement en avant des différences d'ordre méthodologiques avec les travaux antérieurs. Pour des raisons pratiques, nous avons choisi, tout au long de cette thèse, d'organiser nos expérimentations en utilisant des groupes longitudinaux. Toutefois nous avons choisi de réaliser nos groupes d'âge avec une amplitude de 12 mois maximum dans chaque groupe, ceci pour évaluer une éventuelle tendance développementale de plus manière fine. En effet, certaines études chez les enfants de 5 à 11 ans, ont eu tendance à grouper les enfants selon des tranches d'âges 2 à 3 fois plus importantes, et/ou avec un découpage peu consistant d'une étude à l'autre (Gabbard, Cordova, & Ammar, 2007 ; Gabbard, Cacola, & Cordova, 2009 ; Gabbard, Cordova, & Lee, 2009). Ces groupements, plus grossiers, des enfants selon de larges tranches d'âge limitent, à notre sens, les conclusions pouvant être apportées sur des données soutenant une hypothèse nulle. De plus, nous pouvons également relever une autre différence majeure entre nos propres études de celles menées par l'équipe de Carl Gabbard, et dans une moindre mesure celles réalisées par Philippe Rochat, est la méthode de mesure de seuil utilisée. En effet, lors de notre 2^e étude, nous avons choisi d'implémenter chez les enfants la méthode psychophysique des stimuli constants. Cette méthode est certes plus longue à mettre en place, et plus fastidieuse pour les sujets, mais permet une mesure fine

et précise du seuil perçue d'atteignabilité via la construction de la fonction psychométrique de chaque sujet. À notre sens le protocole, utilisé de manière répétée par l'équipe de Gabbard, ainsi que les techniques d'analyse utilisées ne constituent par une mesure fiable du seuil d'atteignabilité. Pour ces raisons ces résultats ne peuvent pas, à notre avis, servir à rendre compte de la présence d'un biais de surestimation chez les enfants, ou supporter une interprétation en termes de comparaison de ces mêmes biais. Il nous semble donc difficile de juger, de la présence ou de l'absence, de différences liées à l'âge dans les jugements d'atteignabilité sur la base unique des interprétations de ces auteurs, qui bénéficient pourtant d'une forte visibilité dans le cadre d'une revue de la littérature dans le domaine. Comme cela a été évoqué précédemment (cf II. 3.3.), une analyse approfondie des données recueillies par l'équipe de Carl Gabbard, semble au contraire faire apparaître des résultats très similaires à ceux que nous avons recueillis. L'étude des patrons de performance montre en effet d'importantes différences qualitatives, non seulement entre les adultes et les enfants, mais également entre les groupes d'enfants entre eux. Ces différences semblent marquer le même passage d'un cycle de développement à un autre, les âges d'apparitions étant en effet très similaires.

Changements observés entre 8 et 10 ans

L'effet de l'âge que nous avons observé est caractérisé, au niveau quantitatif, par un changement abrupt dans les performances des jugements d'atteignabilité entre 8 et 10 ans. Cette discontinuité marque une période de passage entre 2 patrons de performance chez les enfants au développement normal. Les enfants avant cette période (7-8 ans) présentent un biais de surestimation très important lorsqu'ils doivent juger des limites de leur espace d'action. Les jugements que donnent les enfants à cet âge sont surestimés d'environ 20% par

rapport à la distance réellement atteignable par les sujets. Aux alentours de 9 ans, les performances évoluent vers un 2^e patron beaucoup plus proche de celui observé chez les adultes dans ce type de tâche. À partir de 10 ans, les estimations faites par les enfants sont en effet plus proches de leurs capacités d'actions réelles.

C'est à ce niveau que l'on peut s'intéresser aux différences entre les 2 études. Les conclusions générales des données des 2 études sont congruentes entre elles. Les différences observées, en termes de temporalité dans les changements, permet selon nous de souligner les problématiques de la variabilité inter- et intra-individuelle, et ce particulièrement dans des protocoles transversaux. Toutefois, le modèle de Fischer ne prédit pas une temporalité fixe et absolue. Au contraire, Fischer insiste justement sur la nature fonctionnelle des acquisitions développementales et l'importance de la variabilité individuelle. Cette variabilité, de même que les discontinuités développementales, devient un véritable marqueur de changements développementaux.

La discontinuité mise en évidence dans nos études marque également une différence entre les 2 groupes d'âge, sur les effets des informations de contexte, et celui des propriétés intrinsèques de la cible. Nous avons observé par exemple que les effets d'excentricité de la cible, de direction de son déplacement, ou de sa position relative dans la distribution de l'ensemble du set, affectent de manière plus importante les enfants les plus jeunes que les plus âgés.

Ces différents effets semblent donc indiquer que les changements observés dans les performances des enfants ne sont pas uniquement de nature qualitative. Ces variations dans les jugements ne semblent pas renvoyer uniquement à une maturation progressive des capacités de jugements des limites de l'espace d'action avec l'âge, liées par exemple à une simple augmentation des capacités de perception des distances. Les discontinuités observées

dans ces expériences nous amènent à suggérer un véritable changement qualitatif dans la nature des processus et des représentations impliqués dans la réalisation de cette tâche.

V. 2.2. Évolution de la perception de l'espace péripersonnel

Comme nous l'avons précédemment abordé (cf partie II), la perception des limites de l'espace d'action est basée sur une intégration de représentations visuelles sur la distance des cibles et de représentations sensori-motrices sur le corps et ses capacités d'action. En l'absence de troubles perceptifs chez nos sujets, nous pouvons considérer que les représentations visuelles sur la distance de la cible sont correctement construites. Dans ces études, les enfants les plus jeunes disposent en effet, à la fois d'un système visuel mature, au niveau central et périphérique, et d'une expérience du monde visuel très importante. Il semble donc raisonnable de penser que les modifications observées dans les jugements d'atteignabilité ne peuvent être expliquées sur la base unique de modifications équivalentes dans le fonctionnement sensoriel et perceptif des enfants.

La mise en place de représentations internes du corps et de ses capacités d'action, comme nous l'avons présentée dans le chapitre III, repose principalement sur l'intégration d'informations multimodales. À l'inverse du système visuel, le processus d'intégration multisensoriel évolue de manière importante dans la période d'âge que nous avons observée. Il a par exemple été montré que la capacité d'intégrer les informations visuelles et haptiques de manière statistiquement optimale, n'était installée chez les enfants qu'à partir de l'âge de 10 ans (Gori, Del Viva, Sandini & Burr, 2008). Les enfants entre 8 et 10 ans montrent des performances d'intégration visuo-haptiques témoignant d'une réorganisation des processus d'intégration sensorielle à cette période. De manière similaire, les processus d'intégration unimodaux subissent également d'importants changements. Un profil de développement

compatible avec l'idée d'une réorganisation très générale entre 8 et 10 ans est ainsi observé (Nardini, Bedford & Mareschal, 2010 ; Nardini, Jones, Bedford & Braddick, 2008). C'est également à cet âge que les différentes structures des lobes frontal et préfrontal atteindraient un pic de maturation, notamment par le recrutement massif des processus d'élagage synaptique et de myélinisation axonale cortico-corticale dans ces régions, mais également au niveau des structures pariétales (Bourgeois, Goldman-Rakic & Rakic, 1994 ; Rakic, Bourgeois, & Goldman-Rakic, 1994). Cette période marque une frontière entre 2 cycles de développement comportemental, mais également au niveau neurobiologique (Immordino-Yang & Fischer, 2007). Ce cycle particulier concernerait pour la perception spatiale, à la mise en place de processus d'intégrations entre les informations perceptives et motrices au sein des représentations du schéma corporel et des modèles internes de prédiction de l'action.

La maturation fonctionnelle, et les changements observés dans les processus et les structures précurseurs des jugements d'atteignabilité, doivent donc à notre sens être mis en relation avec les performances dans ce type de tâches des enfants que nous avons observés. Les représentations motrices élaborées sont plus précises et plus flexibles après la période critique de maturation. Elles permettent à l'enfant de prendre en compte des contraintes de plus en plus importantes dans la réalisation des jugements sur des actions potentielles. Ses capacités d'intégration uni- et multi-modal sont également plus fines et plus précises, lui permettant d'effectuer des jugements et des simulations mentales eux aussi plus précis, mais également de s'adapter plus rapidement à un environnement dynamique ou à des situations de perception de la cible inhabituelle.

V. 3. Les représentations motrices

V. 3.1. Le codage spatial des objets et des actions

Comme présentés de manière détaillée dans le chapitre 3, les paradigmes de compatibilité stimulus-réponse constituent une méthode pertinente d'évaluation des liens entre la perception d'une cible visuelle et l'organisation d'une réponse motrice. La théorie du codage événementiel postule que la perception d'une cible peut activer le code d'une réponse motrice au travers d'un système commun de représentations (Hommel, 1995 ; Hommel, Müsseler, Aschersleben, & Prinz, 2001). Cette activation est automatique lorsque les propriétés du stimulus et de la réponse partagent un haut niveau de similarité (Kornblum, 1990 ; Hommel, 1995, 2011). Les consignes quant à elles, peuvent lier arbitrairement certaines propriétés du stimulus avec une autre réponse. Le système commun de représentation serait une zone amodale ou supramodale de communication et d'intégration entre la perception et l'action. La création et la manipulation des représentations au sein de ce système impliquent des capacités d'abstraction des propriétés des représentations perceptives, et une intégration des informations sensori-motrices.

Dans ce contexte, l'absence d'effet de facilitation et d'interférence de la localisation spatiale des cibles sur la réponse motrice chez les enfants de 8 et 9 ans, peut être interprétée de plusieurs manières. Une première hypothèse serait une incapacité, ou une difficulté, à coder les propriétés spatiales du stimulus. Toutefois, aucun des enfants testés n'a rapporté, de manière spontanée ou durant le débriefing, de difficulté à percevoir que les cibles étaient présentées dans différentes localisations spatiales. Les capacités visuospatiales des enfants de 8 et 9 ans, de même que leur système visuel central et périphérique, semblent donc capables à cet âge de coder la position spatiale de la cible. Nous proposons donc de réfuter cette hypothèse pour expliquer les résultats obtenus.

La seconde hypothèse serait une incapacité, ou des difficultés, à coder les propriétés spatiales de la réponse chez les enfants les plus jeunes. Cette hypothèse ne semble pas compatible avec l'orientation correcte des réponses motrices des enfants vers les 2 boutons de réponse durant la tâche. En effet, la phase de familiarisation avec la tâche permettait entre autres de s'assurer que les sujets étaient tous capables de réaliser les 2 gestes de réponse sans contrôle visuel constant. L'orientation adaptée des gestes vers les clés de réponse impliquait donc un codage correct de l'amplitude du geste lors de sa planification. Les mouvements d'atteinte vers les clés de réponse ne peuvent donc pas dépendre uniquement des capacités de contrôle en ligne (absence de contrôle visuel constant et latences de réponses adaptées et rapides compte tenu de l'âge). De même, l'absence de trouble moteur fonctionnel chez les enfants testés, semble indiquer qu'ils sont capables d'adapter leurs mouvements aux contraintes spatiales de l'environnement. Il est donc raisonnable de penser que les enfants de 8 et 9 ans ont accès à des capacités de codage spatial de leur réponse motrice fonctionnelle. Toutefois, un codage précis de la localisation spatiale et de l'amplitude d'une réponse motrice implique l'intégration d'informations multimodales (cf chapitre 3). Tel qu'il a été présenté précédemment, les capacités d'intégration multisensorielles des enfants de 8 ans ne sont pas pleinement matures. Il est donc possible que les représentations des propriétés spatiales des enfants de cet âge ne soient pas assez précises et/ou spécifiques pour amorcer une propriété similaire dans le code du stimulus. Il est également possible qu'à l'inverse, ces représentations soient trop générales, et se révèlent compatibles avec une trop grande variété de propriétés des stimuli, échouant donc à amorcer une réponse spécifique.

Une troisième hypothèse, serait une incapacité à relier les différents codes, du stimulus et de la réponse, au sein du système commun de représentation. Les enfants de 8 et 9 ans ne disposent peut-être pas de capacités d'abstraction suffisantes pour réaliser un codage spatial amodal des propriétés du stimulus et de la réponse. Dans ce cas, les liens entre le stimulus et

la réponse ne permettraient pas une activation automatique de la réponse par la simple perception du stimulus. De manière conceptuellement similaire, les capacités d'intégration multimodales des enfants de 8 et 9 ans ne permettent peut-être pas l'intégration des propriétés spatiales du stimulus et de la réponse au sein d'une représentation commune.

Ces 2 dernières hypothèses ne sont pas mutuellement exclusives. Elles reposent en effet sur des bases explicatives similaires : les capacités d'intégration multimodales des enfants ne sont statistiquement optimales qu'à partir de l'âge de 10 ans (Gori, Del Viva, Sandini & Burr, 2008). Les données comportementales observées dans la 4^e étude, nécessitant la mise en place et l'utilisation de représentations multimodales, rendent compte de cette évolution. En effet la discontinuité observée témoigne selon nous de la mise en place progressive d'un système de représentation commun entre la perception et l'action et de l'amélioration des capacités d'intégration multimodale au sein de ce système.

Enfin, il convient d'exposer ici les données concernant l'évolution des fonctions exécutives pendant l'enfance, notamment dans leurs dimensions de flexibilité ("switching") et d'inhibitions. Des travaux récents mettent en évidence une augmentation de ces composantes exécutives durant notre période d'intérêt (cf notamment Davidson, Amso, Anderson & Diamond, 2006 ; Crone, Bunge, Van der Molen & Ridderinkhof, 2006). Ces études montrent une évolution significative du coût attentionnel de maintien des consignes d'une tâche complexe en mémoire de travail, de l'alternance de l'une à l'autre et de l'inhibition d'une réponse dominante entre 4 et 13 ans. Il apparaît que les adolescents de 13 ans présentent des performances différentes de celles des adultes, mais il apparaît également que dès 6 ans les enfants sont tout à fait capables de mettre en place de manière adaptée de tels processus, confortant ainsi notre utilisation du paradigme de CSR dans notre population. A l'inverse de ces études, notre méthodologie (utilisation de blocs "mixtes" vs séparation des essais congruents et incongruents) ne nous permet pas facilement d'approfondir les interprétations en

termes d'évolution des fonctions exécutives. Ces différences ne nous semblent donc pas remettre en causes nos interprétations des résultats des tâches de compatibilité-interférence spatiale et gestuelle, car renvoyant à l'évaluation de processus connexes mais très différents (cf Vu & Proctor, 2004).

V. 3.2. L'imagerie motrice

La capacité à mettre en relation des représentations visuelles et motrices permet par exemple au système cognitif d'évoquer explicitement ces représentations lors de la simulation mentale d'une action. Lors de notre 2^e étude, nous avons observé un patron de résultats montrant une discontinuité dans les performances d'imagerie motrice. La fonction de croissance des performances présente une forme en U. Ce profil de développement est caractéristique d'un changement dans les processus sous-tendant cette tâche. Les données suggèrent que, durant la période d'installation des processus d'intégration multisensorielle, les capacités d'imagerie des enfants évoluent de manière importante. Cette évolution passe par une période de moindre efficacité dans les capacités d'imagerie motrice, à mesure de la mise en place de nouvelles représentations multisensorielles, plus précises et plus flexibles, leur permettant de prendre en compte les contraintes de la tâche.

Les performances des enfants dans la condition d'exécution des mouvements ne révèlent qu'une amélioration qualitative. Les temps d'exécution diminuent avec l'âge, mais les contraintes spatiales (amplitude du mouvement et largeur de la cible) sont intégrées dès 8 ans dans la réalisation effective des mouvements comme le montrent les bonnes corrélations entre temps de mouvements et l'index de difficulté des cibles. Dans la condition de mouvements imaginés à l'inverse, les données montrent une augmentation rapide après 10 ans de la corrélation entre l'index de difficultés des mouvements et les temps de mouvements à

partir d'un niveau de base assez bas. Cette augmentation des corrélations renvoie à l'intégration progressive des contraintes de la tâche les représentations dynamiques de l'imagerie motrice. L'augmentation rapide des performances à partir de 10 ans suggère qu'après la mise en place de capacités d'intégration multimodale adaptées, les enfants deviennent capables de relier efficacement les contraintes de la tâche (perçues visuellement) à des représentations motrices internes afin de simuler explicitement une action. Ce profil développemental est donc cohérent avec la mise en évidence de périodes de grandes réorganisations visuomotrices entre 8 et 10 ans, en parallèle d'une amélioration importante des capacités d'intégration multimodale et, d'une maturation fonctionnelle des processus d'intégration multisensorielle dans les domaines des relations entre informations visuelles et motrices.

