

Université Lumière Lyon 2
INSTITUT DE PSYCHOLOGIE
Thèse de Psychologie (mention psychologie cognitive)
(Doctorat nouveau régime : arrêté ministériel du 30 mars 1992)

Perception, représentation et planification de l'action dans l'organisation syntaxique de l'exécution de dessins complexes

Sous la direction de : Pr. Annie MAGNAN
Soutenue le 24 Juin 2004

Membres du jury : Annie Magnan Professeur à l'Université Lyon 2, directeur de thèse. Yvette Hatwell Professeur émérite à l'Université Grenoble 2, rapporteur. René Baldy Professeur à l'Université Montpellier 3, rapporteur. Rémy Versace Professeur à l'Université Lyon 2. Edouard Gentaz Chargé de Recherche CNRS à l'Université Paris 5.

Table des matières

INTRODUCTION . .	4
Partie I : section théorique . .	7
Chapitre 1. L'organisation syntaxique dans les activités graphiques . .	7
1. L'organisation syntaxique du tracé de patterns graphiques . .	7
2. Les règles graphiques automatisées . .	12
3. Les règles graphiques représentationnelles fonctionnelles . .	16
Chapitre 2. Représentation et planification de l'action dans la résolution de problèmes . .	27
1. Le système mnésique, support des représentations . .	27
2. Représentation, planification de l'action et développement cognitif . .	38
Chapitre 3. L'encodage et l'intégration des informations visuo-spatiales en perceptions visuelle et haptique . .	45
1. Bases anatomo-fonctionnelles des modalités visuelle et haptique . .	45
2. Propriétés fonctionnelles des systèmes visuel et haptique dans le traitement des informations visuo-spatiales . .	53
3. La perception des caractéristiques visuo-spatiales en modalités visuelle et haptique . .	59
Chapitre 4. Le format de stockage des informations visuo-spatiales . .	66
1. Imagerie visuelle en perceptions visuelle et haptique . .	66
2. L'incidence du statut visuel dans l'émergence des représentations visuelles . .	72
3. Codages imagé et verbal dans le stockage des informations visuo-spatiales . .	79
Partie II. Section expérimentale . .	88
Chapitre 5. Rôle du contenu des représentations dans l'émergence du PEC . .	88
1. L'incidence des contraintes de construction des représentations dans la résolution de problèmes d'exécution de dessins géométriques complexes chez des enfants normaux et présentant un THADA . .	88
2. L'influence des propriétés visuelles dans la reproduction de dessins géométriques complexes (expériences 4 et 5) . .	108
3. Le rôle du contenu des représentations dans l'émergence du PEC : conclusion . .	120
Chapitre 6. Rôle du format des représentations dans l'émergence du PEC . .	121
1. Rôle des représentations visuelles dans l'émergence du PEC (expérience 6) . .	122
2. Rôle des représentations imagées et verbales dans l'émergence du PEC (expériences 7 et 8) . .	125
3. Le rôle du format des représentations dans l'émergence du PEC : conclusion . .	143
BILAN ET PERSPECTIVES . .	145
1. Rôle du contenu et du format des représentations dans l'émergence du PEC . .	145
2. Les changements relatifs au format des représentations à travers le modèle développemental de Karmiloff-Smith . .	148
3. Perspectives . .	151

INTRODUCTION

L'activité de dessin constitue un domaine d'étude intéressant à plusieurs égards, dans divers champs de la psychologie. En effet, celle-ci permet d'appréhender des dimensions psychologiques variées, touchant aussi bien le registre affectif que cognitif.

En psychologie clinique et en psychopathologie, son usage à visée diagnostique et/ou thérapeutique est classiquement adopté, conjointement au jeu. Son caractère ludique en fait un outil de médiation efficace auprès des jeunes enfants. Dans cette optique, le dessin est le plus souvent utilisé comme espace projectif ou comme support d'expression de phénomènes inconscients, reflétant certains traits de personnalité et permettant de qualifier la structure psychique du sujet (Abraham, 1992 ; Davido, 1998 ; Lefebure, 1993 ; Royer, 1995).

Mais l'étude du dessin, et plus largement des activités graphiques, s'avère également d'un intérêt majeur dans les champs de la psychologie cognitive et de la neuropsychologie. Ce type d'activités intègre une pluralité de mécanismes cognitifs, relevant à la fois de processus périphériques ayant trait au système perceptivo-moteur, et de mécanismes centraux liés au système représentationnel (Rosenbaum, 1991 ; Van Galen, 1991). Les activités graphiques permettent ainsi l'exploration de nombreuses fonctions cognitives de bas et haut niveaux, telles que la sensorialité, le contrôle visuo-moteur, l'attention et la mémoire, et la détection d'éventuels troubles neurologiques (Osterrieth, 1945 ; Rey, 1941, 1959, 1969 ; Wallon & Mesmin, 1998). Leur étude contribue en outre à la compréhension du fonctionnement et du développement cognitifs du sujet.

La présente recherche a pour objet l'étude des relations entre les composantes perceptive, mnésique et représentationnelle intervenant dans la réalisation de tâches ou la résolution de problèmes résidant dans l'exécution de dessins complexes composés de formes simples emboîtées (incluses les unes dans les autres) et l'émergence d'une stratégie particulière consistant à tracer ou restituer les différentes figures élémentaires de la périphérie vers le centre (progression suivant un ordre centripète). En raison de ses propriétés (relatées dans le chapitre 1), ce procédé constitue une véritable « règle syntaxique » et a été qualifié de « principe d'organisation de l'exécution ». On parle de « Principe de l'Exécution Centripète », ou « PEC » (Magnan, Aimar & Baldy, 2000 ; Magnan, Baldy & Chatillon, 1999). Notre travail vise par ailleurs à rendre compte des changements pouvant s'opérer au cours du développement (chez l'enfant) quant à l'incidence des facteurs perceptifs, mnésiques et représentationnels sur le PEC.

Nous formulons l'hypothèse générale selon laquelle le PEC résulte d'une opération de planification de l'action basée sur l'établissement de règles procédurales définies à partir d'un encodage et d'une intégration cohésifs et complets des données du problème. Ce principe reposerait conjointement sur l'extraction des formes simples (propriétés figuratives) et sur l'identification de la relation d'emboîtement caractérisant les dessins exécutés. C'est précisément cette configuration spatiale qui serait à l'origine de l'attribution ou du choix privilégié de l'ordre centripète dans le tracé ou l'assemblage des différentes figures élémentaires, la progression préférentielle allant de la figure la plus extérieure vers la figure la plus intérieure correspondant à la fois à l'exploitation d'un cadre de référence et à un mode privilégié de structuration spatiale (ainsi, le PEC agirait comme un « attracteur »).

Aussi, nous partageons la position théorique défendue par Bialystok et Jenkin (1998) qui, à travers l'exemple de la rotation mentale, soutiennent l'idée selon laquelle le contenu de la représentation construite dans la résolution d'un problème joue « un rôle décisif dans la détermination de la stratégie » (p. 57) adoptée pour répondre au but fixé par la tâche. La mise en œuvre du PEC découle elle aussi des données du problème encodées, relativement aux propriétés figuratives et spatiales des dessins. L'un des objectifs majeurs de cette recherche est de montrer de quelle façon certains facteurs perceptifs et mnésiques, susceptibles de conditionner l'intégration des données du problème (et donc le contenu des représentations élaborées), peuvent influencer sur l'émergence du PEC. De plus, nous nous intéresserons à l'évolution avec l'âge du contenu des représentations. Nous prédisons un usage de plus en plus massif du PEC au cours du développement (ce principe étant néanmoins amené à se stabiliser), qui témoignerait de l'accroissement des capacités des enfants à extraire les caractéristiques d'ensemble des dessins exécutés et à construire des représentations unifiées (traitement global) de ces derniers, l'émergence du PEC reposant sur une opération de planification de l'action s'appuyant sur une intégration cohésive des propriétés visuo-spatiales.

Le second objectif est d'étudier le rôle du format des représentations construites dans l'émergence du PEC. Si nous adhérons pleinement à la position théorique de Bialystok et Jenkin (1998) quant au rôle crucial du contenu des représentations, nous nous opposons en revanche à la conception de ces mêmes auteurs concernant l'implication du format des représentations dans la résolution de problèmes, jugée négligeable par ces derniers. Aussi, nous postulons que, tout comme le contenu des représentations, le format de stockage des données du problème à résoudre est également susceptible d'influer sur l'émergence du PEC. En outre, celui-ci serait variable suivant l'âge des enfants (en particulier selon leurs connaissances linguistiques et sémantiques ou conceptuelles), les différences relevées au cours du développement quant à l'émergence du PEC pouvant alors être liées au format de stockage des données du problème.

Notre travail est organisé suivant deux parties :

1. la section théorique, dans laquelle nous abordons les différents aspects en rapport avec les expériences que nous conduisons dans le cadre de cette recherche. Celle-ci comprend quatre chapitres. Le premier d'entre eux porte sur les analyses syntaxiques dans les activités graphiques. En particulier, nous relatons en détails les travaux relatifs au PEC. Le deuxième chapitre est consacré au processus de planification de l'action (et aux mécanismes mnésiques et représentationnels qui s'y rattachent) intervenant dans la résolution de problèmes. Dans le troisième chapitre, nous nous centrons sur la question de l'encodage perceptif et de l'intégration en mémoire des informations visuo-spatiales, en considérant les deux modalités sensorielles pouvant être mobilisées dans l'analyse des propriétés figuratives et spatiales : la vision et le toucher. Le quatrième chapitre concerne quant à lui le format de stockage des informations visuo-spatiales.
2. la section expérimentale, dans laquelle nous présentons deux séries d'expériences mettant en jeu l'accomplissement de tâches visant à satisfaire le même but à partir des données du problème posé : exécuter un ensemble de dessins complexes composés de formes simples emboîtées. La première série d'expériences (chapitre 5, comprenant les expériences 1 à 5) porte sur le rôle du contenu des représentations, alors que la deuxième série d'expériences (chapitre 6, constitué des expériences 6 à 8) porte plus spécifiquement sur le rôle du format des représentations dans l'émergence du PEC. Ces expériences permettront de déterminer, à différentes

périodes au cours du développement (les choix relatifs à l'âge des enfants et à la procédure suivie dans chacune des expériences étant définis en fonction du niveau de complexité général et/ou des compétences ou connaissances spécifiques requises dans les différentes tâches proposées), dans quelle mesure le PEC est lié au contenu ou au format des représentations construites, ou conjointement à ces deux facteurs.

Partie I : section théorique

Chapitre 1. L'organisation syntaxique dans les activités graphiques

Ce premier chapitre est consacré aux règles syntaxiques qui gouvernent l'exécution de patterns graphiques simples et complexes. Après avoir défini ces dernières de façon générale, nous les présentons de façon plus précise, en particulier celle faisant l'objet de notre recherche : le « Principe de l'Exécution Centripète » (PEC).

1. L'organisation syntaxique du tracé de patterns graphiques

Les termes d'organisation syntaxique au sein des activités graphiques renvoient à un ensemble de règles de production graphique. Ces règles constituent une véritable « syntaxe graphique » en raison du caractère prégnant, quasi-systématique des séquences comportementales auxquelles elles se réfèrent. C'est sur les processus cognitifs sous-jacents à ces règles graphiques que nous allons nous pencher.

Van Sommers (1989) a élaboré un modèle cognitif du dessin dans lequel figurent les principales opérations mentales impliquées dans l'émergence des règles de production graphique dans le tracé de patterns tels que des formes géométriques (cf. figure 1). Dans ce modèle, l'auteur distingue la situation de copie (reproduction d'un dessin ou pattern graphique) de celle du dessin spontané, pour lesquelles l'enchaînement des étapes (ou des processus) n'est pas similaire. Nous évoquerons ici le cas du dessin spontané bien que, dans le cadre de notre recherche, nous nous intéressions plus particulièrement aux situations de production graphique suite à une exploration perceptive. De plus, ce modèle s'applique aussi bien à la production de dessins bi-dimensionnels (comme une figure géométrique plane) que tri-dimensionnels. Van Sommers (1989) décrit deux systèmes hiérarchiques intervenant dans le dessin : l'un relatif à la perception visuelle, l'autre à la production graphique.

Dans le premier de ces deux systèmes, une image est transformée en un ensemble de primitives décrites à partir de changements d'intensité lumineuse (représentation 2D). A ce stade, la forme (l'image) et le fond ne sont pas distingués. Puis, une représentation 2D 1/2 incluant les propriétés de surface de l'image, telles que son orientation (angle de vue) et sa distance par rapport à l'observateur, est encodée. Enfin, une représentation 3D de l'objet peut être construite. Les formes et les relations spatiales sont alors spécifiées grâce à un module de représentation intégrant à la fois le volume et la surface. Dans le cas de l'exécution d'un objet familier, la représentation construite est reliée en mémoire au système sémantique (permettant une association entre la représentation de l'objet et l'unité lexicale lui correspondant), lui-même relié au système phonologique (qui permet de récupérer la prononciation du nom de l'objet).

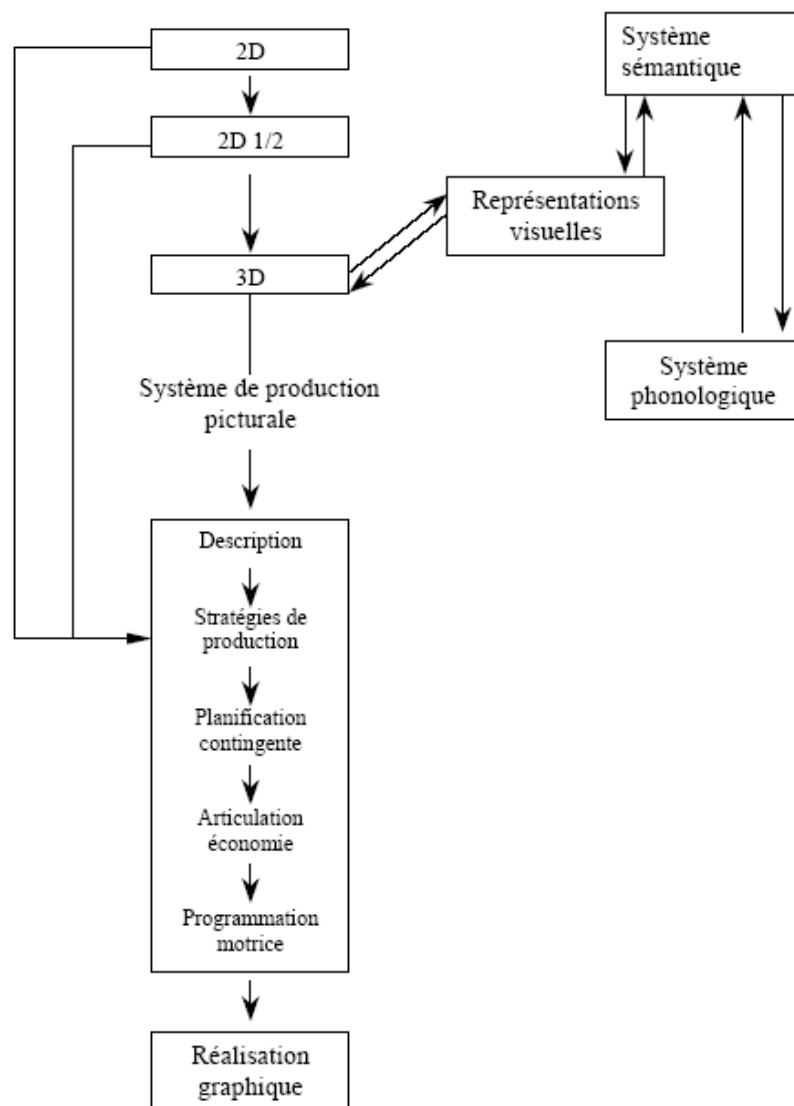


Figure 1 : Modèle cognitif du dessin (d'après Van Sommers, 1989).

Le deuxième système comprend cinq composants ou processus de production graphique. En situation de dessin spontané, le sujet doit décider (choisir) les caractéristiques de sa production (dimension, orientation, nombre de détails...). Des « stratégies de description » (depiction decisions) de l'objet sont alors nécessaires. En revanche, lors de la reproduction d'un dessin, ces stratégies de description picturale s'avèrent inutiles puisque les propriétés sont définies a priori, sont établies au départ (le sujet doit se référer aux caractéristiques du modèle présenté). Puis le dessinateur doit mettre en œuvre des « stratégies de production », par le biais desquelles il va fragmenter l'ensemble à dessiner en sous-ensembles organisés (par exemple, débiter le dessin par la partie de droite, ou de gauche, par le haut ou par le bas...). Les parties segmentées sont sélectionnées puis ordonnées afin d'être exécutées suivant une séquence appropriée. L'opération de « planification contingente » dont parle Van Sommers (1989) vise précisément à définir les étapes successives de la production graphique. Elle réside donc dans l'exercice du contrôle pro-actif intervenant dans la résolution de problèmes (le chapitre 2 sera précisément consacré à l'opération de planification de l'action dans la résolutions de problèmes), et se

distingue des procédures rigides d'exécution graphique routinières (programmes moteurs). Ces dernières renvoient à l'exécution automatique de dessin ou de formes conventionnelles et/ou simples, alors que les stratégies de tracé sous-requérant l'opération de planification contingente concernent le tracé de patterns abstraits et/ou complexes. Ainsi, les processus mis en jeu de façon prépondérante dans l'activité de dessin varient selon le niveau de complexité et/ou de familiarité de la figure à réaliser. Les mécanismes qui sous-tendent la production de patterns simples et/ou connus divergent de ceux intervenant dans l'exécution de patterns complexes non familiers. Par conséquent, il convient de distinguer deux catégories de règles graphiques, selon la nature des mécanismes de base sur lesquels s'appuient ces dernières :

1) d'une part, des règles graphiques mettant en jeu l'activation de procédures routinières ou automatisées (Karmiloff-Smith, 1990, 1999), pour lesquelles l'activité de contrôle du sujet n'est pas requise ou est très limitée. Ces règles s'apparentent à des « programmes moteurs » (Broderick & Laszlo, 1987, 1988) obéissant à un principe d'« économie du geste » (Van Sommers, 1989), établi en fonction de paramètres moteurs ou biomécaniques. Elles concernent le tracé de patterns graphiques simples (formes élémentaires), et ont été regroupées sous les termes de « grammaire du geste » (Goodnow & Levine, 1973). Nous appellerons ces règles les « règles syntaxiques motrices automatisées ».

2) d'autre part, des règles ou stratégies graphiques reposant sur une opération de planification de l'action, qui requiert une activité de contrôle (Hauert, Mounoud & Mayer, 1981 ; Osterrieth, 1945) telle que celle engagée dans la résolution de problèmes. Celles-ci s'observent dans la production de dessins complexes. La mise en œuvre de ces règles mobilisent de façon accrue le système représentationnel. Nous les qualifierons de « règles syntaxiques représentationnelles fonctionnelles », en raison du caractère fonctionnel des représentations construites en vue de répondre à un but dans l'accomplissement d'une tâche.

Le tracé de chacune des parties élémentaires serait donc régi par des schèmes grapho-moteurs routinisés (automatiques), rigides (possédant un caractère assez systématique), rattachés à la phase d'« articulation-économie ». Enfin, l'étape de « programmation motrice » déterminerait un certain nombre de paramètres moteurs et posturaux qui accompagnent l'acte graphique, tels que la fluidité du tracé, la vitesse ou la tenue du crayon.

Si, comme le soulignent Guérin, Ska et Belleville (1999), le modèle de Van Sommers (1989) est le seul à décrire les processus cognitifs ayant trait aux systèmes perceptif, représentationnel et grapho-moteur au sein de l'activité de dessin, il présente certaines lacunes concernant les spécificités de chacune de ces composantes. S'intéressant aux pathologies apraxiques qui affectent l'organisation du geste dans la production grapho-motrice, et plus spécifiquement aux déficits relevés chez des sujets atteints d'apraxie constructive (caractérisée par une difficulté à reproduire des formes, en dépit de l'absence de troubles visuels ou moteurs), ces auteurs relatent les nombreuses observations anatomo-cliniques et les divergences quant aux interprétations associationnistes ayant été mises en avant. En effet, certains auteurs suggèrent l'idée selon laquelle les troubles apraxiques observés trouveraient des origines différentes en fonction de la localisation des structures atteintes (les lésions situées dans l'hémisphère droit affecteraient le traitement des informations visuo-spatiales, alors que celles touchant l'hémisphère gauche entraîneraient une altération des fonctions exécutives), alors que d'autres chercheurs contestent ces différences qualitatives entre les apraxies constructives associées à des lésions des hémisphères droit ou gauche. Il apparaît donc que les recherches

neurologiques s'inscrivant dans un cadre associationniste ne permettent pas d'expliquer clairement les déficits sous-jacents aux apraxies constructives. C'est pourquoi Guérin et al. (1999) examinent différents modèles cognitifs ainsi qu'un ensemble de données neuropsychologiques empiriques permettant de mieux appréhender les mécanismes en jeu dans l'activité de dessin. Aussi, ces auteurs reviennent en détails sur différentes étapes du modèle de Van Sommers (1989), afin de le compléter.

Ils considèrent tout d'abord les mécanismes perceptifs visuels pouvant intervenir dans le dessin (situation de copie). Si Van Sommers (1989) établit des liens entre les systèmes de perception et de production graphique et insiste sur les représentations visuelles stockées en mémoires à long et court termes ainsi que sur la présence d'un système sémantique permettant la reproduction de dessins de mémoire, il néglige néanmoins certains aspects de la perception visuelle pouvant participer à l'activité de dessin. Le modèle computationnel de Kosslyn et Koenig (1992) comble ces lacunes. Ces auteurs postulent l'existence de deux systèmes fonctionnant en parallèle dans la perception visuelle. Le premier d'entre eux, ascendant (bottom-up processing system), concerne le traitement des propriétés spatiales plutôt que celui des caractéristiques physiques (nous reviendrons de façon plus approfondie sur l'encodage perceptif des informations visuo-spatiales dans le chapitre 3). Le traitement des propriétés spatiales englobe, d'une part, celui des relations catégorielles (relations spatiales entre deux objets ou entre les parties d'un même objet restant stables quelle que soit son orientation) et, d'autre part, celui des relations de coordination (relations métriques) qui permet l'estimation des distances et le guidage des mouvements et des actions. Un autre composant appartenant au système dorsal d'encodage des propriétés spatiales sous-tend le dessin. Il s'agit du système de repérage spatiotopique (spatiotopic mapping component), dont le rôle est de localiser les objets dans l'espace et de situer leurs coordonnées à l'intérieur d'un cadre de référence unique. Le second système, descendant (top-down processing system), assure la vérification d'hypothèses concernant les propriétés de l'objet dessiné (look-up system). Un système de déplacement de l'attention pouvant également être sollicité dans le processus top-down ajuste la position des yeux, de la tête et du corps ainsi que la position et la taille de la fenêtre attentionnelle sur différentes parties du stimulus encodé.

Puis Guérin et al. (1999) abordent le rôle de l'imagerie visuelle dans le dessin (nous reviendrons de manière beaucoup plus détaillée sur les représentations visuelles dans le chapitre 4). Van Sommers (1989) postule que le système de stratégie de description (depiction decisions component) qui sous-tend la reproduction de dessins de mémoire n'implique pas les mêmes mécanismes que ceux mobilisés dans l'imagerie visuelle. Ce composant supporte le processus relatif au choix, parmi plusieurs alternatives, de la forme finale pertinente de la production graphique. Or ce mécanisme suppose nécessairement la génération en mémoire des différentes formes de l'objet, c'est-à-dire la construction de représentations visuelles. Il ne serait par conséquent pas spécifique à l'activité de dessin, mais ferait plus certainement partie d'un système plus large d'imagerie visuelle. Guérin et al. (1999) précisent toutefois que les composants ou processus d'imagerie visuelle pouvant être mobilisés dans l'activité de dessin dépendent des tâches réalisées. Deux « circuits » (pathways) cognitifs différents sont sélectivement activés en fonction du caractère familier ou non des patterns tracés. D'une part, le circuit d'imagerie non visuelle, qui sous-tend la production de mémoire de dessins familiers, mettant en jeu des représentations prototypiques (canoniques) et des procédures d'exécution routinières, emprunte une voie reliant de façon directe la mémoire associative (lieu de convergence en mémoire de travail des informations relatives à l'objet encodé) à la mémoire procédurale. D'autre part, le circuit d'imagerie visuelle, supportant l'exécution de dessin non familiers,

transite par la mémoire associative pour atteindre le « buffer visuel » (structure assurant le maintien à court terme des propriétés visuo-spatiales encodées ; nous reviendrons sur les aspects anatomo-fonctionnels de cette structure et des autres sous-systèmes d'imagerie visuelle issus du modèle de Kosslyn (1994), dans le chapitre 4). Ce circuit inclut deux sous-systèmes. Le premier, qui permet la formation d'une partie de l'image mentale, passe successivement par la mémoire associative, la mémoire à long terme, les systèmes d'encodage des relations spatiales catégorielles et de coordination, le système de localisation spatiotopique (spatiotopic mapping) et le buffer visuel. Le second système, qui permet l'ajout de parties à l'image mentale globale, chemine par la mémoire visuelle à long terme, la mémoire associative et les sous-systèmes descendants de vérification d'hypothèses (top-down hypothesis testing subsystems). Il est également engagé dans l'inspection des images mentales stockées dans le buffer visuel. Dans la production de dessins de mémoire, ces deux systèmes sont activés par des processus de génération qui clarifient les représentations en mémoire visuelle et associative et envoient ensuite un feedback au buffer visuel. Les tâches de copie et de production de mémoire de dessins mettent en jeu deux autres processus de maintien et d'inspection de l'image mentale dans le buffer visuel ou la mémoire de travail (mémoire de travail visuo-spatiale (visuospatial sketchpad) dont il est question dans le modèle de Baddeley et Hitch (1994) que nous présenterons dans le chapitre 2). Ces mécanismes permettent l'exploration et la rétention de l'image mentale construite pendant toute la durée au cours de laquelle la stratégie ou le procédé d'exécution est organisé (planification motrice) et le dessin tracé.

Après s'être penchés sur les processus responsables de l'encodage perceptif et de l'intégration en mémoire (construction d'une image mentale visuelle) des propriétés du dessin exécuté, Guérin et al. (1999) se focalisent sur les mécanismes intervenant dans la production graphique.

L'idée mise en avant par Van Sommers (1989) selon laquelle le processus de mise en œuvre d'une stratégie de production graphique correspondrait à un composant cognitif ne peut être retenue. En effet, l'élaboration d'une stratégie d'exécution graphique peut être sous-tendue par des mécanismes de différentes types. Elle peut tout d'abord refléter une capacité générale de planification de l'action. Elle peut également être liée au mode d'encodage, global ou local, de l'information visuelle, qui détermine la segmentation « hiérarchique » ou « ligne par ligne » du percept. Enfin, la segmentation hiérarchique d'une image est aussi conditionnée par sa signification (valeur sémantique).

Par ailleurs, contrairement à Van Sommers (1989) qui considère deux composants de planification pouvant intervenir dans l'activité de dessin (système de planification contingente et système de planification routinière), Guérin et al. (1999) estiment que le système de planification routinière ne fait aucunement appel à l'exercice d'un contrôle pro-actif, dans la mesure où les schèmes de production intervenant dans le tracé de dessins familiers (connus) simples sont présents en mémoire associative, permettant ainsi l'activation automatique de représentations motrices en mémoire procédurale.

Enfin, les contraintes articulaires et économiques, bien que renvoyant à des mécanismes d'ordre mécanique plutôt que cognitif, conditionnent la programmation de l'action. Ils déterminent en partie l'établissement de la séquence de mouvements visant à satisfaire le but fixé étant donnée la position du membre effecteur.

Dans ce qui suit, nous revenons de façon plus approfondie sur chacune des catégories de règles graphiques. Nous abordons en premier lieu les « règles graphiques automatisées », liées principalement aux propriétés biomécaniques et nerveuses des membres effecteurs du système moteur. Nous nous intéressons à l'organisation motrice

avant de relater les règles syntaxiques constitutives de la « grammaire du geste ». Nous nous centrons ensuite sur les « règles graphiques représentationnelles fonctionnelles ». Ces règles sont d'abord envisagées à travers l'exemple de la reproduction de la figure complexe de Rey (FCR), puis précisément à travers la règle graphique syntaxique qui nous intéresse ici : le « Principe de l'Exécution Centripète » (PEC).

2. Les règles graphiques automatisées

2.1. L'organisation motrice

Les règles graphiques automatisées trouvent principalement leur origine dans les propriétés de base qui régissent l'organisation motrice. La séquence de gestes alors engagée ou activée ne requiert pas l'exercice d'un contrôle pro-actif mobilisant de façon accrue le système représentationnel et sollicitant d'importantes ressources mnésiques, mais est déterminée par les caractéristiques biomécaniques des membres effecteurs. Diverses recherches ont été consacrées à l'étude de ces dernières.

Ainsi, l'étude conduite par Meulenbroek et Thomassen (1993) visait à rendre compte du rôle de l'amplitude du mouvement dans l'implication de certains segments du membre. Selon l'étendue du geste, les doigts, la main, l'avant-bras ou le membre supérieur participent plus ou moins activement à l'exécution motrice. De plus, suivant les directions du mouvement, les segments sollicités diffèrent ou ne sont pas mobilisés de façon similaire dans l'exécution du tracé. Par exemple, les doigts et la main sont davantage impliqués dans les mouvements horizontaux suivant une trajectoire d'en haut à gauche vers en bas à droite (et inversement), l'avant-bras participe préférentiellement à l'exécution de mouvements ayant une direction horizontale mais orientés à partir d'en haut à droite vers en bas à gauche, et le membre supérieur intervient surtout lors des mouvements verticaux orientés haut-gauche vers bas-droite. Par la suite, Meulenbroek, Vinter et Desbriez (1998) ont poursuivi ce travail, en proposant une expérience dans laquelle ils soumettaient à des enfants de dix ans et des adultes une tâche de copie de patterns géométriques composés de trois segments. Deux orientations différentes du segment central des patterns étaient utilisées (les items étaient « N » et « Z »), favorisant soit l'implication à distance du segment du membre, soit l'implication de ce dernier à proximité. L'axe haut-gauche vers bas-droite provoque une flexion-extension au niveau de l'articulation du coude, et l'axe bas-gauche vers haut-droite entraîne une abduction-adduction du poignet. En outre, afin de contrôler l'implication des segments du membre à distance ou à proximité, les auteurs ont recouru à la technique appliquée avec succès par Wright (1993, cité par Meulenbroek & al., 1998) : ils demandaient aux sujets de maintenir un contact entre l'avant-bras et la surface de travail, ou de lever le bras au-dessus de cette même surface tout au long de la tâche. Les analyses portaient sur quatre variables dépendantes : le temps de pause au cours des mouvements, la proportion de pics de vitesse (c'est-à-dire les vitesses nettement supérieures à la vitesse moyenne du mouvement), la précision du tracé quant à la taille de la reproduction, et la durée du mouvement. L'exploitation optimale de l'élasticité des muscles et des tendons serait reflétée par une proportion minimale de pics de vitesse, un faible effet des pauses, ainsi que des temps de pause courts. Une valeur peu élevée de la proportion moyenne des pics de vitesse mettrait en jeu l'adoption d'un régime de mouvement cyclique. Les résultats obtenus étaient les suivants : les sujets produisaient généralement des dessins dont la taille dépassait celle des patterns qui leur étaient présentés. Ce phénomène était davantage marqué chez les enfants, et pour les patterns de petite taille. Ces effets s'accompagnaient d'un temps d'exécution du mouvement prolongé. Par ailleurs, la proportion de pics de vitesse était

moindre chez les adultes, pour les patterns les plus grands, et lorsque le bras intervenait à la place de la main en tant qu'effecteur. Enfin, bien que les adultes aient eu plus souvent recours à des pauses que les enfants, les temps de pause étaient équivalents dans les deux groupes. Ainsi, les mouvements rapides comprenant peu de pics de vitesse reflètent une bonne exploitation de l'élasticité des muscles et des tendons. Cependant, le risque d'introduire une pause entre des segments subséquents est alors accru, en raison d'une dissipation de l'énergie.