V. 4. Intégration des résultats avec le modèle des compétences dynamiques

Résumé du modèle

Ce modèle décrit de manière plus exhaustive dans le chapitre I fait l'hypothèse de l'émergence progressive de systèmes de contrôle de haut niveau durant le développement (compétences dynamiques). Ces compétences sont issues de la coordination de compétences et de systèmes précédemment maîtrisés par l'enfant. À chaque niveau de développement, la coordination progressive des différentes composantes est responsable de l'apparition de discontinuités dans les performances comportementales et les courbes de développement cérébral (Immordino-yang & Fischer, 2007). Les auteurs font l'hypothèse que ces discontinuités marquent la création de nouveaux réseaux neuronaux dans le cerveau et la complexification des réseaux existant, pour soutenir ces nouveaux systèmes de contrôle. À l'inverse de la plupart des modèles développementaux, le modèle des compétences

dynamiques ne conçoit pas l'ontogenèse comme une fonction linéaire, ou marquée par des stades d'acquisition. À l'instar de nombreux modèles biologiques, le développement est décrit par un ensemble de cycles, notamment au niveau de la croissance des connexions nerveuses, dont l'enchaînement et la mise en place dépendent de l'ensemble des facteurs constituant les compétences dynamiques (corporels, environnementaux, perceptifs....).

La période critique entre 8 et 10 ans

Les différentes études, menées durant cette thèse, suggèrent que les relations entre la perception et l'action évoluent grandement au cours de la période d'intérêt que nous avons préalablement définie. Les variables que nous avons définies pour évaluer la perception des limites de l'espace d'action, l'imagerie motrice et l'évolution des effets de CSR ont été affectées de manière cohérente avec les prédictions du modèle des compétences dynamiques, et à avec une temporalité également compatible avec cette modélisation. Les patrons de performances et les courbes de croissance observées ici rendent compte d'une évolution qualitative des processus d'intégration et de mise en relation d'informations perceptives et sensorimotrices.

Nous avons déjà relié ces changements avec des données existantes de la littérature, comme : l'acquisition de capacités d'intégration multimodales statistiquement optimales (Gori, Del Viva, Sandini & Burr, 2008) ; les capacités de prédiction sensorimotrices sur les conséquences de l'action (Jansen-Osman, Richter, Konczak, & Kalveram, 2002 ; Thibault & Toussaint, 2009) ; ou encore l'évolution de la planification et l'exécution motrice en fonction des contraintes de la tâche (Thibault & Toussaint, 2009 ; Bard, Hay & Fleury, 1990 ; Meulenbroek & Van Galen, 1989). Nous pensons que ces observations, en complément des données recueillies durant ce travail de thèse, mettent en évidence une période de

réorganisations majeures dans le traitement conjoint des informations visuomotrices dans la perception spatiale. Cette réorganisation des capacités de perception spatiales et d'organisation de la motricité ne semble toutefois pas être seulement limitée à ces domaines, mais englober l'ensemble des fonctions cognitives comme le postule le modèle des compétences dynamiques (Fischer & Yan, 2002).

Liens avec les données de nos études

Les données que nous avons recueillies durant ce travail de thèse apportent un certain nombre d'arguments empiriques soutenant le modèle des compétences dynamiques. Tout d'abord, les différentes études expérimentales mettent en évidence des discontinuités de performances comportementales en fonction de l'âge. Ces discontinuités sont liées, dans ce modèle, au passage des différents étages (" *tier* ") de compétences. La période d'intérêt étudiée (entre 8 et 10 ans environ et, entre 7 ans et 12 ans révolus au plus large), correspond pour Fischer au passage du niveau 3 à 4 de représentation (Rp 3 à Rp 4). Ce 4^e niveau de représentation correspondant également au 1^{er} niveau d'abstraction (Ab 1). Le niveau Rp3 correspond à la création de systèmes coordonnant les connexions entre les différentes représentations qui sont manipulées par l'enfant à cet étage. L'enfant apprendrait à cet âge à créer des représentations de plus en plus fines et complexes et également, de plus en plus éloignées de l'environnement physique immédiat. Les enfants passent d'une période où ils sont capables de se représenter et d'organiser les représentations sur des propriétés d'un objet ou événements de l'environnement, indépendamment de la perception ou de l'action immédiate de cet événement, à une période où ils vont pouvoir s'abstraire, à terme complètement, d'une perception ou d'une action pour manipuler ces propriétés. L'acquisition de ce degré d'abstraction supplémentaire permettrait, dans le cadre de la perception spatiale,

de produire des jugements et d'organiser des comportements selon des contraintes et des paramètres dynamiques et complexes.

Les tâches que nous avons proposées aux enfants impliquent la mise en relation de représentations visuelles d'une part, et sensori-motrices d'autre part. Durant l'enfance, ils ont appris à coordonner entre elles ces différents types de représentations dans différentes tâches et différents contextes. Les tâches proposées étaient donc parfaitement réalisables pour eux, car elles offraient toutes un contexte perceptif et l'organisation d'actions réelles (par le biais de la présentation des stimuli et des réponses motrices demandées). Toutefois, certaines tâches présentaient des contraintes plus importantes que d'autres, venant limiter les performances des enfants les plus jeunes. Ainsi, dans la tâche de compatibilité stimulus-réponse, les connexions entre les systèmes de représentations des propriétés des stimuli perçus et celles des réponses ne semblent pas encore coordonnées à 8 et 9 ans. À mesure que ces systèmes de représentations se coordonnent entre eux (système de système ou « *principles* » selon les termes du modèle), ils peuvent s'influencer mutuellement. Ainsi vers 10 ans, les effets de facilitation et d'interférence de la perception du stimulus sur l'organisation de la réponse motrice commencent à apparaître, témoignant de la mise en coordination de ces systèmes de représentations préalablement non reliés. Cette coordination va également permettre de générer des représentations abstraites de certaines des propriétés de l'environnement, i.e. de parvenir à produire des représentations détachées du contexte direct de la perception ou de l'action. Dans la tâche de jugements d'atteignabilité, ce passage d'un niveau à l'autre permet aux enfants de réduire leurs erreurs constantes en donnant des jugements plus proches de leurs capacités réelles et d'intégrer dans leurs jugements d'autres types de représentations visuelles et sensori-motrices lorsque les contraintes de la tâche augmentent. Ainsi, les effets d'angle de présentation de la cible, du sens du mouvement de celle-ci, mais également de la distribution statistique des cibles, diminuent fortement lorsque

l'on compare les enfants les plus jeunes (7, 8 et 9 ans) et les plus âgés (10, 11, 12 et 13 ans). De même, la courbe en U des performances d'imagerie motrice pourrait refléter une moindre dépendance d'une perception et une action directe sur la capacité à évoquer explicitement la simulation d'une action spécifique. En 2002, Zabalia a ainsi montré dans une étude sur la rotation mentale, que la réalisation de l'action facilitait le processus imagé de mouvements et de transformations, jusqu'à l'âge de 9-10 ans. L'auteur conclut qu'à cet âge, les enfants disposent justement de capacités d'abstraction dans la pensée spatiale, qui deviennent mobiles et flexibles. Dans ce contexte, Zabalia pose l'interprétation que cette capacité d'abstraction affranchit l'enfant de la contrainte d'une action réelle dans la mise en place d'une stratégie d'imagerie motrice.

Traitement global vs traitement local

Le modèle des compétences dynamiques prédit également qu'au sein de chaque cycle de développement, une caractéristique de l'évolution des compétences est le passage d'un mode de traitement de l'information globale à un traitement local. Pour appréhender de nouvelles tâches et pour développer de nouvelles compétences, le cerveau utiliserait tout d'abord une stratégie holistique de prise d'informations (relié à un fonctionnement hémisphérique droit plus important). Cette stratégie permet de définir une stratégie concernant la résolution de la tâche, et de construire progressivement des règles de fonctionnements générales pour coordonner les différentes composantes de celles-ci avant que ces éléments ne soient intégrés dans une structure de traitement plus efficace. Ceci permet une réalisation effective de la tâche, mais permet également d'expliquer le manque de flexibilité dans les performances des enfants. À mesure que les différents niveaux d'un cycle permettent de coordonner efficacement les composantes nécessaires à la réalisation de la tâche, et que

l'expertise des enfants augmente sur une situation spécifique, le traitement se fait plus local. Ceci permet de prendre en compte des informations plus fines et de s'adapter à des variations de la tâche. Une fois la structure globale de la compétence dynamique élaborée, ce passage à un fonctionnement plus local (relié à un fonctionnement hémisphérique gauche plus important) permet une modulation plus fine de la compétence pour s'adapter à des variations paramétriques de certains de ces constituants.

Nous pensons que les données recueillies dans le cadre de ce travail de thèse mettent non seulement en évidence une période de réorganisation des processus d'intégration et de traitement des informations visuomotrices, mais apportent également un éclairage particulier sur le passage d'un traitement global à un traitement local durant cette réorganisation. Dans les tâches d'atteignabilité que nous avons proposé aux enfants, l'évolution des performances entre 8 et 10 ans peut être envisagée comme le passage d'un jugement relativement grossier d'atteignabilité, à l'intégration de multiples éléments (propriétés intrinsèques de la cible, contexte de présentation...) pour produire un jugement plus exact, mais également plus précis et flexible. L'apparition des effets de CSR durant cette période renvoie à notre sens au même phénomène. Les enfants les plus jeunes semblent traiter la tâche comme une tâche de discrimination de couleurs, dans laquelle les propriétés intrinsèques (locales) de la cible et la réponse, et leurs éventuels degrés de similarité, n'affecte que peu ou pas la sélection et la programmation de la réponse. À l'inverse, pour les enfants les plus vieux, l'installation des effets de CSR témoigne de l'intégration de ces propriétés locales dans la réalisation de la tâche et de leurs influences mutuelles au sein de ces nouveaux systèmes de représentations.

Limites du modèle

Une des caractéristiques fondamentales du modèle de Fischer, est la distinction entre un fonctionnement optimal et fonctionnel pour rendre compte de la variabilité intra-individuelle dans le développement des compétences dynamiques (Rose & Fischer, 2008). Le fonctionnement optimal, i.e. la meilleure réponse possible pour un participant selon son niveau de développement, apparaît lorsque l'individu dispose dans une tâche précise d'un contexte avec un haut niveau de support pour celle-ci. Ce haut niveau de support peut être défini comme un contexte dans lequel les participants ont le temps et les informations nécessaires pour appréhender les éléments de la tâche, d'en analyser la difficulté et d'élaborer une stratégie de résolution adaptée. À l'inverse, un contexte à faible support induit des performances fonctionnelles, i.e. un niveau de performance juste suffisant pour réaliser la tâche.

Nos designs expérimentaux n'ont pas, à priori, tenu compte de cette distinction. Nous nous sommes, en effet, focalisés sur l'adaptation de notre matériel et de nos procédures à une population d'enfants. Adaptation à la fois en termes de possibilités de réalisation, mais également en termes de temps de passation et de contraintes logistiques. Cependant, un des aspects les plus importants de la méthodologie de passation expérimentale était le soin apporté aux consignes et à leur compréhension par les participants. Celles-ci étaient construites et adaptées en fonction de l'âge des participants et, étaient répétées au cours de la passation, expliquées, et illustrées à l'aide de nombreux exemples, jusqu'à ce que leur compréhension soit claire pour chacune des tâches. Dans le cas contraire, si un participant ne montrait pas de signe évident d'une compréhension de la consigne, ses données étaient retirées de l'analyse. Nous pensons donc que dans les différentes tâches proposées aux enfants, ces consignes et leurs présentations constituaient précisément un haut niveau de support pour la réalisation de la tâche. Les performances observées des enfants correspondent, à notre avis, à leur niveau

optimal de performances pour ce type de tâche. Les courbes de croissance non linéaires observées suggèrent également que ce soit bien le cas. Les différences de performances liées à l'âge seraient donc bien liées avec le niveau de développement des enfants et le passage au cours d'un cycle, d'un niveau à un autre. Les interprétations faites en relation avec le niveau de développement nous semblent donc cohérentes.

Toutefois, en l'absence de mesure différentielle pour comparer les résultats de chaque enfant avec l'implémentation de l'évaluation des mêmes paramètres selon différents protocoles par exemple, nous ne pouvons statuer de manière définitive sur ce point. Le modèle de Fischer postule une forte dépendance au contexte, des performances, et du niveau de développement des enfants. Une solution possible serait la réalisation de vastes études longitudinales chez une importante cohorte d'enfants ainsi que, la construction de protocoles, impliquant de manière systématique, plusieurs variations sur chacune des mesures effectuées afin de pouvoir tester de manière contrôlée l'effet des variations paramétriques du niveau de support du contexte de présentation de la tâche sur les performances.

Dormir, enfin ! Je vais dormir !

Alfred de Musset (sur son lit de mort)

Partie 4 : Références bibliographiques

It is a miracle that curiosity survives formal education.

Albert Einstein

In science one tries to tell people, in such a way as to be understood by everyone, something that no one ever knew before. But in poetry, it's the exact opposite.

Paul Dirac

- A -

- Adalbjornsson, C. F., Fischman, M. G., & Rudisill, M. E. (2008). The end state comfort effect in young children. *Research Quarterly for exercise and sport*, 79 (1), 36-41.
- Anquetil, T., & Jeannerod, M. (2007). Simulated actions in the first and in the third person perspectives share common representations. *Brain Research*, 1130, 125-129.
- Ansorge, U. (2003c). Spatial Simon effects and compatibility effects induced by observed gaze direction. *Visual Cognition*, 10, 363-383.
- Arbib, M. A. (1981). Perceptual structures and distributed motor control. In V. B. Brooks (Ed.), *Handbook of Physiology – The Nervous System II. Motor Control* (pp.1449-1480). Bethesda: American Physiological Society.
- Aslin, R. N. (1981). Development of smooth pursuit in human infants. In D. F. Fisher, R. A. Monty, & J. W. Senders (Eds.), *Eye movements: Cognition and visual perception* (pp. 31–51). Hillsdale: Erlbaum.
- Assaiante C, & Amblard B. (1995). An ontogenetic model for the sensorimotor organization of balance control in humans. *Human Movement Science*, 14, 13-43.
- Atkinson, J. (2000). *The developing visual brain*. New York: Oxford university press.
- Atkinson, J. and Braddick, O. (2003) Neurobiological models of normal and abnormal visual development. In: M. De Haan, & M. Johnson (Eds.), *The Cognitive Neuroscience of Development* (pp. 43–71). Hove: Psychology Press.
- Ayres, A. J. (1972). *Sensory integration and the child*. Torrance: Western Psychological Services.

- B -

- Banks, M. S. (1980). the development of visual accommodation during early infancy. *Child development*, 51, 646-666.