L'étude d'Adam, Van Der Bruggen et Bekkering (1993, cités par Meulenbroek, Vinter & Desbiez, 1998) portait également sur le contrôle moteur, et plus précisément sur les principes gouvernant la production de mouvements distincts (cas de l'exécution du tracé d'un carré qui, du fait des angles, nécessite plusieurs mouvements, avec plusieurs points d'ancrage) et cycliques (tracé d'un cercle, nécessitant un mouvement unique). Selon ces auteurs, les mouvements cycliques peuvent avoir certaines caractéristiques distinctes qui dépendent des contraintes de précision et d'espace imposées aux sujets. Les mouvements distincts et cycliques possèdent des différences kinétiques typiques, qui peuvent être décrites en termes de profils de vitesse et de formes.

D'autres recherches ont permis de dégager de véritables lois ou principes moteurs, tels que l'isochronie, qui constitue une propriété de base de l'organisation motrice (Viviani & Terzuolo, 1982, cités par Vinter & Mounoud, 1991). Ce principe met en rapport la vitesse et l'amplitude d'un mouvement. Il révèle que la vitesse d'un mouvement est proportionnelle à son étendue linéaire (c'est-à-dire à la longueur de sa trajectoire), tandis que le temps d'exécution est maintenu à peu près constant. Il s'observe précocement au cours du développement, dans différentes tâches motrices, comme le découpage de figures géométriques avec une paire de ciseaux, le pointage manuel, le suivi visuo-manuel d'une trajectoire (Corbetta, 1989, Hay, 1981, Viviani & Zanone, 1988, cités par Vinter & Mounoud, 1991).

Viviani, Baud-Bovy et Redolfi (1997) ont également mis en évidence l'existence d'une loi biomécanique, qui met en rapport la vitesse de déplacement et la valeur du rayon de courbure dans la production d'une ellipse : il s'agit de la « loi de la puissance un-tiers ». Le principe sur lequel se fonde cette loi est le suivant : lorsque l'on demande à des sujets de dessiner une ellipse, le mouvement qu'ils génèrent s'accélère dans les parties où le rayon est de grande amplitude et décélère dans les courbures à faible rayon. Ces auteurs ont de plus établi une relation entre les processus de perception kinesthésique et les règles motrices, en montrant que le non respect de la règle de la puissance un-tiers peut se traduire par des illusions perceptives dont sont victimes les sujets. Par exemple, si la vitesse de déplacement correspond à la production d'une ellipse, mais que le tracé imposé au sujet est un cercle, le sujet dira avoir dessiné une ellipse alors qu'il aura produit graphiquement un cercle. Le choix perceptif (obtenu en demandant au sujet ce qu'il pense avoir dessiné) est influencé par les connaissances implicites relatives à la vitesse de déplacement. La loi de la puissance un-tiers peut alors s'appliquer.

Desbiez, Vinter et Meulenbroek (1999) ont néanmoins montré que les processus impliqués dans la production de patterns simples sont liés aux demandes de la tâche à accomplir. Dans une première expérience, des sujets adultes devaient dessiner des figures composées de trois segments formant deux angles aigus selon une répétition de séries de tailles croissantes et décroissantes. Les processus périphériques se manifestent alors par l'exploitation des propriétés bioélastiques des muscles et tendons. Toutefois, la production graphique reste sous l'influence déterminante d'autres facteurs plus centraux lorsque la tâche consiste en une répétition de programmes moteurs semblables. Dans une seconde

expérience, une tâche additionnelle (paradigme de double tâche) mobilisant fortement les processus cognitifs (notamment attentionnels), devait être effectuée parallèlement à la production graphique des patterns. Celle-ci influençait la mise en œuvre des processus périphériques par la génération de mouvements d'amplitudes caractéristiques des effecteurs sollicités.

Certaines régularités ont pu néanmoins être observées dans le tracé de figures élémentaires. Les paramètres moteurs et les propriétés biomécaniques des membres effecteurs sont à l'origine de l'émergence d'un ensemble de règles de production graphique constitutives d'une véritable syntaxe graphique, qui constitue la « grammaire du geste ».

2.2. La « grammaire du geste »

Un ensemble de travaux (Goodnow & Levine, 1973 ; Lehman & Goodnow, 1975 ; Ninio & Lieblisch, 1976 ; Simner, 1981) ont permis de dégager un certain nombre de règles dites « syntaxiques » dans la production de patterns graphiques simples. Ces dernières ont conduit à l'élaboration d'une « grammaire du geste », ou « grammaire de l'action ». Elles résident dans la description de conduites graphiques habituelles, possédant un caractère général et prévalent. Nous nous centrerons ici sur les analyses syntaxiques portant sur le tracé de patterns géométriques lié à l'activité de dessin, mais ce type d'analyses a également été effectué à travers l'activité d'écriture (Meulenbroek et Thomassen, 1991). Les règles établies dans cette « grammaire du geste » s'attachent à spécifier des paramètres moteurs gouvernant l'acte graphique. Ainsi, Goodnow et Levine (1973), qui assimilent le dessin à un langage et postulent que l'organisation des tracés peut s'analyser en termes de règles de grammaire spécifiant le point de départ du tracé et sa progression. Ils stipulent les sept règles définissant cette grammaire de l'action : 1) départ du point le plus à gauche, 2) départ du point le plus haut, 3) le premier trait est vertical, 4) pour les formes telles que le triangle, le losange ou le « V » inversé, départ du point le plus haut et tracé de l'oblique vers la gauche, 5) tracé de tous les traits horizontaux, de gauche à droite, 6) et de tous les traits verticaux, de haut en bas, 7) tracé continu de la forme. L'application de l'une ou plusieurs de ces règles dépend des propriétés de la forme à reproduire, et des conditions particulières d'exécution du dessin.

Plusieurs études ont été consacrées à l'examen des règles graphiques dans une perspective développementale. Ces recherches visaient également à étudier les effets contextuels sur la syntaxe graphique, liés aux conditions d'exécution du mouvement et/ou à la structure de la figure à dessiner.

Thomassen et Tibosch (1991) ont élaboré un modèle quantitatif probabiliste visant à évaluer la force des règles, dans lequel ils proposent une organisation hiérarchique de celles-ci (en tête : stratégie du tracé en continu ; en dernière position : stratégie de progression de gauche à droite). Leur étude se fonde sur l'observation systématique de la hiérarchie des règles lorsque des adultes dessinent des patterns géométriques composés d'un seul, de deux ou de trois segments. Ils montrent que la structure du pattern influence le choix de la règle graphique. En effet, plus le pattern comporte de segments, plus les règles de tracé en continu (« threading ») et d'ancrage sont présentes. Vinter (1994) confirme ces résultats. Partant d'une expérience de copie de figures composées de deux segments, auprès d'enfants de 4 à 9 ans et des adultes, elle essaie de comprendre le développement de la hiérarchie des règles graphiques. Elle explore la sensibilité de cette hiérarchie à la structure des patterns. Elle tire deux conclusions majeures des résultats obtenus : d'abord, la hiérarchie des règles de production graphique dépend de l'âge : la règle de commencement par le haut et celle de tracé en continu dominant chez les enfants

les plus âgés, mais pas chez les plus jeunes ni chez les adultes. Ensuite, la sélection d'une règle graphique est sensible à la structure du pattern : la séquence syntaxique change selon que le pattern est composé d'horizontales ou de verticales. Ces résultats sont interprétés à travers une mise en relation des changements observés au niveau syntaxique avec ceux apparaissant à un niveau central de planification. Broderick et Laszlo (1988) ont d'ailleurs étudié les liens entre la planification motrice et la production de figures géométriques simples composées de segments d'orientations différentes. Ces auteurs ont montré comment, au cours du développement, le niveau de complexité de planification motrice est susceptible d'influer sur la production de carrés et de losanges. Il a été clairement établi que les losanges et les obliques sont pour les enfants plus difficiles à dessiner que les carrés et les lignes horizontales et verticales (Freeman, 1980). Cette différence persiste chez l'adulte (Laszlo & Broderick, 1985), mais devient moins importante avec l'âge, notamment en raison de l'accroissement de la capacité d'utilisation d'indices environnementaux (cadres de référence spatiaux) pertinents facilitant l'orientation de la figure dessinée (Broderick & Laszlo, 1987). En faisant varier les éléments graphiques déjà présents dans l'exécution de tâches de complètement et de copie de carrés et de losanges (des combinaisons de lignes, des angles ou des points de jonction à relier étaient donnés) chez des enfants de 5 à 11 ans, Laszlo et Broderick (1988) ont pu rendre compte de l'évolution au cours du développement des performances de tracé en fonction du niveau de planification motrice requis par la tâche. Aussi, afin d'examiner le rôle de la planification motrice, les facteurs cognitifs étaient minimisés en laissant visible le dessin-modèle tout au long des épreuves effectuées par les sujets (de cette façon, la réussite dépendait de l'aptitude de l'enfant à planifier le mouvement plutôt que de ce qui était connu ou mémorisé des différentes figures). Les résultats ont mis principalement en évidence que la différence relative aux performances de tracé des carrés comparativement à celle de l'exécution des losanges (la précision graphique était estimée à partir de la mesure de l'erreur de déviation angulaire) était moins importante pour les tâches à faible niveau de planification motrice que pour celles à haut niveau de planification motrice.

Par la suite, Gullaud et Vinter (1998) se sont intéressés au rôle du feedback visuel dans la réalisation graphique de figures géométriques simples. Ces auteurs soulignent l'importance de la vision dans le contrôle des habiletés motrices, et sur les aspects syntaxiques de la production graphique. En effet, le niveau syntaxique est modifié lorsque l'information visuelle est absente. Vinter et Meulenbroek (1993, cités par Gullaud & Vinter, 1998) ont observé des modifications de la localisation du point de départ dans le tracé d'un cercle en l'absence de vision. Les enfants (Vinter, 1994) et les adultes (Smyth, 1989) tendent à restreindre le nombre de levers de crayon durant la production de patterns graphiques en condition « sans vision ». La suppression des données visuelles influence l'enchaînement séquentiel des mouvements graphiques (Broderick & Laszlo, 1987). La vision constitue un facteur important à l'origine des préférences directionnelles des mouvements. Cependant, l'importance du contrôle visuel des mouvements varie en fonction de la structure des figures tracées, comme l'indique la différence statutaire relevée par Meulenbroek et Thomassen (1991) entre segments horizontaux et verticaux d'une part, et segments obliques d'autre part. Pour produire des horizontales et des verticales, un système de références géométriques est nécessaire, dépendant étroitement du feedback visuel. En revanche, pour produire des obliques, le système impliqué dépend de la structure anatomique de la main et des doigts. Aussi, le développement de l'intégration visuo-motrice dans la copie de figures géométriques élémentaires comprenant ou non des obliques témoigne également de ces différences : l'enfant est capable de dessiner un cercle dès l'âge de trois ans, un carré à partir de quatre ans, un triangle à cinq ans et un losange à sept

ans (Broderick & Laszlo, 1987 ; Henry, 2001). Ce sont donc les deux formes géométriques comportant des obliques qui sont acquises le plus tardivement.

Le cercle est sans doute la forme élémentaire qui a été la plus étudiée dans la perspective des analyses syntaxiques du dessin. Van Sommers (1984) a mis en évidence une loi dans laquelle il établit une relation entre le point de départ et le sens de rotation dans la production d'un cercle : le principe d'initialisation et de rotation du tracé circulaire (« Start Rotation Principle »). Il montre que quand les sujets commencent à dessiner un cercle en haut (au-dessus de la diagonale 5h-11h), ils génèrent habituellement un mouvement allant dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, et inversement lorsque le point d'initialisation du tracé se situe en bas (au-dessous de la diagonale 5h-11h). Les origines de ce principe ont été attribuées à des différences biomécaniques entre mouvements de flexion et d'extension et à l'activité de planification motrice visant à délimiter le cercle tracé dans l'espace graphique. Les études développementales sur la production du cercle ont par ailleurs montré que les jeunes enfants dessinent des cercles en suivant une progression allant dans le sens des aiguilles d'une montre, alors que les adultes adoptent plus volontiers une rotation de sens contraire. Van Sommers (1984) a en outre montré que le sens de rotation (horaire vs anti-horaire) est lié à la position du point d'initialisation du tracé, et que ce dernier change au cours du développement. L'étude de Meulenbroek, Vinter et Mounoud (1993) s'attachait à vérifier le caractère constant de la relation existant entre le point d'initialisation du tracé et le sens de rotation dans l'exécution d'un cercle. Ils valident l'idée que le principe d'initialisation et de progression du tracé (« Start Rotation Principle »), qui statue que le sens de rotation est conditionné par la position du point de départ du tracé, est fort présent, mais relèvent qu'entre 5 et 9 ans, ce principe devient de plus en plus prégnant. Ces données sont interprétées en termes de transfert ou de transposition de règles graphiques culturelles issues de l'activité d'écriture vers l'activité de dessin.

Ainsi, l'application ou la non application d'une règle dépend à la fois de l'âge du sujet, des caractéristiques des figures dessinées et des conditions particulières d'exécution dans lesquelles les mouvements sont effectués (Goodnow & Levine, 1973).

3. Les règles graphiques représentationnelles fonctionnelles

Concernant cette seconde catégorie de règles graphiques, nous nous intéresserons à l'exécution de deux types de dessins : celle de la figure complexe de Rey (FCR), puis celle de figures constituées de formes géométriques simples emboîtées, sur lesquelles porte plus précisément notre travail.

3.1. L'organisation du tracé de la figure complexe de Rey (FCR)

Au même titre que la reproduction de formes ou de patterns graphiques simples, l'organisation syntaxique a fait l'objet de travaux portant sur des dessins géométriques complexes. La majeure partie de ces recherches s'appuient sur la figure proposée par Rey (1941, 1959, 1969). La figure complexe de Rey (FCR) est rapportée sur la figure 2 ci-dessous (figure à l'échelle 1).

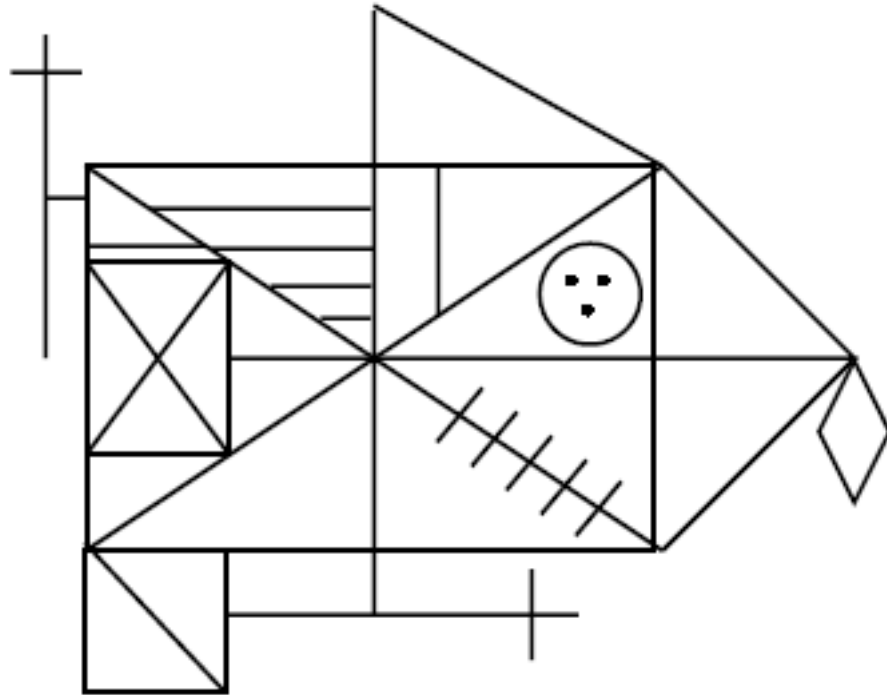


Figure 2 : Figure complexe de Rey (FCR), d'après Rey (1959).

La FCR a fait l'objet de très nombreux travaux. Certains d'entre eux considèrent la valeur projective de la FCR (Alcorn, 1979 ; Jumel, 2002 ; Kello, 1977 ; Kello & Kovac, 1975), alors que d'autres études s'attachent à établir des liens entre la reproduction de ce dessin et l'environnement socio-culturel du sujet ou son appartenance à un groupe ethnique (Henry, 2001). Des auteurs utilisent quant à eux la FCR pour mettre en évidence des déficits liés à certaines difficultés scolaires (César, 2002 ; Klicpera, 1983 ; Waber & Bernstein, 1995) ou certaines pathologies impliquant des désordres psychologiques (Sullivan, Mathalon, Chung & Zipursky, 1992 ; Verdoux, Magnin & Bourgeois, 1995 ; Wallon, 2002a, 2002b) ou des altérations neurologiques (Chapman, Waber, Bernstein & Pomery, 1995 ; Das & Aysto, 1994 ; Piguët, Saling, Shea & Berkovic, 1994). Enfin, des recherches envisagent les relations entre la FCR et certains mécanismes cognitifs spécifiques, tels que les capacités visuo-spatiales (Ardila & Rosselli, 1994 ; Akshoomoff & Stiles, 1995a, 1995b).

Parmi les nombreuses études menées sur la FCR, la plupart s'inscrivent dans une perspective développementale. Elles considèrent notamment la distinction entre les modes de contrôle pro-actif (« pro-active control ») et pas à pas (« step by step control ») mise en avant par Hauert, Mounoud et Mayer (1981) pour rendre compte de la réorganisation des conduites motrices au cours du développement, qu'elles appliquent aux modes de contrôle impliqués dans les différentes stratégies d'exécution de la copie de la FCR. Osterrieth (1945) définit trois types de stratégies pour copier la FCR, chacune d'elles mettant en jeu soit un mode de contrôle pro-actif, soit un mode de contrôle pas à pas, ou encore une combinaison de ces deux modes de contrôle. La « stratégie du rectangle », dans laquelle les sujets organisent leur production sur la base du large rectangle central, qu'ils extraient au sein de leur représentation, laisse une place importante à la planification. La « stratégie du contour », où les enfants commencent leur exécution en dessinant la ligne périphérique du modèle,

sans différencier le large rectangle, met en jeu un mode de contrôle mixte (Hauert & al, 1981) : certains aspects de la production sont planifiés sur la base du contour de la figure, mais le contrôle visuel s'avère indispensable durant l'exécution du dessin, en particulier pour le tracé du contour. La « stratégie pas à pas » réside quant à elle dans la juxtaposition des parties contiguës du dessin. Elle consiste à exécuter le dessin de proche en proche, rendant la planification sensiblement réduite. L'action se déroule alors simplement sur la base d'un contrôle visuel actif, où le sujet éprouve le besoin de consulter fréquemment le dessin-modèle, ceci se vérifiant dans diverses tâches de reproductions de figures (Baldy & Chatillon, 1994 ; Baldy, Chatillon, Cadopi & Chanquoy, 1996). Les analyses de Rey (1941, 1959) et d'Osterrieth (1945) montrent que l'organisation du procédé d'exécution de la FCR évolue entre 4 et 11 ans, allant du simple gribouillage, à 4 ans, à l'utilisation du grand rectangle central comme une référence et un point de repère dans l'organisation du tracé, vers 11-12 ans et chez l'adulte.

Le travail de Baldy et Chatillon (2002) porte sur la période intermédiaire, entre 4 et 11 ans, durant laquelle Rey (1941, 1959) et Osterrieth (1945) observent peu de changements fondamentaux relatifs à l'organisation de la stratégie d'exécution. Comme nous l'avons signalé un peu plus haut, le procédé alors dominant est régi par une organisation par juxtaposition de détails. Mais les protocoles recueillis par Baldy et Chatillon (2002) chez des enfants de 4, 6, 8, 10 et 11 ans, des adultes de bas niveau de qualification et des étudiants montrent que la croix située en haut à gauche de la figure joue, à un moment donné du développement, un rôle particulier dans l'initialisation du tracé. A 4 ans, environ un tiers des enfants commence le dessin par le rond, seul élément curviligne. A partir de 6 ans, pratiquement plus aucun enfant ne commence son dessin par cet élément. Dès lors, les enfants préfèrent débiter leur dessin, dans des proportions voisines, par la croix, le losange, un trait du grand rectangle central ou la pointe du triangle situé à droite de la figure. Entre 8 et 11 ans comme chez les adultes de bas niveau de qualification, la croix située en haut à gauche de la figure joue un rôle attractif particulièrement fort au début du tracé. Ce rôle diminue chez les adultes étudiants au profit du rectangle central. Ces données convergent avec celles rapportées par Waber et Holmes (1985). Baldy et Chatillon se sont interrogés sur les raisons pour lesquelles, entre 8 et 11 ans, les enfants commencent le dessin par la croix. Ils justifient ce phénomène par le raisonnement suivant : « On sait que l'espace graphique est un espace codé et que ce code est culturel. Le jeune enfant ignore les conventions qui régissent la lecture et l'écriture. La distribution et l'orientation qu'il donne à ses dessins sont fortuites ou déterminées essentiellement par la position de son corps. Les apprentissages scolaires structurent l'espace de la feuille de papier en établissant un système de références spatiales (haut-bas et gauche-droite) et en orientant temporellement cet espace (avant-après) » (Baldy & Chatillon, 2002, p. 361). Ainsi, la préférence des enfants d'âge scolaire pour commencer leur dessin par l'élément situé en haut à gauche du modèle serait corrélée au niveau scolaire, et plus précisément aux apprentissages de la lecture et de l'écriture. Auparavant, les enfants n'ayant pas bénéficié de ces apprentissages, ces derniers ne pourraient conditionner le sens de lecture et d'écriture du dessin. C'est pourquoi l'analyse du modèle exploré et l'exécution du dessin qui s'en suit s'avère anarchique et inorganisé. L'enfant ne parvient à extraire les éléments du modèle que de façon isolée, non cohésive, ou à ne reproduire que les formes qui lui sont familières, comme le rond. Puis, tout au long du développement, les éléments prégnants de la figure changent. Les enseignements en lecture-écriture seraient à l'origine de la préférence des enfants pour engager l'exécution graphique en haut à gauche (l'élément coïncidant avec cette localisation spatiale dans la FCR étant la croix). Puis l'influence exercée par les apprentissages scolaires déclinerait progressivement, les

enfants de 11-12 ans s'en décentrant pour privilégier le mode d'organisation de l'exécution basé sur l'extraction première du rectangle central de la FCR.

Toutefois, à l'issue de ces résultats, les auteurs émettent l'hypothèse selon laquelle le commencement du tracé de la FCR par la croix en haut à gauche (l'autre croix, située en bas, n'apparaissant pas prototypique en raison de sa position couchée) pourrait provenir des propriétés particulières de cette forme : elle est prégnante, familière au jeune enfant dans notre culture, et facile à dessiner. Pour tester cette hypothèse, les auteurs ont fait varier la position de la croix. Ils ont sollicité des enfants de 10 ans (le phénomène d'initialisation du tracé de la FCR par la croix étant le plus net à cet âge) pour reproduire en copie, puis trois minutes plus tard de mémoire, l'un des trois modèles suivants : 1) FCR originale, 2) FCR transformée par permutation des positions de la croix et du losange, ou 3) FCR en miroir (positions des éléments inversés latéralement, « renversées »). Les analyses effectuées sur l'ordre d'exécution des différents éléments de la FCR dans les diverses situations expérimentales ont permis de dégager la conclusion générale que l'attrait présenté par un élément pour débiter le tracé de la FCR ou d'un modèle dérivé dépend de facteurs multiples, incluant les propriétés de l'élément (conditionnant notamment le degré de complexité d'exécution graphique), sa position dans l'espace de la figure (à cet égard, Delpature (1976) remarque que les résultats concernant la reproduction de la FCR sont moins bons lorsque la figure est présentée verticalement qu'horizontalement), les propriétés d'ensemble du modèle, l'environnement proche constitué par les traits qui entourent l'élément (en particulier la présence d'obliques).

Ainsi, les expériences conduites par Baldy et Chatillon (2002) sur la FCR montrent que la croix en haut et à gauche de la figure et le rectangle central sont des éléments qui jouent un rôle important mais variable selon l'âge des sujets dans l'initialisation et l'organisation du procédé d'exécution.

De nombreuses études (Karapetsas & Vlachos, 1992 ; Meyers & Meyers, 1996 ; Osterrieth, 1945 ; Rey, 1941, 1959) font état que l'organisation du procédé d'exécution de la FCR évolue au cours du développement. Néanmoins, d'autres travaux ont démontré que le mode d'organisation de la FCR dépend non seulement de l'âge, mais des conditions dans lesquelles est réalisé le tracé.

Ainsi, Baldy et Chatillon (1994) proposent une tâche de reproduction de la FCR dans différentes conditions d'exécution. L'expérience s'adresse à des enfants de 11 ans et des adultes, le choix de la population étant basé sur l'idée que c'est à partir de 11 ans que les enfants commencent à organiser le processus d'exécution utilisé dans la reproduction d'une figure géométrique complexe. Ce type d'organisation est la règle que suivent les adultes. Les sujets devaient soit reproduire (copier) la FCR, puis la dessiner de mémoire, soit « tracer » (surligner) cette même figure et la dessiner de mémoire. Dans la condition « traçage » (complètement de pointillés), le processus mis en jeu de façon prépondérante était la motricité. Dans la condition « copie », le processus mobilisé était la représentation. Nous retiendrons ici trois résultats : d'abord, l'organisation de l'exécution était davantage présente pour la modalité « copie ». Ensuite, l'organisation du processus de reproduction du dessin de mémoire était elle aussi plus présente en condition « copie » qu'en condition « surlignage ». Enfin, en reproduction de mémoire, les performances étaient meilleures chez les adultes, uniquement pour les sujets ayant dans un premier temps surligné la figure de Rey. En copie, la différence entre adultes et enfants n'était pas significative, ce qui indique que dans cette condition, aussi bien les adultes que les enfants de 11 ans structurent le dessin-modèle.

L'étude de Baldy, Chatillon et Cadopi (1994) illustre quant à elle comment des sujets d'âges différents (6, 8 et 10 ans), qui n'organisent pas spontanément l'exécution de la figure de Rey, le font (et le font durablement) lorsqu'on leur propose une démonstration organisée à partir du grand rectangle. Comme le souligne Gréco (1991), la représentation construite par le sujet et les propriétés de celle-ci dépendent de « la formulation implicite ou explicite que le sujet se donnera des observables [et des consignes] avant de les traiter » (p. 307). Ces observables (consignes orales, dessin-modèle, démonstration proposée au sujet avant l'exécution...) sont à l'origine de la signification qu'il attribue à la tâche avant de l'exécuter. La façon de présenter la tâche (l'ensemble du protocole : dispositif expérimental, matériel, conditions de passation, et de manière importante la consigne) affecte les procédés d'exécution utilisés par les sujets pour réaliser la tâche, en influençant directement la représentation qu'a l'enfant sur ce qu'il doit faire (à quel résultat il doit aboutir), mais surtout comment il doit le faire (sa façon d'opérer, de procéder). Si les consignes déterminent le but et les conditions d'exécution de la tâche (Leplat & Hoc, 1983), elles délimitent la signification donnée par le sujet à la tâche. Si les consignes imposent ou fixent, explicitement ou implicitement, une représentation particulière de la tâche, elles limitent par là même le nombre de procédures d'exécution possibles. La conséquence de ce phénomène est que les sujets risquent de procéder toujours de la même façon, les consignes trop astreignantes et contraignantes ayant réduisant fortement la part d'élaboration, de construction et d'organisation personnelle du sujet. La question du statut et du rôle de la démonstration dans un protocole expérimental se pose alors. Il semble en effet nécessaire de prendre en compte l'effet du contexte sémantique dans l'élaboration de la représentation du problème (Clément, 1996). La démonstration est une aide à l'exécution puisqu'elle la montre. Elle offre deux types de données complémentaires à celles dont le sujet dispose uniquement avec le dessin-modèle : celles relatives à la succession des déplacements du crayon, et celles relatives aux « états intermédiaires » (évolution de la forme et ordre des états par exemple) pris par le dessin en cours d'exécution. Dans la recherche de Baldy et al. (1994), chaque groupe d'âge était subdivisé en un groupe expérimental (bénéficiant d'une démonstration) et un groupe contrôle (simple observation du dessin-modèle). L'expérience comprenait plusieurs étapes : une exécution du dessin-modèle en copie et de mémoire, permettant une répartition des sujets qui dans la condition de reproduction de mémoire n'organisaient pas leur exécution sur la base du grand rectangle, dans les deux groupes (groupe expérimental et groupe contrôle). Puis il était demandé aux sujets d'exécuter un deuxième dessin de mémoire. Un mois plus tard, la stabilité des progrès était vérifiée en soumettant les sujets à l'exécution d'un troisième dessin de mémoire. Le bilan établi par les auteurs a fait ressortir qu'à 6 et 8 ans, la démonstration permet de noter des progrès quant à l'organisation de l'exécution du dessin. A partir de 8 ans, les progrès sont durables. A 10 ans, quelle que soit la condition (démonstration ou simple observation du dessin-modèle), les sujets organisent leur exécution. De plus, les progrès sont durables pour les deux conditions. En conclusion, les auteurs expliquent qu'il existe deux façons de se représenter le modèle, variant en fonction des capacités d'assimilation mentale du sujet qui évoluent au cours du développement. Chez les plus jeunes (avant 6 ou 7 ans), le dessin est vu comme une juxtaposition d'éléments. C'est pourquoi les sujets tracent toujours les lignes de proche en proche. Leur représentation n'est pas structurée. En revanche, chez les sujets plus âgés (dès 8 ans), on constate une prise en compte des états intermédiaires pouvant être pris successivement par le dessin en cours d'exécution. Le modèle est alors structuré, la représentation organisée. Cette faculté de structurer l'objet s'accroît au fil du développement. A 10 ans elle est déjà très prégnante (recherche quasi-systématique d'un élément organisateur du dessin lorsque cela est possible, utilisation d'un procédé d'exécution structuré...).