- Bard, C., Hay, L., & Fleury, M. (1990). Timing accuracy of visually directed movement in children: control of direction and amplitude components. *Journal of Experimental Child Psychology*, 50, 102-118.
- Barsalou, L. W. (1999). Perceptual Symbol systems. *Behavioral and Brain Science*, 22, 555-660.
- Bays, P. M., Wolpert, D. M., & Flanagan, J. R. (2005). Perception of the consequences of self-action is temporally tuned and event driven. *Current Biology*, 15, 1125-1128.
- Bekkering, H., & Neggers, S. F. W. (2002). Visual search is modulated by action intentions. *Psychological Science*, 13 (4), 370-374.
- Berlucchi, G., & Aglioti, S. (1997). The body in the brain: neural bases of corporeal awareness. *Trends in neurosciences*, 20, 560-564.
- Bernstein, N. (1967). *The coordination and regulation of movements*. London: Pergamon.
- Bertenthal, B. I. (1996). Origins and early development of perception, action, and representation. *annual review of psychology*, 47, 431-459.
- Bertenthal, B. I., & Longo, M. R. (2007). Is there evidence of a mirror system from birth? Commentary on Lepage & Théoret, 2007. *Developmental Science*, 10, 526-529.
- Bertenthal, B. I., Proffitt, D. R., & Cutting, J. E. (1984). Infant sensitivity to figural coherence in biomechanical motions. *Journal of Experimental Child Psychology*, 37, 213-230.
- Berthoz, A. (1997). *Le sens du mouvement*. Paris: Odile Jacob.
- Berti, A., & Frassinetti, F. (2000). When far become near: remapping of space by tool use. *Journal of cognitive neuroscience*, 12(3), 415-420.
- Blake, R., & Shiffrar, M. (2007). Perception of Human Motion. *The Annual Review of Psychology*, 58, 47
- Blakemore, S. J., Wolpert, D. M., & Frith, C. D. (2000). Why can't you tickle yourself? *Neuroreport*, 11(113), 959-965.
- Bodéüs, R. (1998). *Aristote , De l'âme, traduction inédite, présentation, notes et bibliographie*. Paris: Flammarion.
- Bonifazi, S., Farnè, A., Rinaldesi, L., & Ladavàs, E. (2007). Dynamic size-change of peri-hand space through tool-use: spatial extension or shift of the multi-sensory area. *Journal of neuropsychology*, 1, 101-114.
- Bootsma, R. J., Bakker, F. C., Van Snippenberg, F. J., & Tdlohreg, C. W. (1992). The effect of anxiety on perceiving the reachability of passing objects. *Ecological Psychology*, 4(1), 1-16.
- Bourgeois, K., Kwahar, A. W., Neal, S. A., & Lockman, J. J. (2005). Infant manual exploration of objects, surfaces and their interrelations. *Infancy*, 8, 233-252.
- Bourgeois, J., & Coello, Y. (2012). Effect of visuomotor calibration and uncertainty on the perception of peripersonal space. *Attention, perception & psychophysics*, 74(6), 1268–1283.
- Bourgeois, J. P., Goldman-Rakic, P. S., Rakic, P. (1994). Synaptogenesis in the prefrontal cortex of the rhesus monkey. *Cerebral Cortex*, 4(1), 78-96.
- Bower, T. G. R., Broughton, J. M., & Moore, M. K. (1970). Infant responses to approaching objects: an indicator of response to distal variables. *Perception and Psychophysics*, 9, 193–196.

- Buetti, S., & Kerzel, D. (2008). Time course of the Simon effect in pointing movements for horizontal, vertical, and acoustic stimuli: Evidence for a common mechanism. *Acta psychologica*, 129, 420-428.
- Buetti, S., & Kerzel, D. (2009). Conflicts during response selection affect response programming : reaction toward the source of stimulation, *journal of experimental psychology: Human perception and performance*, 35, 816-834.
- Bushnell, I. W. R. (1979). Modification of the externality effect in young infants. *Journal of experimental child psychology*, 28, 211-229.
- Bushnell, I. W. R., McKenzie, B. E., Lawrence, D. A., & Connel, S. (1995). The spatial coding strategy in one-year-old infant in a locomotor search task. *Child development*, 66, 937-958.
- Braddick, O. J., Atkinson, J., French, J., & Howland, H. C. (1979). A photorefractive study of infant accommodation. *Vision research*, 19, 1319-1330.
- Braddick, O. J., Atkinson, J., & Wattam-Bell, J. (2003). Normal and anomalous development of visual motion processing: motion coherence and 'dorsal-stream vulnerability'. *Neuropsychologia*, 41, 1769-1784.
- Bronfenbrenner, U. & Morris, P. (2006). The bioecological model of human development. In W. Damon & R. M. Lerner (Vol. Eds.), *Handbook of child psychology: vol. 1. Theoretical models of human development* (6th ed. pp. 793-828). New York: John Wiley.
- Brozzoli, C., Pavani, F., Urquizar, C., Cardinali, L., & Farnè, A. (2009). Grasping actions remap peripersonal space, *Neuroreport*, 20, 913-917.
- Bronson, G. W. (1974). The postnatal growth of visual capacity. *Child development*, 45, 873-890.
- Bronson, G. W. (1982). *The scanning patterns of human infants: Implications for visual learning*. Norwood: Ablex.
- Bruner, J. S. & Klossowski, B. (1972). Visually preadapted constituents of manipulatory action. *Perception*, 1, 3-14.
- Byrnes, J. P. (2001). *Minds, brains, and education: Understanding the psychological and educational relevance of neuroscientific research*. New York: Guilford.

- C -

- Caeyenberghs, K., Tsoupas, J., Wilson, P. H., & Smits-Engelsman, B. C. M. (2009). Motor imagery in primary school children. *Developmental Neuropsychology*, 34(1), 103-121.
- Caggiano, V., Fogassi, L., Rizzolatti, G., Thier, P., Casile, A. (2009). Mirror neurons differentially encode the peripersonal and extrapersonal space of monkeys. *Science*, 324, 403-406.
- Calvo-Merino, B., Glaser, D. E., Grèzes, J., Passingham, R. E., & Haggard, P. (2005). Action observation and acquired motor skills: An fMRI study with expert dancers. *Cerebral Cortex*, 15, 1243-1249.
- Carello, C., Groszofsky, A., Reicher, F. D., Solomon, H. Y., Turvey, M. T. (1989). Visually perceiving what is reachable. *Ecological Psychology*, 4(1), 1-16.
- Carey, D. P., Hargreaves, E. L., & Goodale, M. A. (1996). Reaching to ipsilateral or contralateral targets: within-hemisphere visuomotor processing cannot explain hemispatial differences in motor control. *Experimental brain research*, 112, 496-504.

- Carmichael, L. (1926). The development of behavior in vertebrates experimentally removed from influence of external stimulation. *Psychological Review*, 33, 51-58.
- Carmichael, L. (1927). A further study of the development of behavior in vertebrates experimentally removed from influence of external stimulation. *Psychological Review*, 34, 34-47.
- Carmichael, L. (1928). A further experimental study of the development of behavior. *Psychological Review*, 35, 253-260.
- Carmichael, L. (1946). The onset and early development of behavior. In L. Carmichael (Ed.), *Manual of child psychology*. New York: Wiley.
- 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.
- Chemero, A. (2003). An outline of a theory of affordances. *Ecological psychology*, 15(2), 181-195.
- Chodzko-Zajko, W.J., Ringel, R.L. & Corrigan, D.L. (1988). Physiological fitness levels in the elderly: Implications for the relationship between chronological age and depression. *Psychogeriatrics*, 12, 44-45.
- Chodzko-Zajko, W.J. (1990). Physical fitness, cognitive performance and aging. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 23, 7.
- Choudhury, S., Charman, T., Bird, V., & Blakemore, S. J. (2007a). Adolescent development of motor imagery in a visually guided pointing task. *Consciousness and Cognition*, 16(4), 886-896.
- Choudhury, S., Charman, T., Bird, V., & Blakemore, S. J. (2007b). Development of action representation during adolescence. *Neuropsychologia*, 45, 255-262.
- Chung, M. K., Worlsey, K. J., Paus, T., Cherif, C., Collins, D. L., Giedd, J. N. et al. (2001). A unified statistical approach to deformation-based morphometry. *Neuroimage*, 14(3), 595-606.
- Clifton, R. K., Rochat, P., Robin, D. J., & Berthier, N. E. (1994). Multimodal perception in the control of infant reaching. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20(4), 876-886.
- Coello, Y. (2005). Perception spatiale pour l'action chez le sujet sain et pathologie. In Y. Coello, S. Casalis, & C. Moroni (Eds.), *Vision, espace et cognition: fonctionnement normal et pathologique* (pp. 75-96).
- Coello, Y., & Iwanow, O. (2006). The effect of structuring the workspace on cognitive and sensorimotor distance estimation: no dissociation between perception and action. *Perception and Psychophysics*, 68(2), 278-289.
- Cohen, M. S., Kosslyn, S. M., Breiter, H. C., DiGirolamo, G. J., Thompson, W. L., Anderson, A. K., Brookheimer, S. Y., Rosen, B. R., & Belliveau, J. W. (1996). Changes in cortical activity during mental rotation. A mapping study using functional MRI. *Brain*, 119, 89–100.
- Colby, C. L., & Goldberger, M. E. (1999). Space and attention in parietal cortex. *Annual review of neuroscience*, 22, 319-349.
- Colcombe, S., & Kramer, A. F. (2003). Fitness effect of the cognitive function of older adults: A Meta-Analytic Study. *Psychological science*, 14(2), 125-130.
- Craighero, L., Fadiga, L., Rizzolatti, G., & Umiltà, C. (1999). Action for perception: a motor-visual attentional effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25, 1673-1692.
- Cousin, V. (1903). *Œuvres de Platon, tome neuvième*. Paris: Rey & Gravier Libraires.

Cousin, V. (1903). *Œuvres de Platon, tome dixième*. Paris: Rey & Gravier Libraires.

Crone, E. A., Bunge, S., Van der Molen, M. & Ridderinkhof, K. R. (2006). Switching between tasks and response: a developmental study. *Developmental Science*, 9(3), 278-287.

Cutting, J. E., & Vishton, P. M. (1992). Perceiving layout and knowing distances: the integration, relative potency, and contextual use of different information about depth. In W. Epstein, & S. Rogers (Eds.) *Handbook of perception and cognition Vol 5 perception of space and motion* (pp. 69-117). San Diego: Academic Press.

- D -

Davidson, M. C., Amso, D., Anderson, L. C., & Diamond, A. (2006). Development of cognitive control and executive functions from 4 to 13 years: Evidence from manipulations of memory, inhibition, and task switching. *Neuropsychologia*, 44(11), 2037-2078.

Decety, J. (1996). The neurological basis of motor imagery. *Behavioral Brain Research*, 77, 45-52.

Delevoeye-Turrell, Y., Bartolo, A., and Coello, Y. (2010). Motor representation and the perception of space. In N. Gangopadhyay (Ed.) *Perception, Action and Consciousness* (pp. 217-242). Oxford University Press.

Dewey, D. (1993). Error analysis of limb and orofacial praxis in children with developmental motor deficits. *Brain and Cognition*, 23, 203-221.

Dewey, D. (1995). What is developmental dyspraxia? *Brain and cognition*, 29, 254-274.

Diamond, M. C. (1988). *Enriching heredity: the impact of the environment on the anatomy of the brain*. New York: Free Press.

Diaz-Araya, C. M., & Provis, J. M. (1992). Evidence of photoreceptor migration during early foveal development: A quantitative analysis of human fetal retinae. *Visual Neuroscience*, 8, 505-514.

DiFranco, D., Muir, D. W., & Dodwell, D. C. (1978). Reaching in young infants. *Perception*, 7, 385-392.

Dobson, V., & Teller, D. Y. (1978). Visual acuity in human infants: a review and comparison of behavioral and electrophysiological studies. *Vision research*, 18, 1469-1483.

- E -

Edelman, G. M. (1987). *Neural Darwinism*. New York: Basic Books.

Eimer, M., Hommel, B., & Prinz, W. (1995). S-R compatibility and response selection. *Acta Psychologica*, 90, 301-313.

Elbert, T., Pantey, C., Wienbruch, C., Rockstroh, B & Taub, E. (1995). Increase cortical representation of the fingers of the left hand in string players. *Science*, 270(5234), 305-307.

Ersnt, M. O., & Banks, M. S. (2002). Human integrate visual and haptic information in a statistical optimal fashion. *Nature*, 415, 429-434.

- F -

Fadiga L., Buccino G., Craighero L., Fogassi L., Gallese V., Pavesi G. (1999). Corticospinal excitability is specifically modulated by motor imagery: a magnetic stimulation study. *Neuropsychologia*, 37, 147-158

- Farnè, A., & Làdavas, E. (2000). Dynamic size-change of hand peripersonal space following tool use. *Cognitive neuroscience*, 11(8), 1-5.
- Farnè, A., Pavani, F., Meneghello, F., Làdavas, E. (2000). Left tactile extinction following visual stimulation of a rubber hand. *Brain*, 123, 2350-2360.
- Farnè, A., Serino, A., & Ladavàs, E. (2007). Dynamic size-change of perihand space following tool use: determinants and spatial characteristics revealed through cross modal extinction. *Cortex*, 43, 436-443.
- Fechner G.T. (1860). *Element der Psychophysik*. Leipzig, Breitkopf and Härtel.
- Field, J. (1976). Relation of young infant's reaching behavior to stimulus distance and solidity. *Developmental psychology*, 5, 444-448.
- Fine, I., Wade, A. R., Brewer, A. A., May, M., Goodman, D. F., Boynton, G. M., Wandell, B. A., & MacLeod, D. I. A. (2003). Long-term deprivation affects visual perception and cortex. *Nature Neuroscience*, 6, 915-916.
- Fischer, K. W. (2008). Dynamical cycles of cognitive and brain development: Measuring growth in mind, brain, and education. In A. M. Battro, K. W. Fischer & P. Léna (Eds.), *The educated brain* (pp.127-150). Cambridge: Cambridge University Press.
- Fischer, K. W. & Bidell, T. R. (1998). Dynamic development of psychological structures in action and thought. In W. Damon & R. M. Lerner (Eds), *Handbook of child psychology: theoretical models of human development* (5th ed., vol.1 pp. 467-561). New York: Wiley.
- Fischer, K. W. & Bidell, T. R. (2006). Dynamic development of action, thought, and emotion. In W. Damon & R. M. Lerner (Eds), *Handbook of child psychology: theoretical models of human development* (6th ed., vol.5 pp. 27-72). New York: Wiley.
- Fischer, K. W. & Rose, S. P. (1994). Dynamic development of coordination of components in brains and behavior: a framework theory and research. In G. Dawson & K. W. Fischer (Eds), *human behavior and the developing brain* (pp. 3-66). New York: The Guilford Press.
- Fischer, K. W. & Rose, S. P. (1996). Dynamic growth cycle of brain and cognitive development. In R. Thatcher, G. R. Lyon, J. Rumsey, & N. Krasnegor (Eds.), *Developmental neuroimaging: mapping the development of brain and behavior* (pp.263-279). New York: Academic Press.
- Fischer, K. W., & Yan, Z. (2002). The development of dynamic skill theory. In R. Lickliter & D. Lewkowicz (Eds.), *Conceptions of development: Lessons from the laboratory*. Hove: Psychology Press.
- Fischer, M. H. (2000). Estimating reachability: whole body engagement or postural stability. *Human Movement Science*, 19, 297-318.
- Fischer, M. H. (2005). Perceived reachability: the roles of handedness and hemifields. *Experimental brain research*, 160, 283-289.
- Fodor, J. A. (1983). *The modularity of mind*. Cambridge: MIT Press.
- Frick, A., Daum, M. M., Wilson, M., & Wilkening, F. (2009) Effects of action on children's and adults' mental imagery. *Journal of experimental child psychology*, 104, 34-51.
- Friede, R. L., & Hu, K. H. (1976). Proximo-distal differences in myelin development in human optic fibres. *Zeitschrift für Zellforschung*, 79, 259-264.
- Fuster, J. M. (2004). Upper processing stages of the perception-action cycle. *Trends in Cognitive Neuroscience*, 8(4), 143-145.