Plus tard, Baldy, Chatillon, Cadopi et Chanquoy (1996) ont mené une étude portant sur une tâche de copie de la FCR, selon deux conditions : accès / non accès à l'information visuelle. Pour organiser et contrôler l'exécution d'un dessin, les sujets peuvent se référer aux données visuelles (dessin-modèle, dessin en train d'être exécuté, espace de travail, main qui tient le crayon...) et/ou à leur représentation mentale. Dans cette recherche était étudié l'impact de l'absence de données visuelles sur l'organisation de la production graphique chez des enfants de 9 ans. L'expérimentateur relevait le degré d'organisation de la stratégie d'exécution, le nombre de levers du crayon et le nombre de lignes tracées. Les sujets copiaient le dessin, puis le reproduisaient de mémoire. Trois conditions visuelles étaient mises en place : condition « normale », condition « sans trace » (crayon qui n'écrit pas, le sujet produisant donc un dessin invivable), condition « sans vision ». Il s'avère que quand le contrôle des mouvements de la main est possible (condition « sans trace »), un grand nombre de sujets adoptent une « stratégie contour » (ils dessinent en premier lieu le contour de la figure), associée à un tracé continu (peu de levers de crayon). En condition « sans vision », la stratégie d'exécution n'est pas améliorée et la qualité des dessins produits est médiocre. En condition « normale », les sujets adoptent une stratégie organisée (à partir du large rectangle central de la figure de Rey). Les auteurs se sont interrogés pour savoir comment les contraintes imposées au dessin influençaient la stratégie d'exécution. Leurs questions portaient sur deux points : pourquoi dans les conditions « sans trace » et « sans vision » les sujets n'organisent-ils pas leur exécution sur la base du grand rectangle plus fréquemment ? Et pourquoi dans la condition « sans trace » le contour est-il si important ? A cette deuxième question les auteurs envisagent le fait que les sujets se trouvent dans l'obligation de ne pas « perdre le fil » du tracé, d'où l'intérêt du tracé en continu. En outre, le rôle de la « stratégie contour » en conditions « normale » et « sans trace » n'est pas le même : dans le premier cas, il permet une représentation structurée des propriétés spatiales de la figure. Dans le deuxième cas, il y a adaptation du mode de contrôle de l'exécution du dessin aux contraintes imposées dans la tâche. En condition « sans vision », les sujets entreprennent une démarche « pas à pas », se traduisant par la juxtaposition d'une série de lignes. En condition « sans trace », le tracé en continu est plus fréquent en copie que de mémoire, tandis qu'en condition « sans vision » la tendance s'inverse. En copie, contrairement à la condition reproduction de mémoire, l'organisation du tracé est facilitée par la présence du modèle. Les sujets peuvent alors se référer à tout moment au modèle, d'où la possibilité d'un tracé en continu.

Enfin, Baldy et Chatillon (2002) ont analysé l'effet de répétitions successives sur la mémorisation et l'organisation du procédé d'exécution de la FCR, afin de repérer les éléments les plus saillants de cette figure dans la représentation que les sujets s'en font à différentes périodes au cours du développement. Chez des enfants de 6, 8 et 10 ans ainsi que des adultes préparant un CAP, sont observés le degré d'organisation des procédés d'exécution (sept patrons de performances, échelonnés graduellement, sont définis), la qualité moyenne des dessins produits (en appliquant le barème de cotation de Rey), et l'évolution moyenne de la saillance des dessins exécutés. Pour chaque sujet, la procédure expérimentale comprenait quatre phases : 1) la copie de la FCR, 2) trois minutes plus tard la reproduction de mémoire de la FCR, 3) trois minutes après, à nouveau la reproduction de mémoire de la FCR, et 4) un mois plus tard, l'exécution de mémoire de cette même figure. Les résultats ont révélé qu'à 6 ans, les enfants ne sont pas sensibles aux changements de condition quand on passe de la copie à la reproduction de mémoire, ni même à la répétition du dessin dans la modalité de rappel. Entre 8 et 10 ans, le procédé d'exécution est plus souvent organisé. Il est organisé de façon plus systématique chez les adultes. De plus, quel que soit l'âge des sujets, lorsqu'il y a un progrès dans l'organisation du procédé

d'exécution, celui-ci est généralement stable. Il y a, du reste, une chute considérable de la qualité moyenne des dessins entre la copie et le premier dessin de mémoire. Aussi, si la qualité graphique augmente globalement avec l'âge, l'amélioration des productions est particulièrement accrue entre 8 et 10 ans. En outre, le changement de condition (copie/rappel) et la répétition de l'exécution de la figure ainsi que les réorganisations qui s'opèrent entre le premier dessin et le dernier un mois plus tard entraînent la construction d'une représentation épurée du modèle. Certains traits ou formes acquièrent une importance particulière (plus ou moins nette suivant l'âge des sujets) alors que d'autres sont oubliés.

Les procédés d'organisation d'exécution de la FCR privilégiés par les sujets au cours du développement sont donc susceptibles d'être conditionnés par le contexte expérimental. Celui-ci module la représentation mentale du but du sujet, qui élabore une stratégie de reproduction du modèle dépendante (au moins partiellement) des différents facteurs intervenant dans la résolution du problème.

Tout comme les auteurs ayant examiné l'évolution des procédés d'exécution de la FCR les plus prégnants à différentes périodes au cours du développement, des chercheurs ont identifié un mode d'organisation de l'exécution dominant dans la reproduction de dessins complexes composés de formes géométriques élémentaires : le « Principe de l'Exécution Centripète » (PEC). C'est précisément sur ce principe que portera notre recherche.

3.2. Le « Principe de l'Exécution Centripète » (PEC)

3.2.1. Le procédé de l'exécution centripète

Les études menées par Magnan, Baldy et Chatillon (1999) puis Magnan, Aimar et Baldy (2000) relatent l'existence d'un mode d'organisation de l'exécution dans la reproduction de dessins complexes composés de formes géométriques élémentaires emboîtées (cf. figure 3).

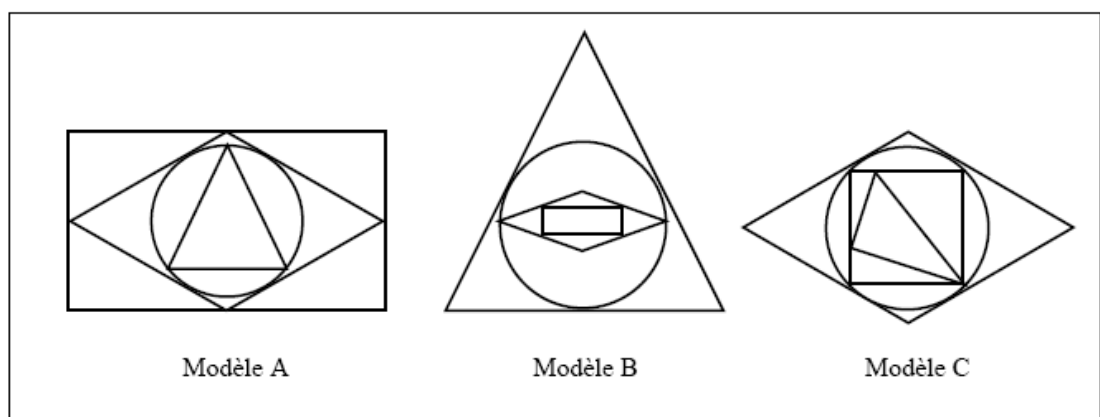


Figure 3 : Dessins-modèles utilisés par Magnan et al. (1999, 2000)

Le procédé d'organisation de l'exécution décrit par ces auteurs consiste à tracer successivement les différentes formes géométriques simples en adoptant une progression allant de la périphérie vers le centre. Ainsi, si nous prenons l'exemple du modèle A, le sujet dessine dans un premier temps le rectangle, qui est la figure la plus extérieure, puis le losange, le cercle, et enfin le triangle, qui est la forme la plus à l'intérieur du modèle. Au même titre que le rectangle central de la figure complexe de Rey, ce serait ici la forme extérieure du dessin qui agirait comme un « attracteur » dans l'initialisation du tracé. Le

sujet suit donc un ordre centripète dans l'exécution des diverses figures géométriques élémentaires composant les dessins.

En outre, en raison des propriétés de cette stratégie d'exécution, les auteurs ont qualifié celle-ci de "principe" d'organisation de l'exécution. On parle de "Principe de l'Exécution Centripète" (PEC).

3.2.2. Propriétés du PEC

L'ensemble des propriétés ayant conduit les auteurs à qualifier le mode d'organisation de l'exécution centripète de « principe » ont pu être dégagées à partir d'expériences dans lesquelles intervenaient des contextes variés. La stabilité du PEC a notamment été démontrée à travers l'analyse des stratégies d'exécution de dessins dans différentes situations expérimentales. Ces expériences visaient en particulier à introduire des conditions de réalisation de la tâche de reproduction censées perturber le PEC. Dans ce qui suit, nous exposons les expériences déjà menées sur le PEC et relatons les principaux résultats issus de ces recherches.

L'étude réalisée par Magnan et al. (1999) auprès d'enfants de 4 à 8 ans comprenait trois expériences. Dans la première d'entre elles, trois groupes d'enfants de 3, 4 et 5 ans devaient copier l'un ou l'autre des modèles A et B présentés plus haut (figure 3), puis, après une pause de trois minutes, reproduire de mémoire le dessin exploré. Les résultats ont révélé que les enfants de 3 ans étaient incapables de reproduire le dessin qui leur était présenté. Ils n'ont pas atteint « l'âge du modèle » (Lurçat, 1974, p.168). Chez les autres groupes, les auteurs relèvent que, suivant le modèle, environ un quart à la moitié des enfants de 4 ans copient et reproduisent de mémoire les dessins en suivant l'ordre d'exécution centripète (les auteurs mentionnent du reste qu'une partie des sujets de cet âge produisent des dessins incomplets, en particulier en situation de reproduction de mémoire), et qu'à l'âge de 5 ans le PEC devient la stratégie d'exécution dominante, quelle que soit la condition expérimentale (copie/reproduction de mémoire). Baldy, Chatillon et Cadopi (1993) avaient déjà étudié la coordination entre les règles d'exécution de figures géométriques élémentaires et la représentation que le sujet élabore en fonction des propriétés d'ensemble du dessin-modèle. Ils posaient la question suivante : l'ordre d'exécution des figures géométriques élémentaires est-il en conformité avec l'ordre de leur acquisition génétique (à savoir d'abord le rond, ensuite le rectangle, puis le triangle et enfin le losange) ou est-il différent de cet ordre ? L'expérience était strictement identique à celle décrite précédemment (mêmes population, matériel et procédure), de même que les résultats (préférence pour le PEC par rapport à l'ordre d'acquisition génétique). Mais ces auteurs posaient une question supplémentaire : pour répondre aux contraintes d'exécution liées aux propriétés d'ensemble du dessin-modèle, le sujet modifie-t-il le procédé d'exécution « habituel » de chaque figure élémentaire ? Une comparaison des procédés d'exécution du cercle selon qu'il est dessiné seul ou inscrit dans le triangle était alors effectuée. Pour ce faire, il était demandé à la moitié des sujets de copier le dessin A, puis de dessiner les figures élémentaires séparément, et inversement pour l'autre moitié des sujets. Dans chacune de ces deux conditions, les auteurs sollicitaient des enfants de 5 et 8 ans, ainsi que des adultes. Les résultats ont montré que le procédé d'exécution du cercle est susceptible de changer selon qu'il est seul ou inscrit dans le triangle. Les variations relevées diffèrent selon les groupes d'âge. De par les points de tangence, et en fonction des points d'initialisation du tracé, le sens d'exécution du cercle est horaire ou anti-horaire chez les enfants les plus jeunes. Chez les enfants de 8 ans et chez les adultes, que le cercle soit seul ou inscrit, le procédé d'exécution est inchangé, le sens de rotation étant toujours anti-horaire.

La deuxième expérience mise au point par Magnan et al. (1999) s'adressait à des enfants de 4, 5, 6, 7 et 8 ans. Elle visait à déterminer si l'usage du PEC était ou non dépendant du modèle. Pour ce faire, les auteurs ont choisi d'utiliser un modèle dans lequel les figures les plus complexes (le triangle et le losange) étaient situées en périphérie et à l'intérieur du modèle (modèle C de la figure 3). Les figures intermédiaires (le carré et le rond) correspondaient aux figures acquises les plus précocement au cours du développement. Dans cette expérience, les groupes de sujets copiant le modèle et le reproduisant de mémoire étaient indépendants, ceci afin de mobiliser davantage la capacité d'organisation ou de structuration du dessin perçu chez les sujets devant restituer le dessin de mémoire (la répétition de l'exécution étant susceptible de faciliter la reproduction de mémoire, en réduisant le niveau d'organisation requis par la tâche). Dans cette deuxième condition, le temps accordé aux enfants pour observer le modèle était de deux minutes, à la suite desquelles une pause de trois minutes était donnée, au cours de laquelle le sujet était invité à dessiner un bonhomme. Les auteurs ont alors observé qu'en situation de reproduction de mémoire, près de la moitié des sujets de 4 et 5 ans adoptaient une démarche pas à pas inefficace, consistant à tracer successivement des lignes appartenant à des formes simples différentes. Par exemple, l'enfant commençait par dessiner un côté du carré, puis un côté du triangle, poursuivait par une ligne adjacente au triangle, etc... En copie, l'ensemble des sujets exécutaient leur dessin en procédant figure par figure. Environ la moitié des enfants de 4 et 5 ans copiaient le dessin en recourant au PEC, l'autre moitié produisant un dessin incomplet ou ne suivant pas l'ordre d'exécution centripète. Chez les enfants de 6 et 7 ans, la majorité des sujets adoptaient le PEC en copie, mais seulement la moitié utilisaient cette même stratégie en reproduction de mémoire. Enfin, à l'âge de 8 ans, la quasi-totalité des sujets privilégiaient le PEC, que ce soit en copie ou en situation de rappel.

La troisième expérience avait pour objet de démontrer la prévalence et la stabilité du PEC, en tentant de le perturber. La méthode utilisée consistait à superposer devant le sujet les unes après les autres les figures géométriques élémentaires dessinées sur des transparents. Chaque forme simple était présentée pendant vingt secondes, et le modèle une fois recomposé était laissé visible durant deux minutes. L'expérimentateur faisait varier la séquence de superposition, afin d'étudier l'effet de la présentation d'un ordre de superposition des figures élémentaires sur le PEC. L'hypothèse formulée par les auteurs est que la séquence de superposition proposée au sujet est susceptible de modifier son procédé d'exécution. Une superposition facilitant la structuration du modèle (correspondant à l'utilisation d'un ordre d'exécution organisé) est la superposition centripète ou centrifuge. Cinq ordres étaient testés (on notera les différentes figures élémentaires par leurs initiales : T pour triangle, C pour carré, R pour rond, L pour losange) : TCRL (ordre centripète), LRCT (ordre centrifuge), CTRL, TRLC et RCTL (ordre génétique). L'ordre CTRL, contrairement à l'ordre TRLC, inclut la présence de points de tangence. Les sujets avaient 4, 5, 6, 7 et 8 ans. Ils devaient copier ou reproduire de mémoire l'un des modèles reconstitués (pour cette dernière condition, le déroulement de l'épreuve était similaire à celui précisé dans la deuxième expérience). Les résultats font ressortir qu'en copie, le PEC devient de plus en plus prégnant entre 4 et 6 ans, et devient le procédé dominant à partir de 7 ans. En situation de reproduction de mémoire, le PEC s'avère prévalent à 8 ans. Par ailleurs, lorsque la démonstration correspondait à l'ordre de présentation centrifuge des figures élémentaires, le nombre de sujets recourant au PEC augmentait avec l'âge, dans la copie comme dans la reproduction de mémoire. De la même manière, dans les situations où l'ordre de présentation était autre que l'ordre centripète, la fréquence d'apparition du PEC croissait avec l'âge, quelle que soit la condition (copie/reproduction de mémoire), témoignant du fait que le PEC semble se consolider et se stabiliser au cours du développement.

Par la suite, Magnan, Aimar et Baldy (2000) se sont interrogés sur l'origine du PEC. Ils émettent deux hypothèses relatives à l'origine du PEC. Ce principe découlerait :

1. soit des contraintes inhérentes à l'exécution de ce genre de dessin (un assemblage de plusieurs figures géométriques élémentaires, renvoyant aux caractéristiques spatiales du dessin et à la création d'un cadre de référence inscrivant les différentes figures). Dans ce cas, « ce sont ces contraintes qui structurent la représentation mentale du modèle élaborée par le sujet. Celui-ci se représente le modèle pour le dessiner. L'utilisation du PEC implique que la figure extérieure délimite l'espace du dessin dans l'espace de la page. Elle peut être exploitée par le sujet pour organiser son exécution. Elle sert de cadre de référence dans lequel le sujet inscrit la figure élémentaire suivante. A son tour, celle-ci délimite l'espace du dessin qui reste à exécuter et sert de cadre de référence pour l'exécution de la figure suivante. Ainsi, le dessin progresse de l'extérieur vers l'intérieur, chaque figure s'inscrivant dans l'espace de celle qui la précède. L'espace d'exécution, c'est-à-dire l'espace utile de la page se réduit. La figure extérieure dessinée structure l'ensemble du dessin et joue ainsi le rôle d'élément organisateur de l'exécution. » (Magnan et al., 2000, p. 200).
2. soit des contraintes liées aux propriétés de la représentation mentale que le sujet se construit du modèle. Dans ce cas, « on suppose que ce principe d'exécution est sous-tendu par une représentation dont la structure s'est imposée dès la lecture du modèle. D'emblée, le sujet voit le modèle comme une composition de quatre figures élémentaires emboîtées les unes dans les autres. Quand on lui demande de le dessiner, il exploite cette représentation et exécute le dessin tel qu'il le voit. Dans ce cas, ce ne sont pas les contraintes du tracé qui structurent la représentation que le sujet se fait du modèle, mais la structure de la représentation, qui s'est imposée au sujet dès la lecture du modèle, qui organise l'exécution. » (Magnan et al., 2000, p. 200).

Afin de départager ces deux interprétations, les auteurs proposent deux expériences. Dans la première d'entre elles, des enfants de 5, 6, 7 et 8 ans sont invités à reproduire le modèle C (cf. figure 3), dans l'une des trois situations testées : 1) copie, 2) recomposition par superposition des différentes figures élémentaires, ou 3) surlignage de l'esquisse du modèle. Les exigences de la tâche en termes d'organisation et de représentation ne sont pas équivalentes dans chacune de ces trois conditions. La copie du modèle requiert à la fois d'extraire les figures élémentaires et d'organiser l'exécution en assemblant les formes simples. En recomposition par superposition, les figures géométriques élémentaires sont déjà dessinées sur des transparents, et présentées aléatoirement ; l'opération d'extraction des formes simples n'étant plus à faire, les sujets n'ont alors plus qu'à assembler ces dernières. Quant à la tâche de surlignage de l'esquisse, la précision du tracé l'emporte sur la nécessité d'organiser l'exécution, les sujets n'ayant dès lors plus besoin de structurer leur procédé d'exécution. Le résultat principal est que le PEC émerge plus précocement et sa fréquence d'apparition est plus élevée en copie par rapport aux situations de recomposition et de surlignage. Ce résultat est en faveur de l'idée que le PEC découle de la représentation mentale du modèle élaborée par le sujet.

La deuxième expérience mettait en jeu les mêmes contextes expérimentaux (copie, recomposition et surlignage), mais les enfants devaient reproduire le dessin présenté (ici encore le modèle C) suite à une démonstration, durant laquelle le modèle était reconstitué par superposition des différentes figures élémentaires. Les auteurs ont repris le paradigme de Magnan et al. (1999), en conservant les mêmes ordres de présentation (centrifuge, centripète, génétique et quelconque/aléatoire). La tâche était cette fois pilotée

par ordinateur. En analysant l'ordre d'exécution des formes simples, les auteurs infèrent « l'organisation représentative que les sujets effectuent des propriétés graphiques du dessin » (Magnan et al., 2000, p. 205). Les sujets, âgés de 5, 6, 7 et 8 ans, étaient répartis entre les différents contextes expérimentaux et les quatre ordre de présentation (les groupes étaient indépendants). Les résultats que nous retiendrons sont les suivants : selon leur âge, les sujets ont parfois tendance à se centrer sur la séquence de superposition, notamment en situation de recomposition. Ils n'envisagent dès lors plus le modèle comme un emboîtement de figures élémentaires, mais comme une série de formes assemblées dans un ordre particulier, et s'imposent la contrainte de respecter l'ordre de présentation. Cette contrainte, implicite, modifie le but fixé, induisant un changement de représentation (Richard, 1990). Les propriétés de la situation sur lesquelles se centre le sujet affectent ainsi la stratégie de résolution du problème (Richard, Poitrenaud & Tijus, 1993). Néanmoins, quels que soient la tâche et l'ordre de présentation, le PEC devient de plus en plus prégnant au cours du développement.

Baldy, Chatillon et Magnan (2000) ont quant à eux montré que, dans le cas de la copie de dessins composés de formes géométriques élémentaires identiques (du point de vue figuratif), le procédé d'exécution centripète dominant chez les jeunes enfants (6 ans) devient centrifuge dominant chez les adultes, notamment lorsque le dessin est constitué de cercles concentriques. Le sujet est alors susceptible d'attribuer une signification au dessin, celui-ci pouvant être structuré comme une « cible » centrée sur le mille, et sous-tendre ainsi une exécution centrifuge. De plus, l'exécution centripète induit une plus grande fidélité quant à la taille du dessin, en particulier lorsque le sujet est jeune et si les figures sont difficiles à tracer. A partir de ces résultats, les auteurs soulignent que deux facteurs rendent compte de l'évolution de l'organisation de l'exécution : les contraintes de tracé et la structuration de la représentation mentale du modèle que le sujet construit.

Plus récemment, Biscara et Baldy (2001, 2002, 2003) ont mis en place un autre paradigme en vue de tester la stabilité du PEC. La tâche, soumise à des enfants de 6, 9 et 12 ans et à des adultes, consistait à reproduire un dessin composé de deux cercles concentriques (diamètres : 2 et 44 mm), séparés par un triangle isocèle (de base 32 mm et de hauteur 25 mm). Les enfants reproduisaient à 21 reprises le modèle, sur un carnet sur lequel était dessinée une série de 21 cercles dont la taille augmentait puis diminuait progressivement (sens « augmentation-diminution » : AD), ou inversement (sens « diminution-augmentation » : DA). Chacun des 21 cercles, figurant au centre d'une page, était réalisé à partir d'un continuum de 11 cercles, allant de 3 mm (cercle n°1) à 93 mm (cercle n°11), le diamètre variant graduellement de 9 mm. Pour chaque production, le sujet pouvait donc choisir de poursuivre le tracé du modèle (il restait à dessiner un cercle et un triangle) soit à l'intérieur du cercle déjà dessiné, soit à l'extérieur de celui-ci. L'hypothèse formulée était que si le PEC était stable, le tracé intérieur devrait être majoritaire, quel que soit le sens de présentation (AD/DA). Les résultats montrent un effet de l'âge, le nombre de tracés extérieurs devenant globalement de plus en plus élevé au cours du développement. De même, il existe un effet du sens de présentation, le nombre de tracés intérieurs s'avérant significativement supérieur pour le sens AD. De plus, l'interaction âge \times sens de présentation, elle aussi significative, rend compte du fait que la différence entre les deux sens de présentation quant à la fréquence d'apparition des tracés intérieurs s'atténue sensiblement au cours du développement (à l'âge adulte, cette différence est nulle), révélant que le PEC se stabilise au cours du développement.

Enfin, Russier et Magnan (1999) ont testé l'incidence du statut visuel sur le PEC. Elles ont sollicité deux groupes d'enfants, d'âge moyen 8 ans, répartis suivant leur

statut visuel : voyants vs aveugles congénitaux/précoces. Les enfants devaient reproduire successivement les dessins A et B (cf. figure 3), suite à une exploration haptique (les modèles étaient en relief). Les auteurs ont conservé la composition des modèles A et B, mais ont quelque peu modifié leur structure, en supprimant les points de tangence existant entre les formes géométriques élémentaires, afin de faciliter leur discrimination. Les résultats ont montré que, quel que soit le statut visuel, le PEC est le procédé d'exécution le plus récurrent. Toutefois, il existe un effet significatif du statut visuel sur la fréquence d'apparition du PEC. Cette dernière est moindre chez le groupe d'enfants présentant une cécité congénitale ou précoce. Ces données indiquent que pour organiser et contrôler la production d'un dessin, les sujets ne se réfèrent pas uniquement à des indices visuels. Cependant, elles suggèrent aussi que l'expérience visuelle du sujet semble en revanche jouer un rôle dans l'émergence du PEC.

Les différentes expériences portant sur le PEC ont ainsi permis d'établir les propriétés de ce dernier, qui justifient son statut de « principe » d'organisation de l'exécution. Les caractéristiques de ce principe sont les suivantes :

1. Il s'installe précocement (dès l'âge de 4 ans).
2. Il devient rapidement dominant (à partir de 6 ans) et semble se stabiliser au cours du développement (nous vérifierons cette stabilité dans diverses situations expérimentales).
3. Son émergence s'observe indépendamment de la structure spatiale du modèle (formes et positions relatives des différentes figures géométriques élémentaires).
4. Sa prévalence s'établit dans des contextes expérimentaux divers ; son caractère prégnant se vérifie aussi bien en copie qu'en situation de reproduction de mémoire. Dans la présente recherche, nous tenterons de montrer notamment dans quels cas le PEC est plus enclin à se généraliser, à différentes périodes au cours du développement.

Chapitre 2. Représentation et planification de l'action dans la résolution de problèmes

Dans ce deuxième chapitre, nous abordons en premier lieu la composante mnésique, qui occupe une place centrale dans le processus de planification de l'action à l'œuvre dans la résolution de problèmes, puisque celle-ci se base sur la représentation des données. Nous mettons l'accent sur l'encodage d'informations spatiales. Nous envisageons dans un second temps ces mêmes mécanismes dans une perspective développementale.

1. Le système mnésique, support des représentations

Lorsqu'un sujet se trouve face à une situation nouvelle, telle que la reproduction d'un dessin complexe inconnu, il ne dispose pas de solution toute prête (Karmiloff-Smith, 1990 ; Wallon & Mesmin, 2002). Aucune procédure automatisée ne peut alors être enclenchée. Par conséquent, le sujet doit mettre en œuvre une stratégie adaptée pour réaliser efficacement la tâche. Pour ce faire, il est amené à planifier son action. La planification de l'action est l'opération mentale visant à définir les étapes successives de résolution d'une situation-problème (Costermans, 1998 ; Kanellaki-Agathos & Richard, 1997 ; Richard, 1982). Le

système mnésique joue un rôle prépondérant dans l'opération de planification de l'action, puisqu'il constitue le support des représentations ou modèles mentaux (Siegler, 2001 ; Troadec & Martinot, 2003) que construit et/ou récupère le sujet tout au long de l'élaboration d'une stratégie de résolution d'un problème. Dans ce qui suit, nous nous attachons à définir les composantes du système mnésique pouvant intervenir dans les étapes de planification de l'action. La description des différentes composantes fonctionnelles du système mnésique sera rapportée plus spécifiquement aux activités spatiales.

1.1. Mémoire à court terme (MCT) et mémoire à long terme (MLT)

1.1.1. Fonctions respectives des mémoires à court et long termes

Nous avons vu que la résolution d'un problème passe par une étape de planification de l'action, durant laquelle le sujet élabore une représentation mentale lui permettant de structurer et d'organiser les différents éléments du problème afin de solutionner ce dernier de façon adaptée et efficace. La construction d'une telle représentation requiert le stockage en mémoire de l'ensemble des informations traitées. Suivant la finalité et les contraintes liées à la tâche, le sujet devra stocker l'information de façon temporaire, très brève, ou de manière plus permanente. En parlant des représentations visuelles (nous discuterons plus bas des différentes formes de représentations mentales), Kaski (2002) explique que deux mécanismes de génération des représentations sont possibles : le matériel visuel peut être rappelé à partir d'une mémoire à long terme, ou les images nouvellement perçues peuvent être stockées dans une mémoire à court terme. Si nous prenons l'exemple simple de la reproduction d'un dessin qui nous intéresse plus particulièrement dans le cadre de la présente recherche, il est possible de demander au sujet de copier le modèle qui lui est présenté, ou de le restituer de mémoire, après un délai de quelques minutes séparant l'exploration de l'exécution. La réalisation de la tâche dans chacune des conditions venant d'être énoncées requiert l'intervention de systèmes (ou sous-systèmes) mnésiques différents. En situation de copie, la durée nécessaire au maintien en mémoire de l'information traitée est très courte, puisqu'elle n'excède pas quelques secondes. C'est alors la mémoire "primaire" qui est opérante. Seron (1993) explique que « la mémoire primaire renvoie au fait que toute activité psychologique, même très brève, a une durée qui dépasse l'instant présent. La cohésion de nos actions requiert en effet un minimum d'intégration temporelle. Ce type de fonctionnement qui accompagne nos activités quotidiennes en leur assurant un minimum de cohésion a été appelé la mémoire primaire, la mémoire à court terme et plus récemment encore la "mémoire de travail", [qui] stocke les informations le temps nécessaire à leur exploitation » (pp.50-51). La mémoire de travail (MDT) peut encore être définie comme « la capacité de maintenir à l'esprit une information pendant un court moment, afin d'effectuer une tâche ou d'atteindre un but » (Petit & Zago, 2002, p.391). Ce système de mémoire, intervenant dans un décours temporel très réduit pendant le traitement de l'information, se distingue d'un autre système de mémoire opérant sur des durées temporelles beaucoup plus longues, appelé "mémoire à long terme" (MLT). Ce système mnésique contient l'ensemble des connaissances et savoir-faire que nous avons acquis de manière durable. Elle est à l'origine de l'activation de représentations ou de procédures automatisées lorsque le sujet se trouve face à un problème connu, déjà expérimenté, en présence duquel il dispose d'une solution toute prête. La MLT se subdivise en plusieurs sous-systèmes, dont un grand nombre d'auteurs postulent qu'ils fonctionneraient de façon autonome. Ainsi, Costermans (1998) relate la distinction entre la mémoire déclarative et la mémoire procédurale. Les connaissances procédurales renvoient aux programmes stockés en MLT (pas seulement moteurs, également ceux

donnant forme à des représentations mentales), alors que les connaissances déclaratives correspondent à des données épisodiques ou autobiographiques. Pour Tulving (1983), les informations contenues au sein de la mémoire déclarative sont de deux types : d'une part, des données épisodiques, relatives aux événements antérieurement vécus par le sujet (et donc autobiographiques), d'autre part des données sémantiques, correspondant à l'ensemble des connaissances générales accumulées (on parle aussi de "mémoire encyclopédique"). A cet égard, Tulving soutient l'idée de deux mémoires distinctes, dans la mesure où l'on peut noter des différences dans les procédures d'apprentissage, dans les principes d'organisation et dans les conditions de récupération de l'information. Parmi les divergences pointées, il souligne à quel point la mémoire sémantique, contrairement à la mémoire épisodique, donne prise aux activités d'inférence ou de raisonnement. Aussi, si nous envisageons le cas de la reproduction d'un dessin complexe composé de figures géométriques élémentaires (cas qui nous intéresse tout particulièrement dans cette recherche), le sujet sera en mesure d'extraire aisément les différentes formes simples s'il en a connaissance, c'est-à-dire si ces dernières sont stockées (et donc récupérables) au sein de la mémoire sémantique de la MLT. La perception d'un stimulus connu est propice à l'appariement de la représentation mentale construite par le sujet et stockée en MDT à la représentation mentale antérieurement stockée en MLT qui lui correspond. Ce mécanisme s'apparente au processus de résonance ou encore à la fonction d'écho décrits par Hintzman (1986) dans son modèle de la mémoire à « traces multiples ». Dans la perspective de résolution de problèmes dans laquelle s'inscrit notre recherche, notre intérêt se portera exclusivement sur la mémoire sémantique.