- G -

- Gabbard, C., & Ammar, D. (2005). Visual cues and perceived reachability. *Brain and cognition*, 59, 287-291.
- Gabbard, C., Ammar, D., & Rodrigues, L. (2005a). Hands effects on mentally simulated reaching. *Human Movement Sciences*, 24, 484-495.
- Gabbard, C., Ammar, D., & Rodrigues, L. (2005b). Perceived reachability in hemispace. *Brain and Cognition*, 58, 172-177.
- Gabbard, C., Cacola, P., and Cordova, A. (2009a). Examining psychological constraints in estimating reach via motor imagery. *Journal of mental imagery*, 33(1&2): 49-62.
- Gabbard, C., Cacola, P., and Cordova, A. (2009b). Is perceived motor competence a constraint in children's action planning (estimating reach)? *Journal of Genetic Psychology*, 170(2), 151-158.
- Gabbard, C., Cordova, A., & Ammar, D. (2007). Estimation of reach in peripersonal and extrapersonal space: a developmental view. *Developmental neuropsychology*, 32(3), 1-8.
- Gabbard, C., Cordova, A., & Lee, S. (2007). Examining the effects of postural constraints on estimating reach. *Journal of Motor Behavior*, 39(4), 242-246.
- Gabbard, C., Cordova, A., and Lee, S. (2009). Do children perceive postural constraints when estimating reach (motor planning)? *Journal of Motor Behavior*, 41(2), 100-105.
- Gabbard, C., & Rabb, C., (2001). Imagined and actual limb selection: A test of preference. *Brain and cognition*., 46, 139-144.
- Gallivan, J. P., Cavina-Pratesi, C., & Culham, J. C. (2009). Is that within reach? fMRI reveals that the human superior parieto-occipital cortex encodes objects reachable by the hand. *The journal of neuroscience*, 29(14), 4381-4391.
- Garey, L., & De Courten, C. (1983). Structural development in the lateral geniculate nucleus and visual cortex in monkey and man. *Behavioural brain research*, 10, 3-15.
- Gentilucci, M., Scandolara, C., Pigarev, I. N., & Rizzolatti, G. (1983). Visual responses in the postarcuate cortex (area 6) of the monkey that are independent of eye position. *Experimental brain research*, 50, 464-468.
- Gesell, A. (1933). *Maturation and the patterning of behavior*. In C. Murchison (Ed.), *A handbook of child psychology* (2nd ed., pp. 335-373). New York : Russel & Russel.
- Giedd, J. N., Blumenthal, J., Jeffries, N. O., Castellanos, F. X., Liu, H., Zijdenbos, A., & al. (1999). Brain development during childhood and adolescence: a longitudinal MRI study. *Nature Neuroscience*, 2(10), 861-863.
- Giedd, J. N., Snell, J. W. Lange, N., Rajapakse, J. C., Casey, B. J., Kozuch, P. L., et al. (1996). Quantitative magnetic resonance of human brain development: age 4-18. *Cerebral cortex*, 6(4), 551-560.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach in visual perception*. Boston: Houghton Mifflin.
- Girardi, G., Lindemann O., & Bekkering H. (2010). Context effects on the processing of action-relevant object features.. *Journal of experimental psychology. Human perception and performance*, 36(2), 330-40
- Glover, S. (2004). Separate visual representations in the planning and control of action. *Behavioral. brain science*, 27, 3-26.

- Gori, M., Del Viva, M., Sandini, G., & Burr, D. C. (2008). Young children do not integrate visual and haptic form information. *Current Biology*, 18, 694-698.
- Gould, E., & Tanapat, P. (1999). Stress and hippocampal neurogenesis. *Biological Psychiatry*, 46(11), 1472-1479.
- Graven, S. & Browne, J. V. (2008), Sensory development in the fetus, neonates and infant. *Newborn and Infant Nursing Reviews Topic "Brain Development"*. 8(4), 169-177..
- Gray, R., & Tan, H. Z. (2002). Dynamic and predictive links between touch and vision. *Experimental brain research*, 145, 50-55.
- Graziano, M. S. A., Gross, C. G. (1993). A bimodal map of space: somatosensory receptive fields in the macaque putamen with corresponding visual receptive fields. *Experimental brain research*. 97, 96-109.
- Graziano, M. S. A., Gross, C. G. (1994). The representation of extrapersonal space: A possible role for bimodal, visual-tactile neurons. In M. S. Gazzaniga (Ed.) *The Cognitive Neurosciences* (pp. 1021-1034). Cambridge: The MIT Press.
- Graziano, M. S. A., Gross, C. G. (1996). Multiple pathways for processing visual space. In T. Inui, & J. L. McClelland (Eds.), *Attention and Performance XVI* (pp. 181-207). Cambridge: The MIT press.
- Graziano, M. S. A., & Gross, C.G. (1998). Visual response with and without fixation: neurons in premotor cortex encode spatial locations independently of eye position. *Experimental brain research*, 118, 373-380.
- Graziano, M. S. A., Gross, C.G., Taylor, C. S. R., & Moore, T. (2004). A system of multimodal areas in the primate brain. In C. Spence, & J. Driver (Eds.), *Crossmodal Space and Crossmodal Attention* (pp. 51-67). Oxford: Oxford University (pp. 51-67).
- Graziano, M. S. A., Yap, G. S., Gross, C. G. (1994). Coding of visual space by pre-motor neurons. *Science*, 266, 1054 -1057.
- Guilbert, J., Jouen, F., Lehall, H., & Molina, M. (2013). Imagerie motrice interne et simulation de l'action chez l'enfant. *L'année psychologique*, 113, 461-490.

- H -

- Hall, Edward T. (1966). *The Hidden Dimension*. New York Anchor Books.
- Haggard, P., & Wolpert, D. M. (2005). Disorders of body scheme. In H. J. Freund, M. Jeannerod, M. Hallett, & R. Leigard (Eds.), *Higher-order motor disorders, from neuroanatomy and neurobiology to clinical neurology*. Oxford: Oxford University Press.
- Head, H. (1920). *Studies in Neurology Vol 2*. London: Oxford University Press.
- Head, H., Holmes, G. (1911). Sensory disturbances from cerebral lesions. *Brain*, 34, 2-3.
- Hebb, D. O. (1949). *The organization of behavior: a neuropsychological theory*. New York: Wiley.
- Heilman, K. M., Rothi, L. J., & Valenstein, E. (1982). Two form of ideomotor apraxia. *Neurology*, 32(4), 342-346.
- Held, R. (1985). Binocular vision: behavioral and neural development. I, J. Mehler & R. Fox (Eds.), *Neonate cognition: beyond the blooming buzzing confusion* (pp. 37-44). Hillsdale: Erlbaum.

- Held, R., & Hein, A. (1963). Movement-produced stimulation in the development of visually guided behavior. *Journal of comparative and physiological psychology*, 56(5), 872-876.
- Holmboe, K., Fearon, P. R. M., Csibra, G., Tucker, L. A., & Johnson, M. H. (2008). Freeze-frame: A new infant inhibition task and its relation to frontal cortex tasks during infancy and early childhood. *Journal of Experimental Child Psychology*, 100, 89-114.
- Hommel, B. (1993). Inverting the Simon effect by intention: Determinants of direction and extent of effects of irrelevant spatial information. *Psychological Research*, 55, 270-279.
- Hommel, B. (1995). Stimulus-Response Compatibility and the Simon effect : Toward an empirical clarification, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21, 764-775.
- Hommel B. (2011). The Simon effect as tool and heuristic. *Acta Psychologica*, 136, 189-202.
- Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G., & Prinz, W. (2001). The Theory of Event Coding (TEC): A framework for perception and action planning, *Behavioral and Brain Sciences*, 24, 849-937.
- Hood, B. (1995). Shifts of visual attention in the human infant: A neuroscientific approach. In C. Rovee-Collier & L. Lipsitt (Eds.), *Advances in infancy research, Vol. 9* (pp. 163-216). Norwood: Ablex.
- Huttenlocher, P. R., de Courten, C., Garey, L. G., & van der Loos, H. (1982). Synaptogenesis in human visual cortex - evidence for synapse elimination during normal development. *Neuroscience letters*, 33, 247-252.

- I -

- Immordino-Yang, M. H., & Fischer, K. W. (2007). Dynamic development of hemispheric biases. . Coch, Fischer, K. W., & Dawson, G. (Eds.), *Human behavior, learning and the developing brain-typical development* (pp. 3-29). New York: The Guilford Press.
- Ingle, D. (1973). Two visual systems in the frog. *Science*, 181, 1053-1055.
- Iriki, A. (2006). The neural origins and implications of imitation, mirror neurons and tool use. *Current opinion in neurobiology*, 16(6), 660-667.
- Iriki, A., Tanaka, M., & Iwamura, Y. (1996). Coding of modified body schema during tool use by macaque postcentral neurons. *Neuroreport*, 7, 2325-2330.
- Iriki, A., Tanaka, M., Obayashi, S., & Iwamura, Y. (2001). Self images in the video monitor coded by monkey intraparietal neurons. *Neuroscience research*, 40, 163-173.

- J -

- James, W. (1892). *Précis de psychologie*. Paris: Le seuil pour la traduction française.
- Jansen-Osman, P., Richter, S., Konczak, J., & Kalveram, K. T. (2002). Force adaptation transfers to untrained workspace regions in children: evidence for developing inverse dynamic motor models. *Experimental Brain Research*, 142, 212-220.
- Jeannerod, M. (1988). *The Neural and Behavioural Organization of Goal-Directed Movements*. Oxford: Oxford University Press.
- Jeannerod, M. (1994). The representing brain: Neural correlates of motor intention and imagery. *Behavioral and Brain Sciences*, 17, 187-245.
- Jeannerod, M. (1997). *The cognitive neuroscience of action*. Oxford: Blackwell Publishers.

- Jeannerod, M., & Frak, V. (1999). Mental imaging of motor activity in humans. *Current Opinion in Neurobiology*, 9, 735-739.
- Johnson, M. H. (1995). The inhibition of automatic saccades in early infancy. *Developmental Psychobiology*, 28, 281-291.
- Johnson, M. H. (2001). Functional brain development in humans. *Nature reviews neuroscience*, 2, 475-483.
- Johnson, M. H., & de Haan, M. (2001). Developing cortical specialization for visual-cognitive functions. In J. L. McClelland, R. S. Siegler (Eds.), *Mechanisms of Cognitive Development* (pp. 253-270). Mahwah: Erlbaum.
- Johnson, M. H., & Munakata, Y. (2005). Processes of change in brain and cognitive development. *Trends in Cognitive Science*, 9, 152-158.
- Johnson, M. H., Posner, M. I., & Rothbart, M. K. (1991). Components of visual orienting in early infancy: Contingency learning, anticipatory looking, and disengaging. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 3(4), 335-344.

- K -

- Kandel, S., Orliaguet, J. P. & Viviani, P. (2000). Perceptual anticipation in handwriting : The role of implicit motor competence. *Perception and Psychophysics*, 62, 706-716.
- Kornblum, S. (1994). The way irrelevant dimensions are processed depends on what they overlap with: The case of Stroop- and Simon-like stimuli. *Psychological Research*, 56, 130-135.
- Kornblum, S., Hasbroucq, T., & Osman, A. (1990). Dimensional overlap: Cognitive basis of stimulus-response compatibility: A model and taxonomy. *Psychological Review*, 97, 253-270.
- Korte, A. (1915). Kinematoskopische Untersuchungen. *Zeitschrift für Psychologie*, 72, 193-296.
- Kosslyn, S. M. (1973). Scanning visual images: Some structural implications. *Perception and Psychophysics*, 14, 90-94.
- Kosslyn, S. M. (1994) *Image and brain*. Cambridge: MIT Press.
- Kosslyn, S. M. (2000). Les variations des images mentales. In P. Gallois & G. Forzy (Eds.). *Annales d'Histoire et de Philosophie du Vivant: Le Cerveau et les Images* (pp. 19-33). Paris: Institut d'edition Sanofi-Synthelabo.
- Kosslyn, S. M., Ball, T. M., & Reiser, B. J. (1978). Visual images preserve metric spatial information: Evidence from studies of image scanning. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 4, 47-60.
- Kosslyn, S. M., Margolis, J. A., Barrett, A. M., Goldknopf, E. J. & Daly, P. F. (1990). Age differences in imagery abilities. *Child Development*, 61(4), 995-1010.
- Kosslyn, S.M. and Sussman, A.L. (1994). Roles of imagery in perception: Or, there is no such thing as immaculate perception. In M.S. Gazzaniga (Ed.), *The Cognitive Neurosciences* (pp. 1035-1042). Cambridge: MIT Press..

- L -

- Lackner, J. R. (1988). Some proprioceptive influences on the perceptual representation of body shape and orientation. *Brain*, 111(2), 281-297.
- Lamberts, K., Tavernier, G., & d'Ydewalle, G. (1992). Effects of multiple reference points in spatial S-R compatibility. *Acta Psychologica*, 79, 115-130.
- Lockman, J. J., Ashmead, D. H., & Bushnell, E. W. (1984). The development of anticipatory hand orientation during infancy. *Journal of experimental child psychology*, 37, 176-186.
- Longo, M. R., & Bertenthal, B. I. (2006). Common coding of observation and execution of action in 9-month-old infants. *Infancy*, 10(1), 43-59.
- Louis-Dam, A., Kandel, S. & Orliaguet, J-P. (2000). Anticipation motrice et anticipation perceptive. *Psychologie Française*, 45, 333-342.
- Lussier, F., & Flessas, J. (2005). Troubles praxiques et visuospatiaux in F., Lussier., & J. Flessas, *Neuropsychologie de l'enfant : troubles développementaux et de l'apprentissage* (pp 199-233). Paris: Dunod,.
- Luria, A. R. (1976). *The Cognitive Development: Its Cultural and Social Foundations*. Cambridge: Harvard University Press.

- M -

- Macaluso, E., & Driver, J. (2005). Multisensory spatial interactions: a window onto functional integration in the human brain. *Trends in Neuroscience*, 28, 261-271.
- Maravita, A., & Iriki, A. (2004). Tools for the body schema. *Trends in cognitive sciences*, 8(2), 79-86.
- Mark, L. S., Ncmeth, K., Garciner, D., Dainoff, M. J., Paasche, J., and Duffy, M. (1997). Postural dynamics and the preferred critical boundary for visually guided reaching. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23, 1365-1379.
- Marshall, P., Bar-Haim, Y. & Fox, N. (2002). Development of the EEG from 5monthes to 4 years of age. *Clinicla neurophyiology*, 113, 1199-1208.
- Meulenbroek, R. G., & Van Gallen, G. P. (1988). The acquisition of skill handwriting: Discontinuous trends in kinematics variables. In A. M. Colley & J. R. Beechs (Eds.), *Cognition and Action in Skill Behavior* (pp273-281). Amsterdam: North Holland
- Miall, R. C., & Wolpert, D. M. (1996). Forward model for physiological motor control. *Neural Networks*, 9(6), 1265-1279.
- Milner, A. D., & Goodale, M. A. (1995). *The visual brain in action*. Oxford: Oxford University Press.
- Molina, M.; Tijus, C., & Jouen, F. (2008). The emergence of motor imagery in children. *Journal of experimental child psychology*, 99, 196-209.

- N -

- Molyneux, W. (1688). Letter to John Locke dated of the 7th of July 1688.
- Nardini, M., Bedford, R., & Mareschal, D. (2010). Fusion of visual cues is not mandatory in children. *Proceeding of the national. academy of science. U. S. A*, 107(39), 17041-17046.

- Nardini, M., Jones, P., Bedford, R., & Braddick, O. (2008). Development of cue integration in human navigation. *Current Biology*, 18, 689-693.
- Nelson, C. A., & Luciana, M. (2008). *Handbook of developmental cognitive neuroscience 2nd ed.* Cambridge: MIT Press.
- Newell, K. M. (1986). Constraints on the development of coordination. In M. G. Wade, & H. T. Whitin (Eds.), *Motor development in children: Aspects of coordination and control* (pp. 341-361).
- Nicoletti, R., & Umiltà, C. (1989). Splitting visual space with attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 15, 164-169.
- Nicoletti, R., & Umiltà, C. (1994). Attention shifts produce spatial stimulus codes. *Psychological Research*, 56, 144-150.
- Noe, A. (2004). *Action in perception*. Cambridge: The MIT press.
- Norcia, A. M. & Tyler, C. W. (1985). Spatial frequency sweep VEP: visual acuity during the first year of life. *Vision research*, 25, 1399-1408.

- O -

- Olivier, G. (2012). *La cognition gestuelle: ou de l'écho à l'égo*. Grenoble: PUG.
- Olivier, G., & Juan de Mendoza, J. L. (2000). Motor dimension of visual mental image transformation processes. *Perceptual and Motor Skills*, 90, 1008-1026.
- Olivier, G., & velay, J. L. (2009). Visual objects can potentiate a grasping neural simulation which interferes with manual response execution. *Acta Psychologica*, 130, 147-152.
- Olivier, G., Velay, J. L., Labiale, G., Celse, C., Faure., S. (2004). Mental rotation and simulation of a reaching and grasping manual movement. *Perceptual and motor skills*, 98(3), 1107-1116.
- Orliaguet, J. P., Kandel, S. & Boë, L. J. (1997). Visual perception of motoranticipation in cursive handwriting : Influence of spatial and movementinformation on the prediction of forthcoming letters. *Perception*, 26, 905-912.
- Oyama, S. (2000). *The ontogeny of information: Developemental Systems and Evoution*, rev. ed., Durham: Duke University Press.