1.1.2. Un modèle intégrant la MCT et la MLT : le modèle séquentiel d'Atkinson et Shiffrin (1968)

Un des modèles princeps de la mémoire est le célèbre modèle développé par Atkinson et Shiffrin (1968). Selon ces auteurs, l'information est traitée en parallèle et très brièvement dans des systèmes sensoriels spécifiques pour chaque modalité perceptive. Elle est ensuite envoyée dans un système de mémoire à court terme aux capacités de stockage limitées (correspondant à l'empan mnésique du sujet, avoisinant 7 éléments, □ 2). Enfin, ce système communique avec un système de mémoire de stockage à long terme (cf. figure 4). Le système de stockage à court terme est aussi supposé assurer certaines fonctions de contrôle. Il intervient par exemple dans la réalisation d'opérations cognitives de transformation (Case, 1985), dans la recherche d'une information en MLT, ou encore dans le choix d'une stratégie de récupération de l'information traitée.

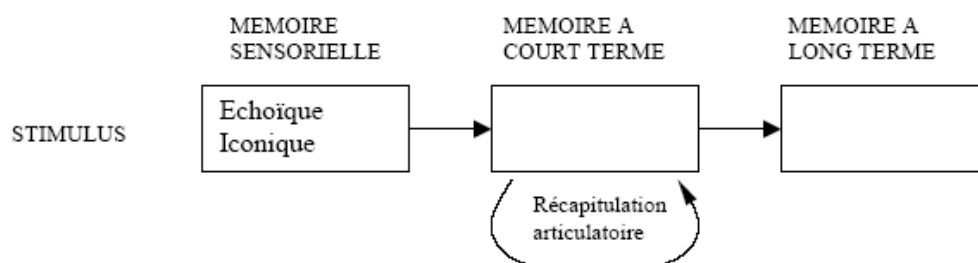


Figure 4 : Modèle séquentiel de la mémoire, d'après Atkinson et Shiffrin (1968)

Dans ce modèle, une information n'atteint le système de mémoire à long terme qu'après avoir transité par le système à court terme. De plus, les auteurs suggèrent que plus longtemps une information reste dans le système à court terme, plus il est probable qu'elle acquiert un statut plus durable et stable dans le système à long terme. Le maintien de l'information en MCT est facilité par le processus de "récapitulation articulatoire", consistant à se répéter mentalement l'information traitée (stockée sous forme verbale).

Malgré sa controverse, ce modèle est intéressant parce qu'il rend compte du mécanisme de transfert de l'information traitée de la MCT vers la MLT. Cependant, la prise en compte de la MCT en tant que système unitaire est apparue trop sommaire et insuffisante aux yeux de certains auteurs, qui ont mis en avant l'idée que la MCT (ou MDT) serait elle-même partagée en plusieurs composantes distinctes, activées ou non en fonction du type de matériel à traiter et de la modalité perceptive de présentation.

1.2. Les composantes de la mémoire de travail (MDT)

1.2.1. Le modèle de la MDT de Baddeley (1986, 1992)

Si, comme le relatent Petit et Zago (2002, p.392), « il existe différentes conceptions de la MDT, le modèle actuellement dominant en psychologie, en neuropsychologie et en neurobiologie est celui développé par Alan Baddeley ».

Dans son modèle de la MDT, Baddeley (1986, 1992) définit trois composantes (cf. figure 5 : 1/ un administrateur central, assisté de deux systèmes auxiliaires (qualifiés de systèmes "esclaves") : 2/ la boucle phonologique servant au maintien des informations verbales, et 3/ le calepin visuo-spatial pour le stockage des informations visuelles.

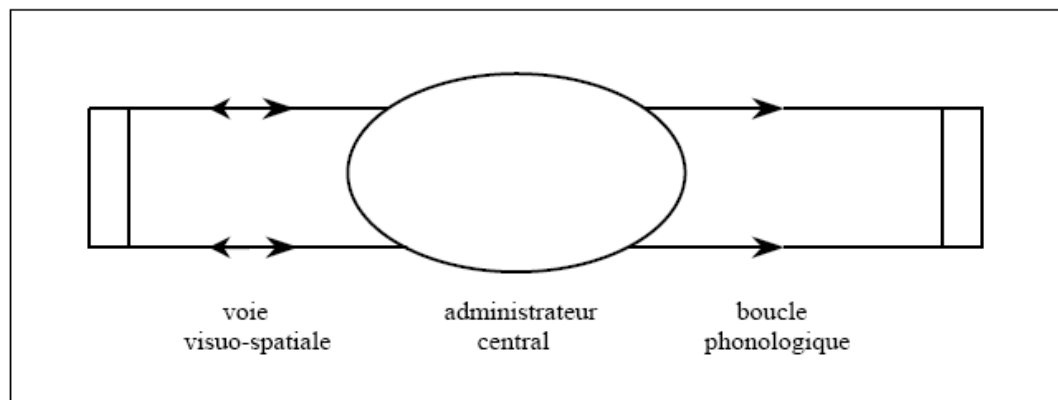


Figure 5 : Les composantes de la MDT selon Baddeley (1986, 1992)

La boucle phonologique (phonological loop) est constituée d'un registre de stockage de capacité limitée. Les représentations mnésiques phonologiques maintenues dans ce registre déclinent passivement en moins de deux secondes. Afin de combler cette lacune, la boucle phonologique est régie par un processus d'autorépétition subvocal qui « rafraîchit » l'information. Ce processus assure la conversion d'un stimulus verbalisable (par exemple, un objet présenté visuellement) en un code phonologique. Nous reviendrons ultérieurement plus en détails sur le format de stockage (visuel, imagé vs verbal, phonologique) des représentations en mémoire.

Le calepin visuo-spatial (visuo-spatial sketchpad) est responsable du maintien des informations spatiales et visuelles ainsi que de la manipulation des images mentales. De même que la boucle phonologique, ce calepin se subdivise en deux composantes : un registre de stockage passif et un processus de rafraîchissement par répétition.

L'administrateur central (central executive) est un système de capacité limitée, chargé d'allouer aux systèmes asservis (boucle phonologique et calepin visuo-spatial) les ressources attentionnelles suffisantes. Son rôle est primordial : il sélectionne, coordonne et contrôle les opérations de traitement. Pearson et Logie (1998) soulignent l'implication de ce processeur central dans « la planification, la prise de décision, la résolution de problème, et certains aspects de la compréhension du langage » (p. 140).

Le modèle établi par Baddeley (1986, 1992) s'avère tout à fait pertinent pour appréhender le lien existant entre la MDT et l'activité d'imagerie visuelle. C'est ce dont il va maintenant être question.

1.2.2. Imagerie mentale visuelle et mémoire de travail

L'imagerie mentale visuelle permet de générer, d'inspecter et de transformer une représentation visuelle en l'absence d'entrée (input) perceptive. Comme nous l'avons signalé auparavant, la mémoire de travail visuelle est un type de mémoire à court terme permettant le maintien d'une information visuelle ou visuo-spatiale lorsque l'entrée perceptive n'est plus disponible. Cette mémoire contribue à l'analyse exploratoire des images, grâce au calepin visuo-spatial, et à leur transformation, par le biais de l'exécuteur central (Baddeley, 1986, 1992 ; Baddeley & Hitch, 1994). Même si ces deux fonctions cognitives (imagerie mentale et mémoire de travail visuelle) sont sous-tendues par des processus cognitifs non strictement communs (Andrade, Kemps, Werniers, May & Szmalec, 2002), tels que le mécanisme de génération, paraissant propre à l'activité d'imagerie, elles partagent néanmoins la plupart des processus qui les constituent.

Cette proximité cognitive trouve une traduction au niveau neural. En effet, l'imagerie mentale visuelle n'est pas sous-tendue par une région corticale unique, mais par un ensemble de zones conjointement activées selon les exigences de la tâche. Si les aires visuelles sont naturellement impliquées dans l'activité d'imagerie visuelle, d'autres régions, non spécifiquement visuelles, participent également à cette activité. Ainsi, dans le cas de l'imagerie mentale spatiale, les activations pariétales s'accompagnent systématiquement d'une activation frontale bilatérale, démontrant que cette forme d'imagerie s'appuie sur un réseau pariéto-frontal. Il se trouve que ce réseau est rigoureusement identique à celui connu pour être activé dans les tâches de mémoire de travail visuo-spatiale (Mellet et al., 1995, Mellet et al., 2000, Courtney et al., 1998, cités par Mellet, 2002). Ainsi, le réseau sous-jacent à la mémoire de travail visuo-spatiale et à l'imagerie est similaire. Il matérialise les processus cognitifs partagés par ces deux activités. Toutefois, cette architecture n'est pas figée, mais susceptible d'incorporer des régions supplémentaires conduisant à l'émergence de propriétés nouvelles. Si la tâche d'imagerie visuelle spatiale s'applique à une image simple, comportant un nombre limité d'items (par exemple, imaginer trois croix disposées de telle sorte qu'elles occupent les sommets d'un triangle équilatéral), on peut supposer que le réseau pariéto-frontal de la MDT sera suffisant. Ce réseau peut être considéré comme le plus petit ensemble de régions nécessaires au traitement des représentations spatiales, que l'on se situe dans le cadre de la mémoire de travail ou de l'imagerie mentale. En revanche, si la représentation spatiale intègre un grand nombre d'items et doit respecter une métrique, alors ce réseau doit incorporer de nouvelles aires cérébrales. Ce phénomène a été observé par Mellet (2002), dans une étude en TEP (tomographie par

émission de positons) sur le déplacement mental. Dans cette recherche, un premier groupe de sujets apprenait un environnement en s'y déplaçant réellement, un deuxième groupe l'apprenait par l'intermédiaire d'une carte et un troisième construisait une représentation topographique de cet environnement en lisant un texte descriptif. Dans la caméra TEP, les trois groupes de sujets effectuaient la même tâche : à l'écoute d'un couple de repères, ils parcouraient mentalement la distance les séparant. Pour tous les groupes, une activation de la voie dorsale a été mise en évidence, témoignant de la nature spatiale de la tâche. Cependant, seuls les sujets ayant bénéficié d'un apprentissage visuel (par déambulation ou par carte) ont présenté une activation de la partie interne du lobe temporal droit dans une région intervenant dans le processus d'orientation, localisée entre l'hippocampe et le parahippocampe. En outre, le fait que les sujets qui n'ont eu à leur disposition qu'une description verbale de l'environnement ne présentent pas d'activation dans cette région, durant le déplacement mental, suggère que la partie interne du lobe temporal droit n'est mobilisée dans le rappel des représentations topographiques que lorsqu'un contact visuel a eu lieu avec l'environnement, et que le support neural de la représentation élaborée est donc fonction de la modalité d'apprentissage.

Dans la présente recherche, nous nous intéressons tout particulièrement au rôle de la MDT dans le traitement des informations visuo-spatiales. Aussi, un certain nombre de chercheurs se sont récemment penchés sur les propriétés fonctionnelles du calepin visuo-spatial, en tentant d'isoler et de spécifier les composantes de ce système.

1.2.3. La dissociation des composantes visuelle et spatiale du sous-système visuo-spatial de la MDT

La réalisation d'épreuves spatiales, telles que la copie d'un dessin, engendre l'émergence de représentations stockées en mémoire de travail (au moins pour un temps ou une étape du traitement) au sein du calepin visuo-spatial. Une tâche de ce type fait appel, au cours du traitement du modèle exploré par le sujet, à la mémoire de travail dite "visuelle" ou "visuo-spatiale", qui « prolonge, pour quelques secondes au plus, la durée d'un événement visuel alors que celui-ci n'est plus présent dans le champ perceptif » (Petit & Zago, 2002, p.377). Le sous-système visuo-spatial issu du modèle de Baddeley (1986, 1992) et décrit précédemment a fait l'objet de récents travaux, visant à démontrer l'existence de deux composantes distinctes possédant une certaine autonomie fonctionnelle, l'une visuelle, l'autre spatiale (Pearson & Logie, 1998). Cette dissociation a donné lieu à la distinction entre une MDT dite « objet », « dépicative » et non spatiale, d'une MDT strictement spatiale. Cette division fonctionnelle reflète l'organisation du système visuel avec, d'une part, sa voie ventrale occipito-temporale impliquée dans le traitement des informations visuelles figuratives et répondant à la question « quoi ? » (what ?) et, d'autre part, sa voie dorsale occipito-pariétale traitant les informations spatiales et répondant à la question « où ? » (where ?). Le terme de MDT fait référence au calepin visuo-spatial (Baddeley, 1986, 1992 ; Baddeley & Hitch, 1994) qui utilise les informations visuelles. Ce terme général couvre à la fois la MDT visuelle ou « objet », renvoyant à l'identité du stimulus, et la MDT spatiale correspondant à sa localisation dans l'espace. Ainsi, suivant le type de tâche, on peut étudier avec les mêmes stimuli visuels soit la MDT spatiale (où se trouve le stimulus ?), soit la MDT objet (quel est ce stimulus ?). Les études conduites par Logie (1995), Reisberg et Logie (1993) et Salways et Logie (1995) ont suggéré que les deux composantes du calepin visuo-spatial peuvent être appréhendées comme un "cache visuel" et un "scribe interne", travaillant en partenariat. Le cache visuel est censé traiter les informations de nature visuelle, telles que la forme et la couleur. Il assure le maintien de l'information visuo-spatiale (dont il est une réserve passive) et serait étroitement lié aux activités du système

perceptif visuel. Le scribe interne interviendrait pour le traitement des informations relatives aux séquences motrices (planification et contrôle des mouvements). Il servirait d'interface entre le cache visuel et le processeur exécutif central en transférant à ce dernier certaines informations contenues dans le cache visuel faisant l'objet de traitements approfondis ou destinées à guider des mouvements. Son rôle serait analogue à celui du processus de répétition subvocal de la boucle phonologique, puisqu'il "rafraîchirait" les contenus du cache visuel. Il serait indispensable au maintien de l'information nécessaire dans les activités d'imagerie (Baddeley & Andrade, 2000 ; Papagno, 2002 ; Pearson & Logie, 1998).

La distinction MDT visuelle vs MDT spatiale a pu être mise en évidence par des données neuropsychologiques. Ainsi, Della Salla, Gray, Baddeley, Allamo et Wilson (1999) ont relevé une double dissociation chez des adultes ayant une lésion cérébrale. Chez deux individus, ils ont relevé des performances anormalement basses dans une tâche spatiale (tâche des blocs de Corsi¹), et des performances d'un niveau moyen dans une tâche visuelle, alors qu'un troisième patient présentait le pattern opposé. Farah, Hammond, Levine & Calvanio (1988) ont détecté chez le patient LH, ayant subi une intervention chirurgicale suite à un accident de voiture, un trouble sélectif de la mémoire visuelle sans atteinte de la mémoire spatiale, tandis que Luzzati, Vecchi, Agazzi, Cesa-Bianchi et Vergani (1998) ont observé chez le patient EP une atteinte sévère de l'imagerie spatiale, alors que l'imagerie visuelle et la perception visuelle et spatiale étaient préservées. Récemment, Papagno (2002) a observé l'évolution des performances, durant trois ans, d'une femme de 52 ans (le cas PC) atteinte d'une pathologie dégénérative, sur un ensemble d'épreuves, incluant des tâches visuelles et spatiales. L'analyse des scores aux différentes épreuves au cours du temps a notamment révélé, chez cette patiente, une atteinte sévère de la composante spatiale, tandis que la reconnaissance d'objets n'est pas apparue déficitaire.