- P -

- Paillard, J. (1982). Le corps: approche neuropsychologique et neurologique. In E. Jeddi (Ed.). *Le corps en psychiatrie* (pp. 53-69), Paris: Masson.
- Parsons, L. (1994). Temporal and kinematic properties of motor behavior reflected in mentally simulated action. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20, 709-730.
- Pellicano, A., Lugli, L., Baroni, G., & Nicoletti, R. (2009). The Simon effect with conventional signals: À time-course analysis. *Experimental Psychology*, 56(4), 219-227.
- Pepping, G-J. & Li, F, X. (2000). Changing action capabilities and the perception of affordances. *Journal of Human Movement Studies*, 39, 115-140. *Journal of Human Movement Studies*, 39, 115-140.
- Piaget, J. (1930). *The child conception of physical causality*. London: Kegan & Trubner.
- Piaget, J. (1947). *The origins of intelligence in children*. New York: International universities press.

- Piaget, J. (1947). *La représentation du monde chez l'enfant, 3e édition*. Paris: PUF.
- Piaget, J. (1972). Intellectual evolution from adolescence to adulthood. *Human Development*, 15, 1-12.
- Piaget, J. & Inhelder, B. (1966). *La psychologie de l'enfant*. Paris: Presse Universitaire de France.
- Pijpers, J.R., Oudejans, R.R.D. & Bakker, F.C. (2007). Changes in the perception of action possibilities while climbing to fatigue on a climbing wall. *Journal of Sports Sciences*, 25(1), 97-110.
- Pijpers, J. R., Oudejans, R. R. D., Bakker, F. C., & Beek, P. J. (2006). The role of anxiety in perceiving and realizing affordance. *Ecological Psychology*, 18(3), 131-161.
- Plumb, M. S., Wilson, A. D., Mulroue, A., Brockman, A., Williams, J. H. G., & Mon-Williams, M. (2008). Online corrections in children with and without DCD. *Human Movement Science*, 27, 695-704.
- Poincaré, H.(1902). *La science et l'hypothèse*, retrieved from <http://www.ebooksgratuits.com>
- Posner, M. I., & Rothbart, M. K. (1981). The development of attentional mechanisms. In J. H. Flower (Ed.), *Nebraska symposium on motivation* (pp. 1–51). Lincoln: University of Nebraska Press.
- Previc, F. H. (1998). The neuropsychology of 3-D space. *Psychological bulletin*, 124(2), 123-164.

- R -

- Rader, N., & Stern, J. D. (1982). Visually elicited reaching in neonates. *Child development*, 53, 1004-1007.
- Rakic, P., Bourgeois, J. P., & Goldman-Rakic, P. S. (1994). Synaptic development of the cerebral cortex: implication for learning, memory, and mental illness. In J. van Pelt, M. A. Corner, M. B. M. Uylings, & F. H. Lopes da Silva (Vol. Eds.), *progress in brain research, vol. 102. the self organizing brain: from growth comes to functional networks* (pp. 227-243). Amsterdam: Elsevier.
- Reed, C. L., & Farah, M. J. (1995). The psychological reality of the body schema: a test with normal participants. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21, 334–343.
- Rizzolatti, G., Riggio, L., & Sheliga, B. M. (1994). Space and selective attention. In C. Umiltà, & M. Moscovitch (Eds.), *Attention and performance XV* (pp. 231–265). Cambridge: MIT Press.
- Ro, T., Wallace, R., Hagedorn, J., Farnè, A., & Pienkos, E. (2004). Visual enhancing of tactile perception in posterior parietal cortex. *Journal of cognitive neuroscience*, 16, 24–30.
- Robinovitch, S. N. (1998) Perception of postural limits during reaching. *Journal of motor behavior*, 30(4), 352-358.
- Rochat, P. (1992). Self-sitting and reaching in 5-8 month old Infants: The impact of posture and its development on early eye-hand coordination. *Journal of motor behavior*, 24, 210-220.
- Rochat, P. (1995). Perceived reachability for self and other by 3-to 5-years old children and adults. *Journal of Experimental Child Psychology*, 59, 317-333.
- Rochat, P., & Goubet, N. (1995). Development of sitting and reaching in 5- to 6- month-old infants. *Infant behavior and development*, 18, 53-68.
- Rochat, P., & Striano, T. (2000). Perceived self in infancy. *Infant Behavior & Development*, 23, 510-530.
- Rochat, P., Wraga, M. (1997). An account of the systematic error in judging what is reachable. *Journal of experimental psychology*, 23(1), 192-212.

- Röder, B., Rösler, F., & Spence, C. (2004). Early vision impairs tactile perception in the blind. *Current Biology*, 14, 121-124.
- Röder, B., Spence, C., & Rösler, F. (2002). Assessing the effect of posture change on tactile inhibition-of-return. *Experimental Brain Research*, 143, 453–462.
- Rorden, C., Heutink, J., Greenfield, E., & Robertson, I. H. (1999). When a rubber hand 'feels' what the real hand cannot. *Neuroreport*, 10, 135-138.
- Rose, L. T., & Fischer, K. W. (2008). Dynamic systems theory. In R. A. Shweder (Ed.), *Chicago companion to the child*. Chicago: University of Chicago Press.
- Ruf, H. A., & Halton, A. (1979). Is there directed reaching in the human neonate? *Developmental psychology*, 14, 425-426.

- S -

- Schaffhauser, D., Breuer, M. (2005). Body image / Body schema. on line.
- Schmidt, Richard A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82(4), 225–260.
- Segalowitz, S. J. (2007). The role of neuroscience in historical and contemporary theories of human development. In D. Coch, Fischer, K. W., & Dawson, G. (Eds.), *Human behavior, learning and the developing brain-typical development* (pp. 3-29). New York: The Guilford Press.
- Shannon, C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423.
- Shannon, C. E., & Weaver, W. (1949). *The Mathematical Theory of Communication*. Champaign: University of Illinois Press.
- Shergill, S. S., Bays, P. M., Frith, C. D., & Wolpert, D. M. (2003). Two eyes for an eye: the neuroscience of force escalation. *Science*, 301, 187.
- Shiffrar, M., & Freyd, J. J. (1990). Apparent motion of the human body. *Psychological sciences*, 1(4), 257-264.
- Shimojo, S., Birch, E., & Held, R. (1983). Development of vernier acuity assessed by preferential looking. *Supplement: Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 24, 93.
- Simon, J. R., & Rudell, A. P. (1967). Auditory S–R compatibility: The effect of an irrelevant cue on information processing. *Journal of Applied Psychology*, 51, 300-304.
- Simon, J. R., & Small, A. M., Jr. (1969). Processing auditory information: Interference from an irrelevant cue. *Journal of Applied Psychology*, 53, 433-435.
- Sirigu, A., Duhamel, J., Cohen, L., Pillon, B., Dubois, B., & Agid, Y. (1996). The mental representation of hand movements after parietal cortex damage. *Science*, 273, 1564-1567.
- Skoura, X., Vinter, A., & Papaxanthis, C. (2009). Mentally simulated motor action in children. *Developmental Neuropsychology*, 34(3), 356-367.
- Slater, A., Mattock, A., & Brown, E. (1991). From perception at birth: Cohen and youner (1984) revisited. *Journal of experimental child psychology*, 51, 395-406.
- Sloper, J. J. (1993). Competition and co-operation in visual development. *Eye*, 7, 319-331.

- Smits-Engelman, B. C. M., & Wilson, P. H. (2013). Noise, variability, and motor performance in developmental coordination disorder. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 55(4), 69-72.
- Sokol, S., Hansen, V. C., Moskowitz, A., Greenfield, P., Towle, V. L. (1983). Evoked-potential and preferential looking estimates of visual acuity in pediatric patients. *Ophthalmology*, 90, 552-562.
- Somsen, R. J. M., van't Klooster, B. J., van der Molen, M. W., van Leeuwen, H. M. P., & Licht, R. (1997). Growth spurts in brain maturation during middle childhood as indexed by EEG power spectra. *Biological psychology*, 44, 187-209.
- Spence, C., Pavani, F., & Driver, J. (2004). Spatial constraints on visual-tactile cross-modal distractor congruency effects. *Cognitive, affective & behavioral neuroscience*, 4(2), 148-169.
- Spirduso, W. W. (1975). Reaction and Movement Time as a Function of age and Physical Activity Level. *Journal of gerontology*, 30(4), 435-440.
- Sporns, O. & Edelman, G. M. (1993). Solving Bernstein problem: A proposal for the development of coordinated movement by selection. *Child development*, 64, 960-981.
- Squire, L., & Kandel, E. (2008). *Memory: from mind to molecules*. Greenwood village: Roberts & Company Publishers.
- Stamback, M., L'Hériveau, D., Auzias, M., Bergès, J., Ajuriaguerra, J. (1964). Les dyspraxies chez l'enfant/ *La psychiatrie de l'enfant*, 7, 381-396.
- Stechler, G., & Latz, E. (1966). Some observations on attention and arousal in the human infant. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 5, 517-525.

- T -

- Tatchet, R. W. (1994). Cyclic cortical reorganization: origins of human cognitive development. In G. Dawson & K. W. Fischer (Eds.), *Human behavior and the developing brain* (pp. 232-266). New York: The Guilford Press.
- Tessari, A., & Rumiati, R.I. (2002). Motor distal component and pragmatic representation of objects. *Cognitive Brain Research*, 14(2), 218-227.
- Thelen, E. (1995). Motor Development: A new synthesis. *American Psychologist*, 50(2), 79-95.
- Thelen, E., Fisher, D. M. (1982). Newborn stepping: An explanation for a "disappearing reflex". *Developmental Psychology*, 18, 760-775.
- Thibault, J. P., & Toussaint, L. (2009). Developing motor planning over ages. *Journal of Experimental Child Psychology*, 105, 116-129.
- Trevarthen, C. (1968). Two visual mechanisms of vision in primates. *Psychologische forschung*, 31, 299-337.
- Tucker, M. & Ellis, R. (1998). On the relations between seen objects and components of actions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24, 830-846.
- Tucker, M. & Ellis, R. (2001). The potentiation of grasp types during visual object categorization. *Visual Cognition*, 8, 769-800.
- Tucker, M. & Ellis, R. (2004). Action priming by briefly presented objects, *Acta Psychologica*, 116, 185-203.

- U -

Ungerleider, L. G., & Haxby, J. V. (1994). "What" and "Where" in the human brain. *Current Opinion in Neurobiology*, 4, 157-167.

- V -

Van Beers, R. J., Wolpert, D. M., & Haggard, P. (2002). When feeling is more important than seeing in sensorimotor adaptation. *Current Biology*, 12, 834-837.

Varela, F. (1988). *Autonomie et connaissance, essai sur le vivant*. Paris: Le seuil.

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., & 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. (1992). Biological movements look uniform: evidence of motor-perceptual interactions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18(3), 603-623.

Voss, M., Bays, P. M., Rothwell, J. C., & Wolpert, D. M. (2007). An improvement in perception of self-generated tactile stimuli following theta-burst stimulation of primary motor cortex. *Neuropsychologia*, 45, 2712-2717.

Vu, K. P. L., & Proctor, R. W. (2004). Mixing compatible and incompatible mappings: Elimination, reduction and enhancement of spatial compatibility effects. *Quarterly journal of experimental Psychology: Human experimental Psychology*, 57, 539-556.

Vygotsky, L. (1933). *Pensée et langage Commentaires sur les remarques critiques de Vygotski de Jean Piaget*. Paris: La dispute (traduction de 1985).

- W -

Wallon, H. (1945). *Les Origines de la pensée chez l'enfant*. Paris: PUF.

Wattam-Bell, J. (1990). The development of maximum velocity limits for direction discrimination in infancy. *Perception*, 19, 369.

Wattam-Bell, J. (1996). The development of visual motion processing. In F. Vital-Drurand, O. Braddick, & J. Atkinson (Eds.), *Infant vision* (pp.79-84). New York: Oxford university press.

Wattam-Bell, J., Birtles, D., Nyström, P., von Hofstein, C., Rosander, K., Anker, S., Atkinson, J., & Braddick, O. (2010). Reorganization of global form and motion processing during visual development. *Current biology*, 20, 411-415.

Wickens, C.D. (1984). Processing resources in attention, in R. Parasuraman & D.R. Davies (Eds.), *Varieties of attention*, (pp. 63–102). New York: Academic Press.

Wiesel, T. N., Hubel, D. H., Effects of Visual Deprivation on Morphology and Physiology of Cells in the Cats Lateral Geniculate Body. *Journal of neurophysiology*, 26, 978-993.

- Williams, J., Pearce, A. J., Loporto, M., Morris, T., & Holmes, P. S. (2012). The relationship between corticospinal excitability during motor imagery and motor imagery ability. *Behavioral brain research*, 226(2), 369-375.
- Williams, J., Thomas, P. R., Maruff, P., & Wilson, P. H. (2008). The link between motor impairment level and motor imagery ability in children with developmental coordination disorder. *Human Movement Science*, 27, 270-285.
- Wilson, P. H., Maruff, P., Ives, S., & Currie, J. (2001). Abnormalities of motor and praxis imagery in children with DCD. *Human Movement Sciences*, 20, 135-159
- Wilson, P. H., & McKenzie, B. E. (1998). Information processing deficits associated with developmental coordination disorder: a meta-analysis of research findings. *Journal of child psychology and psychiatry*, 39, 829-840.
- Witt, J.K., Proffitt, D.R., & Epstein, W. (2005). Tool use affects perceived distance but only when you intend to use it. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31, 880-888.
- Wohlschlagel, A., & Wohlschlagel, A. (1998). Mental and manual rotation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24, 397-412.
- Wolpert, D. M. (1997). Computational approaches to motor control. *Trends in cognitive sciences*, 1(6), 209-216.
- Wolpert, D.M., Flanagan, J. R. (2001). Motor prediction. *Current Biology*, 11(18), 729-734.
- Wolpert, D. M., Gharamani, Z., & Flanagan, J. R. (2001). Perspectives and problems in motor learning. *Trends in cognitive sciences*, 5(11), 487-495.
- Wundt, W. (1874). *Principles of physiological psychology*. London: Allen pour la traduction anglaise.

- Y -

- Yakolev, P. I., & Lecours, A. (1967). The myelogenetic cycles of regional maturation of the brain. In A. Minkowski (Ed.), *Regional development of the brain in early life*. Philadelphia: Davis.
- Yonas, A. and Hartman, B. (1993). Perceiving the affordance of contact in 4- and 5-month-old infants. *Child Development*, 64, 298 – 308.
- Youdelis, C., & Hendrickson, A. (1986). A qualitative and quantitative analysis of the human fovea during development. *Vision Research*, 26, 847-855.

- Z -

- Zabalía M. (2002). Action et imagerie mentale chez l'enfant. *L'Année Psychologique*, 102, 409-422.
- Zijdenbos, A. P., Dawant, B. M., & Margolin, R.A. (1994). Automatic detection of intracranial contours in MR images. *computerized medical imaging and graphics*, 18(1), 11-23.

Partie 5 : Annexe

Begin at the beginning and go on till you come to the end: then stop.

Lewis Carroll, Alice's Adventures in Wonderland. Said by the King to the White Rabbit

Annexe A: dossier du comité éthique interne au laboratoire URECA pour le protocole COMODO.

Compétences Motrices et Développement Ontogénétique

Acronyme de l'étude :

C.O.M.O.D.O

Promoteur de l'étude :

Université Charles de Gaulles-Lille 3

Laboratoire URECA

Coordonnateurs, Responsables scientifiques :

RICHEZ Aurélien, psychologue, doctorant laboratoire URECA, Lille 3.

BIANCHI Jérôme, psychologue, C.E.R.T.A Nice, CHU Lival.

COSTINI Oriane, psychologue, doctorante laboratoire BCL.

CARANTA Isabelle, psychologue, C.E.R.T.A Nice, CHU Lival.

FOSSOUD, Catherine, Neuropédiatre, C.E.R.T.A Nice, CHU Lival.

RICHELME Christian, Neuropédiatre, C.E.R.T.A Nice, CHU Lival.

COELLO Yann, Professeur de psychologie Cognitive, laboratoire URECA, Lille 3

Version n°4 du 20/07/2012

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION THÉORIQUE.....	5
2. OBJECTIFS	5
3. METHODE.....	5
3.1. Type d'étude	5
3.2. Population	5
3.3. Lieu d'étude	5
3.4. Procédure	5
3.5. Méthodologie utilisée.....	5
4. TRAITEMENT DES DONNEES	5
4.1. Gestion des données.....	5
4.2. Analyse des données.....	5
4.3. Finalité de l'étude	5
5. ASPECTS REGLEMENTAIRES ET ETHIQUES	6
5.1. Confidentialité.....	6
5.2. Déclaration(s) réglementaire(s)	6
5.3. Information et consentement.....	6
5.4. Propriétés des données et publication	6
5.5. Archivage des données	6
6. DUREE DE L'ETUDE ET ECHEANCIER	6
REFERENCES	7
ANNEXES	7

APPROBATION ET SIGNATAIRES DU PROTOCOLE

**Compétences Motrices et Développement
Ontogénétique (C.O.M.O.D.O) :**

Date

Signature

Responsable scientifique de l'étude,

Professeur Yann Coello

/ _____ / / _____ /

Directeur du laboratoire URECA

Je reconnais avoir pris connaissance de l'ensemble du protocole **COMODO** et je m'engage à conduire ce protocole conformément à ce qui est décrit dans ce document.

Résumé

Résumé du projet en français (250 mots)

Ce protocole de recherche se propose de tester l'influence des compétences motrices d'un individu sur le développement des capacités à appréhender et à percevoir son environnement et l'espace qui l'entoure en termes fonctionnels. Pour ce faire nous comptons proposer à 2 groupes de participants (un groupe d'enfants et d'adolescents présentant des troubles moteurs fonctionnels et un groupe d'enfants et d'adolescents contrôle) une série de tâches expérimentales dont les résultats seront analysés en parallèle des données psychométriques recueillies chez le groupe expérimental. Quatre tâches ont été définies pour réaliser ce projet : (1) une tâche de jugement perceptif de la limite d'atteignabilité (2) une tâche d'amorçage visuo-moteur sur un effet de compatibilité entre un stimulus visuel et le geste de réponse qui lui est associé (3) une tâche d'imagerie motrice et (4) une tâche de manipulation d'objet conçue afin de mettre en évidence la présence ou non d'un effet dit de confort de l'état terminal. Ces épreuves seraient présentées à l'aide d'un matériel informatique ou à l'aide de tests papier crayon. Le présent projet vise donc à apporter des données complémentaires afin de montrer l'importance des composantes motrices dans les mécanismes perceptifs et attentionnels au niveau spatial au cours du développement et ce, en étudiant une population d'enfants et d'adolescents présentant un trouble moteur fonctionnel et en comparant directement cette population à une population contrôle d'enfants et d'adolescents ne présentant pas ce type de déficit.

Mots Clefs (5max.)

Perception spatiale, troubles moteurs fonctionnels, développement moteur, imagerie motrice.

Résumé du projet en anglais (250 mots)

The present protocol is aimed to assess the influence of individual motor skill on the ontogenetic development of spatial vision and the ability to perceive the environment in functional terms. We thus intend to propose a set of experimental task to 2 groups of participant: a population of children and adolescent with functional motor impairment and a yoked control group. Psychometric data will also be analyzed in parallel of experimental tasks. Four tasks were designed for this protocol: (1) a perceptual judgement of reachability (2) a visuo-motor priming task (3) a motor imagery task and (4) an object manipulation task to assess the presence of the end-state-comfort-effect. These tasks are computer-based or just pen-and-paper tasks. The main purpose of the current project is to gather complementary data to test the role of motor components in spatial perceptuo-attentional processes along development by a large and systematic comparison of the 2 population of functionally motor impaired and normal children.

Key Words (5max.)

Spatial vision, functional motor impairment, motor development, motor imagery.

1. INTRODUCTION THEORIQUE

1.1. Avant propos

Le sens commun envisage généralement la perception comme un phénomène essentiellement passif et se déroulant de manière automatique. On considère également l'expérience perceptive comme un tout unique, nous parvenant de manière globale, « en bloc ». L'étude fine et systématique de la perception nous permet de nuancer cette position en montrant par exemple que notre représentation de l'environnement est largement parcellaire et dépend donc de processus nombreux et complexes. Dans le domaine de la psychologie cognitive, la représentation de l'espace qui nous entoure dépendrait pour une part des capacités d'action de l'organisme aussi bien que des retours sensoriels.

1.2. Rationnel

Cette idée d'une interdépendance de la perception et de l'action est relativement ancienne (James, 1863 ; Poincaré, 1902) et elle trouve un écho particulier dans le domaine de la psychologie cognitive et de la neuropsychologie. En effet une importante quantité de données expérimentales et cliniques semble aller dans le sens d'une perception de l'environnement dépendant des capacités d'action de l'organisme (Mial & Wolpert, 1996 ; Prévic, 1998 ; Hurley, 2001, Jeannerod, 2005). En effet, que ce soit pour juger d'une localisation spatiale, ou simplement lorsqu'on perçoit un objet, l'implication et l'activation de systèmes moteurs sont maintenant bien établies comme le montrent les travaux en amorçage visuomoteur chez l'adulte (Tucker & Ellis, 2004) ou encore les théories de la résonance motrice (Schütz-Bosbach & Prinz, 2007). Notre cerveau effectuerait une discrimination primordiale entre les endroits de l'environnement étant directement atteignables ainsi que les objets s'y trouvant et les localisations nécessitant un déplacement pour pouvoir les atteindre (Grafton, 1995 ; Coello & Delevoye-Turell, 2007). Cette discrimination entre un espace péripersonnel, directement atteignable, et un espace extrapersonnel, qui requiert un déplacement du corps pour pouvoir agir, nécessiterait donc la construction et la manipulation de représentations motrices. Pour certains, ces représentations motrices servent à simuler un geste d'atteinte et c'est cette simulation qui servirait alors de base aux jugements perceptif. Par exemple, en percevant un objet, notre cerveau simulerait un geste d'atteinte et utiliserait le résultat de cette simulation pour juger du caractère atteignable ou non de celui-ci. On observe ainsi chez les adultes que

la calibration de la distance perçue comme étant directement atteignable par les participants est directement fonction des capacités d'action de l'organisme et de ses propriétés anthropométriques, dans ce cas précis, la longueur de leur bras (Carello & al, 1989 ; Coello & Ivanow, 2006).

Dans le domaine de la psychologie du développement, l'idée d'une primauté des informations sensori-motrices dans le développement cognitif est également plutôt ancienne (Piaget & Inhelder, 1966 ; Wallon, 1941). Les premières étapes du développement cognitif semblent en effet très largement dépendantes de la maturation, tant structurale que fonctionnelle, des systèmes sensoriel et moteur de l'individu. Un large corpus de données expérimentales montre que l'exploration des conséquences sensorielles de l'action et l'intégration des boucles de rétroactions perception-action permettent aux enfants dès le plus jeune âge d'acquérir les bases nécessaires à un développement cognitif normal ainsi que le développement et la maturation des facultés cognitives complexes. L'existence de périodes, qualifiées de critiques par les théoriciens du développement, montre également l'importance d'étudier le décours temporel de la mise en place des capacités de perception spatiale. En effet, même si les enfants sont capables de percevoir l'espace en fonction de leurs capacités motrices de manière précoce (Rochat, 1995, Rochat & Goubet, 1995 ; Gabbard, Cordova & Ammar, 2007), d'importants changements en fonction de l'âge ont été observés dans des tâches de jugements perceptifs (Jansen-Osman, Richter, Konczak, & Kalveram, 2002 ; Richez & Coello, 2010). Ces changements qualitatifs semblent dépendre de la maturation fonctionnelle des systèmes d'intégration sensori-motrice et sont observables dans différents domaines de la cognition (Thibaud & Toussaint, 2010 ; Moelenbreok & Van Galen 1989 ; Richez & Coello, 2011).

Il semble, dans ce contexte pertinent, d'étudier la dépendance de cette perception spatiale aux différentes capacités motrices et sensori-motrices au travers des différences entre une population d'enfants au développement normal et celui d'une population d'enfant et d'adolescents présentant un tableau clinique de troubles moteurs fonctionnels.

2. OBJECTIFS

L'objectif principal de cette étude est donc de proposer une étude détaillée et multifactorielle des liens entre la perception et l'action au sein de l'espace péripersonnel à 2 populations contrastées sur les aspects du développement sensori-moteur.

3. METHODE

3.1. Type d'étude

Ce projet s'inscrit dans le cadre d'une collaboration de recherche entre Chercheurs en Sciences Humaines et Sociales du groupe de recherche «Perception Action Cognition» de l'UPRES URECA EA1059 de l'Université de Lille 3 et le Centre de Référence des Troubles des Apprentissages (C.E.R.T.A) Nice, CHU Lenval.

Il s'agit d'une étude prospective, descriptive et non interventionnelle. Cette étude respecte le code de déontologie et d'éthique des psychologues et de la pratique médicale (aucun examen complémentaire n'est exigé, en dehors du recueil des données comportementales, psychométriques, démographiques telles que décrits dans le point 3.5).

3.2. Population

L'étude serait proposée à des enfants et adolescents suivis au CERTA de Nice, et présentant des troubles moteurs fonctionnels d'origine développementale. Ces enfants seraient comparés à un groupe d'enfant contrôle, appariés en âge, recrutés dans des établissements scolaires publics. Jusqu'à 50 enfants et adolescents présentant des troubles moteurs fonctionnels et un nombre équivalent d'enfants et d'adolescents pour le groupe contrôle seraient inclus lors de cette étude.

Critères d'inclusions du groupe cible :

(1a) Âge compris entre 6 et 20 ans.

(2a) Présentent un ou plusieurs domaines de difficultés, objectivés par le bilan d'un ou plusieurs thérapeutes spécialisés, parmi : trouble de l'intégration sensori-motrice / motricité fine / coordination visuo-manuelle / planification motrice / traitements visuospatiaux.

(3a) Vision normale ou corrigée à la normale

Critères d'inclusions du groupe contrôle :

(1b) Âge compris entre 6 et 20 ans.

(2b) Vision normale ou corrigée à la normale.

(3b) Ne présentent pas de domaines de difficulté au niveau de l'intégration sensori-motrice / motricité fine / coordination visuo-manuelle / planification motrice / traitements visuospatiaux nécessitant un suivi.

(4b) Appariement en âge, sexe avec les participants du groupe cible.

Critères d'exclusion pour les deux groupes :

(I) Antécédent de maladie psychiatrique ou neurologique lourde

(II) Déficit cognitif modéré à sévère objectivé par un bilan psychologique.

(III) Déficit attentionnel modéré à sévère objectivé par un bilan psychologique.

(IV) Déficits acquis : les difficultés présentes en (2a) pour les critères d'inclusion du groupe cible sont consécutives à un traumatisme crânien, un AVC ou une tumeur et ne sont pas d'origine développementale.

3.3. Lieu d'étude

Les passations expérimentales du groupe cible seront réalisées au domicile des participants dans le cadre des activités de soins et de prises en charge éducatives du CERTA ou dans les établissements scolaires où sont intégrés les participants. Les passations expérimentales du groupe contrôle seront réalisées dans les locaux de l'établissement scolaire dans le cadre de leurs fréquentations par les participants.

3.4. Procédure

Pour le groupe cible, le recrutement des participants se fera au sein de la population des enfants admis au CERTA et répondant aux critères d'inclusion de l'étude. Une discussion entre les différents coordonnateurs de l'étude sur cette population permettra d'établir une liste contenant jusqu'à une cinquantaine d'enfants et d'adolescents. Celui-ci sera ensuite soumis à l'acceptation d'une autorisation parentale.

Pour le groupe contrôle, une demande d'autorisation parentale pour la passation de ce protocole sera soumise via le personnel enseignant de l'établissement à un large échantillon d'enfants et d'adolescents pouvant répondre aux critères d'inclusion. Les effectifs du groupe contrôle seront sélectionnés au sein de la population ayant répondu favorablement à la demande d'autorisation parentale et qui répondent aux critères d'appariement avec le groupe expérimental.

3.5. Méthodologie utilisée

Il sera donc proposé dans le cadre de ce protocole aux participants une série de tâches et d'exercices pouvant nécessiter de réaliser des mouvements et gestes pour produire leurs réponses. Il ne s'agira pas ici de mettre les enfants de la population expérimentale en situation d'échec puisque la difficulté des différents exercices a été étudiée pour permettre un recueil de données pertinent eu égard aux objectifs de l'étude, mais néanmoins adaptée à la population. De manière générale les contraintes des différentes tâches sont en deçà des contraintes imposées par un bilan moteur et psychométrique complet ou des exigences scolaires

3.5.1. Tâche de mesure de la limite perçue de l'espace d'action

Dans cette tâche, nous nous intéressons à l'influence des compétences motrices sur la perception spatiale. Il s'agit ici d'estimer la distance perçue par le sujet comme étant atteignable avec un mouvement simple du bras sans que le sujet ne réalise effectivement de geste d'atteinte vers les cibles présentées. Cette mesure sera effectuée à l'aide d'une méthode psychophysique de mesure de seuil.

3.5.1.1. Matériel et Stimuli

La cible est un point vert (diamètre =16 mm) présenté à différentes distances sur un moniteur LCD placé horizontalement devant le participant. Les cibles sont affichées à l'aide du logiciel E-prime2 et d'un ordinateur portable. Un total de 33 cibles ont été créées, disposées tous les 12 mm, pour une amplitude totale de 38.4 cm.

Les réponses des participants sont collectées à l'aide d'une souris, tenue de la main droite durant toute la tâche. Les réponses OUI et NON ont été attribuées aux 2 boutons de la souris (OUI à gauche et NON à droite).

3.5.1.2. Design et procédure

Les participants sont assis devant un écran d'ordinateur disposé horizontalement devant eux dans le sens de la longueur. La position de l'écran est ajustée par rapport au participant pour que l'axe central du moniteur corresponde à son axe sagittal et que la cible centrale de la série corresponde à la distance maximale réellement atteignable par le participant. L'ajustement de l'écran est fait juste avant le début de la passation, lorsque le participant est invité à fermer les yeux et que l'expérimentateur tend de manière passive le bras droit du sujet en mesurant la longueur. Les participants sont invités à garder durant toute la durée de la tâche leurs mains sur leurs genoux.

Une position standardisée est définie pour l'ensemble des participants en fixant la distance verticale entre la table et les yeux du participant ainsi que la distance horizontale entre la table et les épaules du participant à 35 cm.

Durant le briefing, l'expérimentateur vérifie que le participant est habitué à l'utilisation d'un ordinateur et d'une souris. Celui-ci est alors informé sur la procédure globale de l'expérience. L'expérimentateur l'informe qu'une série de points verts va lui être présentée à des distances diverses sur l'écran placé devant lui. Les consignes sont de dire si OUI ou NON le participant se juge capable de toucher la cible avec l'index de la main droite en tendant le bras sans décoller le dos de la chaise (méthode adaptée de Carello & al , 1989).

Les cibles sont présentées aléatoirement, une à la fois, et le participant donne ses réponses à l'aide de la souris en utilisant sa main droite. Une fois la réponse du participant enregistrée, la cible disparaît et est remplacée par une autre, à une distance différente. Chaque cible est présentée 4 fois, pour un total de 132 essais.

Durant toute la durée de la tâche, les participants ne sont pas autorisés à vérifier le caractère atteignable ou non des cibles en tendant le bras et/ou en se penchant. Les participants sont informés durant la présentation des consignes qu'ils doivent répondre rapidement. Celles-ci sont répétées régulièrement sous différentes formes, en tout ou partie, pour s'assurer d'une part qu'elles sont clairement comprises par les participants et d'autre part pour prévenir un oubli durant la passation. La présentation des cibles et le recueil des réponses sont faits à l'aide du logiciel matlab.

3.5.2. Tâche d'amorçage Visuo-Moteur

Dans cette tâche nous nous intéressons à l'influence de l'activation motrice accompagnant la perception d'objets dans l'environnement. Le principe de la tâche est de déterminer si un amorçage du geste d'atteinte est observé lors de la présentation d'une cible visuelle. Durant une tâche de discrimination perceptive, on demandera aux participants de saisir rapidement une clé de réponse proximale ou distale pour répondre à un jugement sur la couleur d'une cible visuelle. Cet effet d'amorçage serait visible sur les temps de réaction pour déclencher la réponse motrice. Des recherches précédentes ont permis de montrer chez l'adulte comment la vision d'un objet pouvait amorcer des mouvements d'atteinte et de saisie compatibles avec ces objets (Tucker & Ellis, 2003 et Olivier, 2006).

3.5.2.1. Matériel et Stimuli

La présentation des stimuli est faite sur un moniteur placé à 50 cm du participant, parallèle à son plan frontal. Le dispositif de réponse, construit spécifiquement pour cette étude, est placé sur la table devant le participant. Il est composé d'une planche en bois carrée de 30cm de côté sur laquelle sont placés 3 boutons le long de l'axe sagittal médian. Le bouton le plus proche du participant sert de position de départ pour chaque essai. Les 2 boutons restants servant à donner une réponse en utilisant un geste de saisie proximale ou distale.

Une série de 8 photographies représentant une scène visuelle réelle d'un échiquier ont été utilisées comme stimuli. L'angle de vue de la scène est ajusté pour correspondre à la vue d'une personne assise à 35 cm de la table, et dont les yeux se situeraient à 35 cm au-dessus du plan de la table. Une pièce d'un jeu d'échec (un fou), noire ou blanche, a été positionnée sur la table de la scène. Quatre positions différentes de pions ont été définies sur la table (2 positions proximales et 2 positions distales). Les prises de vue ont été réalisées en collaboration avec le Centre Audio Visuel de l'Université de Lille-3 (CAVUL). Les cibles sont présentées et les réponses sont enregistrées à l'aide du logiciel matlab et d'un ordinateur portable.

3.5.2.2. Design et procédure

Le participant est invité à placer sa main droite sur la position de départ et à laisser sa main gauche sur la table. À partir de cette position, les participants peuvent effectuer 2 types de réponses manuelles : une réponse proximale qui consiste en un appui sur le bouton le plus proche de lui et une réponse distale qui consiste en un appui sur le bouton le plus éloigné de lui. Le participant est autorisé à ajuster sa position par rapport au dispositif de réponse de manière à pouvoir confortablement effectuer ces 2 types de réponses. Au début de chaque essai, l'appui sur le bouton en position de départ déclenche l'apparition des stimuli. 500 ms après que le sujet ait appuyé sur le bouton, une photographie de la table sans aucune pièce est affichée. Au bout de 500 ms une croix de fixation apparaît également sur cette photographie, et le participant est invité à fixer la croix tout en continuant de laisser sa main en appui sur la position de départ. La croix de fixation est placée sur la photographie du plateau d'échec à la même localisation que la position de départ sur le boîtier réponse. Après un délai aléatoire compris entre 500 et 1500 ms le stimulus cible apparaît avant de disparaître.

La tâche du sujet est de répondre le plus rapidement possible sur la couleur de la cible en allant appuyer sur l'un ou l'autre des boutons du dispositif de réponse. Un message d'erreur est délivré par le programme si jamais le participant a relâché la position de départ avant que la cible n'apparaisse ou que la réponse donnée est fautive. L'expérience débute avec un protocole d'entraînement pour familiariser les participants avec la procédure et le dispositif de réponse.

Le programme de l'expérience permet d'enregistrer une mesure des Temps de Réaction (TR) correspondant au délai entre l'apparition de la cible et le relâchement de la position de départ, ainsi que les Temps de Mouvement (TM) correspondant au délai entre le relâchement de la position de départ et l'appui sur une des 2 clés de réponses. Le profil d'erreur par catégorie de réponse est également mesuré. Cinq répétitions des 8 stimuli sont effectuées pour un total de 40 essais. Le programme permet de représenter les stimuli pour lesquels le sujet a commis une erreur (anticipation ou mauvaise réponse) ou, après une première présentation de la série de stimuli, pour laquelle son TR est en dehors de l'intervalle de plus ou moins 2 écarts-types à partir de la moyenne dans chaque condition. À l'issue de la passation, les données recueillies comprendront donc une série de mesure ayant abouti à une bonne réponse pour chacun des stimuli.

3.5.3. Tâche de test de Confort à l'état terminal

Cette épreuve vise à évaluer à l'aide de plusieurs exercices simples si le participant est capable de planifier un mouvement séquentiel en prenant en compte l'état terminal de son corps après l'exécution de celui-ci. Il s'agit donc dans cette tâche de mesurer la présence ou non d'un effet appelé « Effet du confort à l'état terminal ou End State Comfort Effect » (Thibaut & Toussaint, 2009 ; Adalbjornson, Fischman & Rudissil, 2008). Pour cela différents petits exercices sont proposés aux participants : pointage avec le bâton, pointage avec le crayon, traçage avec le crayon et enfin précision visuomotrice avec le crayon.

3.5.3.1. Matériel et Stimuli

Le matériel est constitué d'un bâton en bois de 20 cm de long environ pour 4 cm de large, coloré en rouge ou en bleu sur les 5 derniers cm de chaque extrémité, d'un crayon de

couleur bicolore aux dimensions similaires. Ces 2 dispositifs sont placés au début de chaque essai sur des supports en bois permettant au participant d'avoir l'opportunité de saisir l'outil avec une prise en pronation ou en supination (i.e paume vers le haut lors de la saisie de l'outil ou au contraire paume vers le bas). Différentes feuilles de papier sont également utilisées en fonction des exercices. Pour l'exercice de pointage avec le bâton, 2 cercles, un blanc l'autre noir, sont imprimés de part et d'autre de la feuille. Pour les exercices de pointage et traçage avec le crayon, une feuille vierge est utilisée. Enfin pour l'exercice de précision visuomotrice une souris est dessinée dans le coin inférieur gauche d'une feuille et un morceau de fromage dans le coin supérieur droit, les 2 dessins sont reliés par une allée sinueuse (environ 15 cm de long pour 4 mm de large).

3.5.3.2. Design et procédure

Les participants sont assis à côté de l'expérimentateur qui leur présente le dispositif et la tâche en mentionnant, les feuilles, le bâton, le crayon et les 2 couleurs aux extrémités. Pour cette tâche l'expérimentateur indique aux participants qu'ils auront à réaliser 4 petits exercices, présentés dans un ordre aléatoire.

Pour l'exercice de pointage avec le bâton, les participants sont informés qu'ils auront à se saisir de l'outil fermement avec la main droite et à poser le bâton de manière à ce qu'une de ses extrémités (spécifié à chaque essai) sur l'un ou l'autre des disques colorés de manière à ce que le bâton soit stable puis à se replacer en position de départ en évitant de manipuler plus avant l'outil. 4 types d'essais (bleue sur blanc, rouge sur blanc, bleue sur noire et rouge sur noir) * 2 positions de l'outil * 5 répétitions pour un total de 40 essais.

Pour l'exercice de pointage avec le crayon, les participants sont invités à se saisir du crayon fermement avec la main droite et de tracer un point sur la feuille avec comme seule contrainte la couleur du point à tracer (spécifié à chaque essai). De même dans l'exercice de Traçage avec le crayon, les participants sont invités à saisir le crayon fermement avec la main droite et de tracer un segment de droite sur la feuille avec à nouveau comme seule contrainte la couleur du point à tracer (spécifié à chaque essai). Pour ces 2 exercices, nous avons 2 types d'essais (rouge ou bleue) * 2 positions de l'outil * 5 répétitions pour un total de 20 essais.

Pour l'exercice de précision visuomotrice avec le crayon, l'expérimentateur informe les participants qu'ils doivent tracer une ligne permettant de rejoindre la souris au morceau de

fromage avec comme double contrainte la couleur de la ligne à tracer (spécifiée à chaque essai) et celle de ne pas dépasser du chemin délimité par les bords de l'allée. 2 types d'essai * 2 positions de l'outil * 3 répétitions pour un total de 12 essais.

Pour chacun des exercices, au début de chaque essai les participants sont invités à adopter une position de départ avec les mains sur les cuisses. Avant chaque essai, l'outil est replacé sur les supports en bois avec l'extrémité bleue placée sur le côté droit et l'extrémité rouge sur le côté gauche dans 50 % des essais pour éviter un conditionnement du type de saisie en fonction de la couleur spécifiée. 2 sortes d'essais sont proposées, pointage/traçage avec l'extrémité bleue et pointage/traçage avec l'extrémité rouge. Les instructions de l'expérimentateur indiquent aux participants à chaque essai quelle extrémité de l'outil il aura à utiliser. Les instructions sont répétées jusqu'à ce qu'il soit clair pour l'expérimentateur qu'elles ont été comprises par le participant.

Le recueil des réponses consiste pour chacun des essais à noter si l'outil a été saisi avec une prise en pronation (paume dirigée vers le bas) ou en supination (paume vers le haut). Pour chaque type d'essai, une saisie est considérée comme réussie si l'état terminal du mouvement est une position naturelle et confortable. Par exemple dans la tâche de pointage avec le bâton, un essai réussi correspond à une prise en supination (paume le haut) pour un essai avec l'extrémité bleue de l'outil placée sur le côté gauche et où le participant doit pointer avec la couleur bleue.

3.5.4. Tâche d'Imagerie Motrice

Cette épreuve vise à mesurer les performances des mécanismes d'Imagerie motrice, c'est-à-dire de la manipulation explicite de représentation motrice. Il s'agit de calculer les corrélations entre un temps de mouvement pour réaliser un geste dont on contrôle les paramètres et le temps mis pour simuler mentalement le même geste.

3.5.4.1. Matériel et Stimuli

Le matériel consiste simplement ici en un crayon et une série de feuilles de papier sur lesquelles sont imprimées les cibles utilisées durant la tâche. Pour chaque essai une feuille au format A5 est présentée aux participants, un rectangle dont la longueur est alignée avec la

longueur de la feuille est imprimé au centre de celle-ci. 5 longueurs et 2 largeurs de rectangle différentes sont utilisées. Deux exemplaires de chacune des cibles sont utilisés de la tâche pour un total de 20 par condition (Exécutée et Imaginée).

3.5.4.2. Design et procédure

Dans les 2 conditions, le participant est invité à placer son stylo en position de départ, c'est-à-dire sur un endroit quelconque de la largeur inférieure du rectangle.

Dans la condition Exécutée, au début de chaque essai l'expérimentateur donne verbalement le signal de départ (« TOP »). Les consignes données au début de chaque essai invitent le participant à rejoindre le plus vite possible, et sans dépasser les bords, la largeur supérieure du rectangle. Le participant donne alors un rapport verbal (« TOP ») lorsqu'il franchit la ligne afin de l'entraîner, de préparer la passation et de pouvoir comparer les 2 conditions entre elles. Le participant est invité à maintenir son crayon appuyé sur la feuille de manière laisser une trace visible de la trajectoire de son mouvement. Les différents essais sont présentés dans un ordre aléatoire. Les essais où le participant dépasse

Dans la condition Imaginée, le participant est invité à se préparer en plaçant le stylo sur la position de départ et à se préparer de la même manière que dans la condition Exécuté. Le participant est invité à simuler mentalement le même mouvement qu'il a fait auparavant (traverser le rectangle avec le stylo le plus vite et le plus précisément possible). Les consignes insistent sur l'aspect visuel et kinesthésique de la simulation. Le participant est invité à donner un rapport verbal de la fin de son mouvement d'une manière similaire à la condition Exécuté. Les essais sont présentés dans un ordre aléatoire. Au préalable, le concept d'imagerie motrice est longuement explicité par l'expérimentateur à l'aide d'exemple pour s'assurer de la compréhension de la tâche et des consignes par le participant.

Les Temps de Mouvement (TM) de chaque cible sont recueillis par un expérimentateur entraîné à ce type de procédure à l'aide d'un programme. Dans la condition Exécutée, les TM sont mesurés depuis le signal de départ donné par l'expérimentateur jusqu'au moment où le participant passe la ligne représentant la largeur supérieure de la cible. Dans la condition Imaginée les MT de chaque cible sont mesurés depuis le signal de départ donné par l'expérimentateur jusqu'au rapport verbal du participant sur la fin de son mouvement.

3.5.5. Bilan psychométrique

Ce protocole prévoit également l'inclusion des données psychométriques issues des bilans réalisés par les neuropsychologues ainsi que celles issues des bilans réalisés par les différents thérapeutes du C.E.R.T.A ayant suivi les enfants et adolescent du groupe cible. Ces bilans standardisés auront été effectués préalablement à l'inclusion des participants à l'étude, dans le cadre de leur prise en charge au sein du C.E.R.T.A. L'ensemble des participants aura ainsi été soumis aux mêmes tests (ou à des versions équivalentes des mêmes échelles adaptées à l'âge des participants).

Les participants du groupe contrôle seront également appariés sur la base des scores obtenus à des subtests issus des batteries neuropsychologiques de la WISC IV (cube, matrice et vocabulaire) et la NEPSY II (flèches et précision visuomotrice). Il sera réalisé dans le but d'apparier les 2 populations sur des critères d'efficacité cognitive générale dans des domaines ne relevant pas des déficits moteurs fonctionnels mis en évidence dans les critères d'inclusions. Il s'agira également de vérifier l'absence de déficit visuospatial chez les participants.

Les tests utilisés lors des bilans et pour l'appariement de la population contrôle seront donc bien évidemment des outils normés et reconnus comme valides par rapport au critère d'âge des participants.

4. TRAITEMENT DES DONNEES

4.1. Gestion des données

L'ensemble des données sera recueilli par le coordonnateur principal de l'étude (RICHEZ Aurélien) et sera traité de manière anonyme. Un code d'inclusion sera attribué à chaque participant lors de son inclusion et le traitement des données réalisé ainsi que la publication des éventuels résultats ne rendra donc compte que des données démographiques pertinentes à la compréhension et l'exploitation des résultats. L'identité et les informations personnelles dont le coordonnateur principal de l'étude pourra avoir connaissance ne seront pas inscrites ni stockées sous quelque forme que ce soit.

4.2. Analyse des données

L'analyse des données recueillies sera effectuée en fonction des différentes tâches du présent protocole.

Pour la tâche d'atteignabilité la distance maximale perçue comme étant atteignable par le participant (seuil subjectif d'atteignabilité) est déterminée par une méthode de régression par maximum de vraisemblance permettant d'obtenir le modèle qui s'ajuste le mieux avec les réponses du participant pour les 33 positions de la cible.

Nous utilisons pour cela l'équation suivante : $y = e^{(\alpha+\beta x)} / (1 + e^{(\alpha+\beta x)})$

Où y est la réponse du participant, x est la distance de la cible, $-\alpha / \beta$ la valeur critique de x pour laquelle la probabilité des 2 réponses est équivalente ($P(\text{OUI})=P(\text{NON})=0.5$) exprimant ainsi le seuil subjectif perçue comme étant atteignable, et $\beta/4$ est la mesure de la pente au point d'abscisse. $-\alpha / \beta$. Une pente forte indique une meilleure discrimination entre les 2 types de réponses.

Toutes les valeurs de seuil sont exprimées en pourcentage de la longueur du bras du sujet pour représenter les capacités d'actions propres à chaque participant. Une valeur positive représentant une surestimation de la distance perçue comme atteignable (un participant pensant pouvoir une cible présentée en réalité trop loin) et une valeur négative une sous-estimation. Les données sont ensuite analysées à l'aide d'une Analyse de Variance (ANOVA) en fonction des groupes expérimentaux.

Pour la tâche d'amorçage visuo-moteur les résultats seront analysés selon les conditions en fonction des catégories de stimuli présentées pour regrouper les bonnes réponses du participant en fonction du caractère congruent ou non des propriétés des stimuli présentés (proximal vs distal) avec celle du geste de réponse effectuée par le participant (proximal vs distal). Il s'agit alors de déterminer statistiquement s'il existe un avantage significatif en situation de congruence par rapport à une situation d'incongruence et ce sur les différentes variables étudiées (Temps de Réaction, Temps de Mouvement et profil d'erreur. Cet effet d'amorçage sera analysé (ANOVA) en fonction des différentes conditions expérimentales d'âge, de groupe (contrôle vs Troubles moteurs fonctionnels).

Pour la série d'exercices de manipulation d'objet on calculera en fonction de la prise (pronation ou supination) le pourcentage de saisie réussie. D'après la littérature sur l'effet de confort terminal (Adalbjornson, 2008 ; Thibaud & Toussaint, 2010) on se basera sur la réussite aux essais de supination (paume vers le haut ou « undergrip ») pour conclure sur la présence ou non de l'effet chez les participants.

Pour la tâche d'imagerie motrice les temps de réaction moyens pour chaque cible seront analysés à l'aide d'une ANOVA 2 (conditions) * 2 (largeurs) * 2 (longueurs). L'utilisation d'une stratégie d'imagerie motrice résultant d'une véritable simulation de l'action impliquerait une absence d'effet de la condition sur le TM. Nous nous attendons à vérifier des résultats classiques avec la présence dans la condition Exécutée d'un effet de la largeur et de la longueur des cibles (Fitts, 1954). De plus la simulation mentale de l'action devrait provoquer les mêmes variations de performance dans les 2 conditions, à savoir un effet de la longueur et de la largeur des cibles sur les temps de mouvements.

Différentes analyses statistiques descriptives et inférentielles (ACP, analyses multidimensionnelles, ANCOVA...) seront également réalisées sur l'ensemble des données recueillies lors des passations expérimentales et des bilans psychométriques. Ces analyses seront réalisées en fonction de la taille des groupes et de la nature des déficits des différents participants du groupe expérimental. L'objectif sera d'essayer de dégager les profils comportementaux des participants et d'isoler statistiquement les facteurs déterminants les performances des participants dans les différentes tâches.

4.3. Finalité de l'étude

La finalité de l'étude la mise en évidence des différences de performances dans les différentes tâches du protocole. Des différences sur une ou plusieurs variables dépendantes des tâches expérimentales permettront d'identifier les composantes déterminant une perception spatiale adaptée. Ce protocole permettra également de mettre à jour des données expérimentales permettant de mieux connaître et catégoriser la population cible et dévaluer l'influence des troubles moteurs dans le développement des habiletés perceptivo-motrices.

5. ASPECTS REGLEMENTAIRES ET ETHIQUES

L'étude sera conduite conformément :

- aux principes éthiques de la déclaration d'Helsinki de 1964 révisée à Edimbourg en 2000,
- à la loi n° 2004-801 du 6 août 2004 relative à la protection des personnes physiques à l'égard des traitements de données à caractère personnel et modifiant la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés,
- à la loi de Santé Publique (Lois n° 2004-806 du 9 août 2004 et 2006-450 du 18 avril 2006).

5.1. Confidentialité

Selon le Code de la Santé Publique, toutes les personnes appelées à collaborer ou à prendre connaissance de l'étude sont tenues au secret professionnel.

5.2. Déclaration(s) réglementaire(s)

Le participant sera informé par écrit de la nature et de l'objectif de l'étude, ainsi que de son droit d'accès, d'opposition et de rectification des données enregistrées à l'occasion de cette étude. Ce droit pouvant s'exercer à tout moment auprès du chercheur observateur.

5.3. Information et consentement

La participation des enfants à l'étude sera conditionnée à l'obtention d'un consentement éclairé des parents à l'issue d'une présentation des objectifs et des modalités de la recherche. Les volontaires à la participation au protocole de recherche ne seront pas contraints de quelque manière que ce soit à leur participation réelle à l'étude. Ils seront libres d'interrompre à tout moment leur participation sans avoir à se justifier. Ils pourront également avoir accès aux conclusions de l'étude lorsque celle-ci sera terminée.

5.4. Propriétés des données et publication

Les résultats feront l'objet d'un rapport d'activités transmis à l'ensemble des partenaires du projet. Toute publication ou communication orale sur cette étude devra faire l'objet d'un accord préalable avec les Promoteurs et les Investigateurs principaux du projet. Les promoteurs et investigateurs principaux s'engagent à associer l'ensemble des partenaires (centres participants et financeurs) dans toutes actions de valorisation et de communications, publications de l'étude.

5.5. Archivage des données

Les formulaires de recueil des données expérimentales, médicales, démographiques ainsi que les questionnaires utilisés pour la recherche seront archivés par le laboratoire URECA au sein de l'université de Lille 3, pendant 10 ans.

6. DUREE DE L'ETUDE ET ECHEANCIER

Calendrier prévisionnel

De Juillet 2012 à Septembre 2012 : montage du projet avec les différents partenaires.

De Septembre 2012 à Janvier 2013 : inclusion des participant des groupes expérimentaux et contrôles.

De Janvier 2013 à Janvier 2014 : traitement des données, analyse des résultats et rédactions des publications scientifiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- Adalbjornson, C. F., Fischman, M.G., & Rudissil, M. E. (2008). The end state confort effect in young children. *Research Quarterly for exercise and sport*, **79**(1), 36-41.
- Carello, C., Groszofshy, A., Reicher, F. D., Solomon, H. Y., Turvey, M. T. (1989). Visually perceiving what is reachable. *Ecological Psychology*, **4**(1). 1-16.
- Coello, Y., Delevoeye-Turrell, Y. (2007). Embodiement, space categorisation and action. *Consciousness and Cognition*, **16**, 667-683.
- Coello, Y., & Iwanow, O. (2006). The effect of structuring the workspace on cognitive and sensorimotor distance estimation: no dissociation between perception and action. *Perception and Pychophysics*, **68**(2), 278-289.
- Gabbard, C., Cordova, A., & Ammar, D. (2007). Estimation of reach in peripersonal and extrapersonal space: a developmental view. *Developmental Neuropsychology*, **32**(3), 1-8.
- Grafton, S. T., Fadiga, L., Arbib, M. A., & Rizzolatti, G. (1997). Premotor cortex activation during observation and naming of familiar tools. *Neuroimage*, **6**, 231-236.
- Hurley, S. (2001). Perception and action: alternative views. Adapted from *Consciousness in action* by Susan Hurley. Copyright 1998 by the President and Fellows of Harvard College. Reprinted by permission of Harvard University
- James,W. (1891). *The Principles of Psychology*. London: Macmillan.
- Jansen-Osman, P., Richter, S., Konczak, J., & Kalveram, K. T. (2002). Force adaptation transfers to untrained workspace regions in children: evidence for developing inverse dynamic motor models. *Experimental Brain Research*, **142**, 212-220.
- Jeannerod, M., & Jacob, P. (2005). Visual cognition: a new look at the two-visual systems model. *Neuropsychologia*, **43**, 301-312.
- Miall, R. C., & Wolpert, D. M. (1996). Forward model for physiological motor control. *Neural Networks*, **9**(6), 1265-1279.
- Meulenbroek, R. G., & Van Gallen, G. P. (1988). The acquisition of skill handwriting: Discontinuous trends in kinematics variables. In A. M. Colley & J. R. Beechs Eds., *Cognition and Action in Skill Behavior*, pp273-281. Amsterdam: North Holland.
- Olivier, G. (2006). Visuomotor Priming of a manual reaching movement during a perceptual task, *Brain Research*, **1124**, 81-85.
- Piaget, J. & Inhelder, B. (1966). *La psychologie de l'enfant*. Presse Universitaire de Fance (Ed).
- Poincaré, H. (1902). *La science et l'hypothèse*, Paris : Flammarion.
- Previc, F. H. (1998). The neuropsychology of 3-D space. *Psychological Bulletin*, **124**(2), 123-164.
- Richez, A., & Coello, Y. (2010). Covert actions and the perceived boundaries of peripersonal space in children, poster presented of the European Conference on Visual Perception (EVP 2010), Lausanne.
- Richez, A., & Coello, Y. (2011). Spatial Perception and Motor Skills in children, oral presentation at the Iberian Congress on Perception (ICP 2011), Palma de Mallorca.
- Rochat, P. (1995). Perceived reachability for self and other by 3-to 5-years old children and adults. *Journal of Experimental Child Psychology*, **59**, 317-333.

- Rochat, P., & Goubet, N. (1995). Development of sitting and reaching in 5-to 6- month old infants. *Infant Behavior and Development*, **18**, 53-68.
- Schütz-Bosbach,S., & Prinz , W. (2007). Perceptual resonance: action-induced modulation of perception, *Trends In Cognitive Science*, **11**(8), 349-355.
- Thibaut, J. P., & Toussaint, L. (2009). Developping motor planning over ages. *Journal of Experimental Child Psychology*, **105**, 116-129.
- Tucker, M., & Ellis, R. (2004). Action Priming by briefly presented object. *Acta Psychologica*, **116**, 185-203.
- Wallon,H . (1941). *L'évolution psychologique de l'enfant*.Paris: Armand Collin.

ANNEXE 1 : LETTRE D'INFORMATION A DESTINATION DES PARENTS D'ENFANTS MINEURS

Un projet de recherche sur la perception de l'espace est actuellement réalisé au sein de l'université Lille 3. Ce projet vise à explorer les liens au cours du développement entre les capacités motrices des enfants et adolescents et leurs capacités à percevoir leur environnement spatial. À cette occasion nous vous demandons l'autorisation de faire participer votre enfant à cette étude.

L'étude consiste en une série de plusieurs exercices, simples et construits spécifiquement pour cette recherche. Les exercices proposés sont des tâches informatisées ou des tests papier crayon, de courtes durées, ne présentant aucun danger physique ou psychologique pour les participants et n'ayant pas pour but de les mettre en difficulté. Ces exercices seront réalisés au domicile, au sein de l'établissement scolaire de l'enfant ou dans les locaux du CERTA et en présence des thérapeutes et des encadrants habituels des enfants pour une durée totale n'excédant pas quatre fois 5 min au total.

Si vous acceptez la participation de votre enfant à cette étude, vous gardez bien entendu la possibilité d'interrompre la participation de votre enfant à tout moment, et ce sans avoir à vous justifier. Vous aurez également la possibilité d'avoir accès aux conclusions de l'étude lorsque celle-ci sera terminée.

Cette recherche est réalisée sous la direction de Yann Coello professeur de psychologie de l'université de Lille. Elle sera supervisée par Aurélien RICHEZ Psychologue et doctorant en psychologie, en collaboration avec Jérôme BIANCHI, Oriane COSITINI et Isabelle CARANTA, psychologues du CERTA, ainsi que les docteur Catherine FOSSOUD et Christian RICHELME, neuropédiatre au CERTA.

Dans le cadre de cette recherche à laquelle nous proposons à votre enfant de participer, un traitement de vos données personnelles sera mis en œuvre pour permettre d'analyser les résultats de la recherche au regard de l'objectif qui vous a été présenté. À cette fin, les données concernant votre enfant seront transmises au Promoteur de la recherche. Ces données seront identifiées par un numéro de code pour garder les données strictement anonymes et confidentielles. Conformément aux dispositions de loi relative à l'informatique aux fichiers et aux libertés, vous disposerez d'un droit d'accès et de rectification. Vous disposerez également d'un droit d'opposition à la transmission des données, qui seront couvertes par le secret professionnel. Ces données seront susceptibles d'être utilisées dans le cadre de cette recherche et d'être traitées en vue d'une publication dans des revues scientifiques.

Je me tiens également personnellement disponible pour toute demande d'information supplémentaire que vous pourriez avoir.

RICHEZ Aurélien

06.32.58.24.39 / aurelien.richez@univ-lille3.fr

**ANNEXE 2 : CONSENTEMENT DE PARTICIPATION A DESTINATION DES PARENTS
D'ENFANTS MINEURE**

Mr /Mme / Mlle Nom :

Prénom :

Adresse :.....

Tél. :

Il m'a été proposé de faire participer mon enfant ,
né le à une étude sur la perception de l'espace.

L'investigateur m'a précisé que je suis libre d'accepter ou de
refuser.

Afin d'éclairer ma décision, j'ai reçu et compris les informations suivantes :

1) Je pourrai à tout moment interrompre la participation de mon enfant si je le désire, sans
avoir à me justifier.

2) Je pourrai prendre connaissance des résultats de l'étude dans sa globalité lorsqu'elle
sera achevée.

3) Les données recueillies demeureront strictement confidentielles.

Les données me concernant feront l'objet d'un traitement informatisé conformément à
la loi n° 2004-801 du 6 août 2004 relative à la protection des personnes physiques à
l'égard des traitements de données à caractère personnel et modifiant la loi n° 78-17
du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés.

Compte-tenu des informations qui m'ont été transmises : <i>cocher les cases appropriées en fonction de votre volonté (OUI / NON)</i>	OUI	NON
1) J'accepte librement et volontairement de faire participer mon enfant à la recherche	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Code inclusion :

Date :

Date :

Signature du ou des parent(s):

Signature de l'investigateur:

Initiales parent:

Initiales proposant

ANNEXE 3 : LETTRE D'INFORMATION A DESTINATION DES PARTICIPANTS MAJEURES

Un projet de recherche sur la perception de l'espace est actuellement réalisé au sein de l'université Lille 3. Ce projet vise à explorer les liens au cours du développement entre les capacités motrices des enfants, adolescent et jeunes adultes et leurs capacités à percevoir leur environnement spatial. A cette occasion nous vous demandons l'autorisation de participer à cette étude.

L'étude consiste en une série de plusieurs exercices, simples et construits spécifiquement pour cette recherche. Les exercices proposés sont des tâches informatisés ou des tests papier-crayon, de courtes durées et ne présentant aucun danger physique ou psychologique pour les participants et n'ayant pas pour but de les mettre en difficulté. Ces exercices seront réalisés au domicile, au sein de l'établissement scolaire en cas de scolarisation ou dans les locaux du CERTA et en présence des thérapeutes et des encadrants habituels pour une durée totale n'excédant pas quatre fois 5 min au total.

Si vous acceptez de participer à cette étude, vous gardez bien entendu la possibilité d'interrompre votre participation à tout moment, et ce sans avoir à vous justifier. Vous aurez également la possibilité d'avoir accès aux conclusions de l'étude lorsque celle-ci sera terminée.

Cette recherche est réalisée sous la direction de Yann Coello professeur de psychologie de l'université de Lille. Elle sera supervisée par Aurélien RICHEZ Psychologue et doctorant en psychologie, en collaboration avec Jérôme BIANCHI, Oriane COSITINI et Isabelle CARANTA, psychologues du CERTA, ainsi que les docteur Catherine FOSSOUD et Christian RICHELME, neuropédiatre au CERTA.

Dans le cadre de cette recherche à laquelle nous proposons de participer, un traitement de vos données personnelles sera mis en œuvre pour permettre d'analyser les résultats de la recherche au regard de l'objectif qui vous a été présenté. A cette fin, les données vous concernant seront transmises au Promoteur de la recherche. Ces données seront identifiées par un numéro de code pour garder les données strictement anonymes et confidentielles. Conformément aux dispositions de loi relative à l'informatique aux fichiers et aux libertés, vous disposerez d'un droit d'accès et de rectification. Vous disposerez également d'un droit d'opposition à la transmission des données, qui seront couverte par le secret professionnel. Ces données seront susceptibles d'être utilisées dans le cadre de cette recherche et d'être traitées en vue d'une publication dans des revues scientifiques.

Je me tiens également personnellement disponible pour toute demande d'information supplémentaire que vous pourriez avoir.

RICHEZ Aurélien

06.32.58.24.39 / aurelien.richez@univ-lille3.fr

ANNEXE 4 : CONSENTEMENT DE PARTICIPATION A DESTINATION DES PARTICIPANTS

MAJEURES

Mr /Mme / Mlle Nom :

Prénom : Date de naissance

Adresse :

Tél. :

Il m'a été proposé de participer à une étude sur la perception de l'espace.

L'investigateur m'a précisé que je suis libre d'accepter ou de refuser.

Afin d'éclairer ma décision, j'ai reçu et compris les informations suivantes :

- 1) Je pourrai à tout moment interrompre ma participation si je le désire, sans avoir à me justifier.
- 2) Je pourrai prendre connaissance des résultats de l'étude dans sa globalité lorsqu'elle sera achevée.
- 3) Les données recueillies demeureront strictement confidentielles.

Les données me concernant feront l'objet d'un traitement informatisé conformément à la loi n° 2004-801 du 6 août 2004 relative à la protection des personnes physiques à l'égard des traitements de données à caractère personnel et modifiant la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés.

Compte-tenu des informations qui m'ont été transmises : <i>cocher les cases appropriées en fonction de votre volonté (OUI / NON)</i>	OUI	NON
1) J'accepte librement et volontairement de participer à la recherche	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Code inclusion : [] [] [] [] [] []

Date : [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] []

Date : [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] []

Signature du participant :

Signature de l'investigateur:

Initiales participant:

Initiales proposant