De nombreuses recherches expérimentales ont confirmé ces données neuropsychologiques. Hecker et Mapperson (1997) ont par exemple dissocié les composantes visuelle et spatiale du calepin visuo-spatial en utilisant une tâche d'interférence, en faisant varier la luminance ou la couleur d'environnements. Le changement de couleur dans un environnement stimule le système visuel parvocellulaire, qui est essentiellement impliqué dans la reconnaissance d'objets, alors que le changement de luminance stimule le système visuel magnocellulaire, qui intervient principalement dans le traitement du mouvement et de l'information spatiale (Mellet, 2002). S'appuyant sur le principe de la double dissociation, Hecker et Mapperson (1997) ont montré qu'un type d'interférence affectait une tâche spatiale, sans avoir d'incidence sur une tâche visuelle. En effet, la tâche spatiale était très affectée par les changements de luminance mais était très peu sensible aux changements chromatiques, tandis que dans la tâche visuelle les sujets étaient fortement perturbés par les changements de couleur, mais très peu réceptifs aux variations de luminance. Ces observations confirment les résultats de travaux antérieurs qui démontraient la double dissociation entre les composantes visuelle et spatiale du calepin visuo-spatial (Mecklinger & Müller, 1996 ; Tresh, Sinnamon & Seamon, 1993). Toutefois, des critiques ont été formulées à l'égard des études utilisant le paradigme d'interférence, dont deux principales. La première est qu'elles utilisent des tâches et des stimuli différents pour évaluer les opérations visuelle et spatiale, respectivement. Par conséquent, il n'est pas certain que les deux tâches soient équivalentes en termes de difficulté ou de complexité, ce qui peut exclure toute comparaison des effets d'interférence. La deuxième réside dans le

¹ La tâche des blocs de Corsi réside dans la présentation de séquences visuo-spatiales. A chaque essai, le sujet doit rappeler, dans l'ordre, la série des blocs touchés successivement par l'expérimentateur parmi un ensemble de neuf blocs fixés à une planche. La séquence peut être augmentée en longueur pour permettre une mesure de la performance (empan (*span*) de mémoire spatiale).

fait que, dans de nombreuses expériences portant sur l'analyse du calepin visuo-spatial de la MDT, le sujet doit rappeler le matériel de façon sérielle, c'est-à-dire en suivant l'ordre de présentation des stimuli. Les variables "type de processus" (visuel vs spatial) et "ordre du traitement" (visuel-spatial vs spatial-visuel) sont alors confondues, la deuxième impliquant l'exécuter central de la MDT. C'est pourquoi certains auteurs (Barton, Matthews, Farmer & Belyavin, 1995 ; Hale, Myerson, Rhee, Weiss & Abrams, 1996) recommandent une présentation simultanée ou séquentielle des stimuli avec un rappel libre. Smith, Jonides, Koeppe, Awh, Schumacher et Minoshima (1995) ont éliminé ces biais. Dans l'une de leurs expériences (expérience 3), ils présentaient une paire de formes sans signification (figures géométriques non régulières à quatre ou six côtés), et trois secondes plus tard, une seule forme. Le matériel était identique dans les deux tâches, visuelle et spatiale, qui ne différaient que par les consignes données aux sujets. Dans la tâche spatiale, les sujets devaient décider si le troisième stimulus (test) occupait la position de l'un des deux stimuli (cible) vus précédemment, même s'ils n'étaient pas de même forme. Dans la tâche visuelle, les sujets devaient décider si le stimulus-test était identique à l'un des deux stimuli présenté auparavant, indépendamment de la localisation spatiale des formes. Dans la moitié des cas, la réponse attendue était "non", puisque le stimulus-test était un distracteur. Ce distracteur était similaire ou dissimilaire (ressemblant mais non identique) à la cible, et se situait à proximité ou à distance de la position de la cible. Les résultats ont mis en évidence une double dissociation : la tâche spatiale était affectée par la variable "distance entre les stimuli test et cible" mais pas par la variable "similarité", alors que pour la tâche visuelle, c'est le phénomène inverse qui était relevé. Plus récemment, Baeyens et Bruyer (1999) ont répliqué la tâche de Smith et al. (1995) décrite précédemment, en considérant de façon plus précise le facteur spatial (localisation) dans la tâche visuelle et le facteur visuel (similarité de la forme) dans la tâche spatiale. En effet, dans l'étude conduite par Smith et al. (1995), le stimulus-test était systématiquement localisé à un endroit différent par rapport à la cible, mais il n'était pas précisé s'il était proche ou éloigné de cette dernière. Dans la tâche spatiale, la forme du stimulus test était toujours différente de la forme de la cible, mais il n'était pas précisé si ces deux formes étaient similaires ou dissimilaires. Baeyens et Bruyer ont donc complété l'étude de Smith et al. (1995), en considérant, pour chacune des tâches visuelle et spatiale, les facteurs "similarité des formes test et cible" (trois niveaux : identique/similaire/dissimilaire) et "positions des formes test et cible" (trois modalités : identiques/proches/éloignées). De plus, leur recherche se distingue de celle de Smith et al. (1995) car les analyses portent non pas seulement sur les réponses en présence d'un distracteur (réponses "non"), mais aussi sur les réponses "oui" (appariement entre les formes ou positions lorsque les figures cible et test sont identiques). Les résultats rendent compte de la dissociation entre une composante spatiale et une composante visuelle de la MDT. En effet, l'analyse des temps de réponses correctes et des taux d'erreurs montrent que la similarité visuelle des distracteurs perturbe la tâche visuelle mais pas la tâche spatiale, et la similarité spatiale des distracteurs affecte la tâche spatiale mais pas la tâche visuelle. Toutefois, la similarité visuelle a un effet significatif sur les performances dans la tâche spatiale (pour le temps de latence des réponses correctes), et la similarité spatiale influence les performances dans la tâche visuelle (à la fois pour le temps de latence des réponses correctes et le taux d'erreurs). Les auteurs discutent ces données en soulignant l'idée qu'elles ne remettraient pas en cause la dissociation entre les composantes visuelle et spatiale de la MDT, mais reflèteraient simplement les interactions possibles entre ces deux composantes.

D'autres travaux expérimentaux ont également mis en évidence la dissociation des composantes visuelle et spatiale de la MDT, en prenant en compte la dimension

développementale. Logie et Pearson (1997) ont administré une tâche visuelle de reconnaissance de patterns et une épreuve de type "blocs de Corsi" à des enfants de 5-6, 8-9 et 11-12 ans. Ils ont montré que si les enfants devenaient de plus en plus efficaces au cours du développement pour les deux tâches, l'accroissement de leurs performances était plus importante pour la tâche visuelle. Ils en ont conclu que d'une part, la composante visuelle du calepin visuo-spatial est distincte de la composante spatiale de la MDT visuo-spatiale, et d'autre part, qu'elle se développe plus rapidement. Toutefois, Pickering, Gathercole, Hall et Loyd (2001) soulignent que les tâches spatiales (comme l'épreuve des blocs de Corsi) et visuelles (telles que le rappel de patterns constitués de carrés blancs et noirs formant une matrice) ne diffèrent pas uniquement par rapport à la nature des composantes de la MDT qu'elles sollicitent. Elles se distinguent également quant à la manière dont l'information à rappeler est présentée : dans un format statique pour les tâches visuelles, dans un format dynamique pour les tâches spatiales. Aussi, afin d'être en mesure de dire auquel de ces deux types de processus (type d'information traitée : visuelle/spatiale, ou/et mode de présentation : statique/dynamique) les patterns de performance obtenus sont imputables, ces auteurs proposent une expérience (expérience 1) conduite auprès d'enfants de 5, 8 et 10 ans, dans laquelle ils dissocient dans les tâches qu'ils soumettent à la fois les aspects visuel et spatial et le mode de présentation, statique ou dynamique. La tâche visuelle administrée aux sujets consiste à recomposer, à partir d'une matrice vierge (grille remplie de cases blanches), la matrice présentée, composée de carrés blancs et noirs, en rappelant les positions de chacun des carrés noirs. La première matrice comprend quatre cases (2×2 cases), deux blanches et deux noires. Puis le niveau de difficulté augmente au cours de l'expérience : à chaque essai, deux cases supplémentaires (une blanche et une noire) sont ajoutées à la nouvelle matrice par rapport à la précédente. Deux versions sont proposées. Dans la version statique, chaque matrice apparaît dans son intégralité sur l'écran d'ordinateur, pendant un délai d'une demi-seconde. Dans la version dynamique, les carrés noirs de la matrice apparaissent les uns après les autres (un à un, l'intervalle de temps séparant l'apparition d'un carré noir et sa disparition coïncidant avec l'apparition du carré suivant est de une demi-seconde). Le sujet doit cette fois indiquer la position de chacun des carrés noirs, dans l'ordre de leur apparition dans la matrice. Il est à signaler que les auteurs se sont assurés initialement que les deux versions sont équivalentes du point de vue de leur niveau de complexité, en démontrant que le rappel d'une séquence dynamique n'est pas significativement plus difficile lorsque doivent être mémorisés à la fois les items et l'ordre que lorsque c'est uniquement l'ordre qui est requis. La tâche spatiale consistait à rappeler le chemin emprunté par le personnage figurant au centre d'un labyrinthe formé par des rectangles concentriques lacunaires sur leur périphérie (chaque rectangle comprenait deux espaces ou ouvertures) pour se diriger vers la sortie. Comme précédemment, le niveau de complexité de la tâche augmentait progressivement, par l'ajout, tous les quatre essais, d'un rectangle. Pour chaque labyrinthe (figurant dans un carnet-test) était tracée la route suivie par le personnage pour sortir. Le rappel se faisait sur un carnet-réponse sur lequel le sujet devait tracer, au moyen d'un crayon, l'itinéraire que le personnage avait parcouru pour sortir du labyrinthe. A nouveau, deux versions étaient possibles. Dans la version statique, les enfants visualisaient le tracé déjà réalisé de l'itinéraire. Chacun des labyrinthes-tests était alors montré pendant trois secondes. Dans la version dynamique, l'expérimentateur montrait avec son doigt l'itinéraire à suivre. L'enfant devait tracer le parcours emprunté par le personnage immédiatement après cette démonstration. Les analyses, réalisées sur les scores de chacune des tâches, ont révélé que les performances et leur accroissement avec l'âge étaient significativement supérieurs dans la version statique des tâches visuelle et spatiale comparativement à la version dynamique. L'interaction significative relevée pour les deux tâches entre l'âge et le format de présentation (statique vs dynamique) provenait

du fait que l'évolution développementale des performances dans la condition statique était plus importante que celle se rapportant à la condition dynamique. Des sous-systèmes distincts de la MDT visuo-spatiale seraient donc sensibles à l'aspect statique ou dynamique des stimuli visuo-spatiaux. Chen, Myerson, Hale et Simon (2000) ont évalué les capacités visuo-spatiales de jeunes adultes, en les testant aux épreuves d'une batterie comportant trois épreuves visuelles, requérant l'extraction d'informations relatives à un objet, telles que la forme, la couleur ou la texture, et quatre tâches spatiales, mobilisant l'attention spatiale, portant sur le jugement concernant la localisation d'un stimulus, ou nécessitant une opération de rotation mentale d'objets en deux et trois dimensions. Les résultats ont montré des différences intra-individuelles sur ces deux types d'épreuves, confortant l'hypothèse de deux voies, ventrale et dorsale, qui apparaissent, en dépit de leurs interconnexions, fonctionnellement différentes. Pourtant, par la suite, Chen, Myerson et Hale (2002) n'ont pas obtenu des résultats similaires en testant, sur les mêmes épreuves, des adultes âgés (sujets entre 65 et 75 ans), confirmant certains travaux rapportés en neuroimagerie. Par exemple, une dissociation claire a pu être mise en évidence entre les performances à une tâche de discrimination de visages et celles relevées à une tâche de localisation spatiale, alors que chez des adultes plus âgés, cette dissociation est moins nette (Grady, Maisog, Horwitz & Ungerleider, 1994). De plus, sur une variété de tâches, une plus grande activation frontale a été observée chez des adultes âgés comparativement à de jeunes adultes, ce que certains auteurs (Grady, 1998 ; Reuter-Lorenz, Stanczak & Miller, 1999) ont interprété en termes de compensation de certaines fonctions et de plasticité cérébrales. Chen et al. (2002) ont noté des corrélations plus élevées chez les jeunes adultes par rapport aux adultes âgés entre les scores aux épreuves de même type (visuel vs spatial) et plus faibles entre les performances aux épreuves mettant en jeu des systèmes différents. Les variations liées à l'âge sur le facteur "structure des capacités visuo-spatiales" reflèteraient une différenciation des systèmes visuel et spatial au niveau neural. En évaluant des sujets adultes sur un plus grand nombre d'épreuves et de façon plus précise, Boles (2002) a montré qu'il existe une variété importante de processus relatifs au traitement d'informations de nature visuo-spatiale, ce qui l'amène à distinguer deux niveaux d'influence en fonction des facteurs visuo-spatiaux en jeu : 1) d'une part, les "macro-influences", qui caractérisent les facteurs liés au type de traitement s'opérant selon la nature de l'information encodée, visuelle et spatiale, s'appuyant respectivement sur les systèmes ventral et dorsal ; 2) d'autre part, les "micro-influences", qui déterminent l'efficacité ou la performance propre à chaque sujet, et pour lesquels il est nécessaire de distinguer des processus fonctionnels plus spécifiques aux tâches à réaliser et aux caractéristiques particulières des informations visuo-spatiales traitées.

Ainsi, depuis le modèle de Baddeley (1986) de la MDT, de nombreux travaux ont montré que la composante visuo-spatiale n'est pas unitaire. Cette entité cognitive intègre des sous-systèmes variés, ayant donné lieu à des distinctions diverses concernant le type ou la nature des informations traitées. Ces sous-systèmes constituent le support des représentations mentales au sein desquelles sont intégrées les propriétés figuratives et spatiales. Toutefois, la construction de représentations mentales (notamment spatiales), à partir desquelles peut s'opérer un travail de planification de l'action, mobilise également de façon importante le système attentionnel. Dans ce qui suit, nous abordons le rôle des processus attentionnels dans la construction de représentations visuo-spatiales et dans la planification motrice.

1.3. Attention, représentation et planification de l'action

La question des relations pouvant exister entre certains mécanismes attentionnels et la construction de représentations dans des tâches requérant le traitement d'informations visuo-spatiales a été examinée dans diverses études.

Ainsi, plusieurs recherches ont été consacrées à l'analyse de la composante attentionnelle dans l'élaboration des représentations caractérisant deux des stades du modèle développemental du dessin de Luquet (1927) : les stades du réalisme intellectuel et du réalisme visuel (nous reviendrons ultérieurement sur ce modèle et relaterons alors l'ensemble des stades s'y rapportant). Pour Luquet (1927), les enfants avant l'âge de 8 ans ont tendance à produire des dessins qui reflètent leurs connaissances de la structure conceptuelle des objets, dans lesquels notamment figurent les éléments non perceptibles visuellement (effet de transparence). Après 8 ans, les enfants produisent des dessins en renonçant à leurs connaissances conceptuelles, et en s'appuyant uniquement sur les caractères visuels du monde qui les entoure. Etant donné que le réalisme intellectuel est lié à des représentations de connaissances conceptuelles des objets, les dessins apparaissent comme des représentations canoniques de ces objets, autrement dit des représentations stéréotypées permettant au dessin d'être plus facilement reconnaissable (Freeman, 1980). Néanmoins, de nombreuses recherches ont montré que les enfants de moins de 8 ans peuvent être incités à produire des dessins sur la base du réalisme visuel plutôt qu'en se fondant sur des représentations canoniques, en focalisant leur attention vers certains indices (informations locales), ou même simplement en mobilisant de manière accrue cette dernière. Davis et Bentley (1984) ont par exemple montré qu'en obligeant de jeunes enfants à dessiner dans un premier temps une tasse avec sa anse visible sur le côté, le réalisme visuel devenait beaucoup plus prégnant lors de l'exécution d'un dessin subséquent où l'enfant devait figurer une tasse avec sa anse non visible. Ces données ont amené certains chercheurs à se questionner sur la perspective selon laquelle le réalisme intellectuel et le réalisme visuel constituent véritablement deux étapes ou stades de développement distincts. Des auteurs proposent de considérer le réalisme intellectuel et le réalisme visuel comme deux stratégies adoptées par les enfants lorsqu'ils sont confrontés dans leurs dessins au problème de la représentation d'objets en trois dimensions (Chen & Holman, 1989). Par ailleurs, les effets de la consigne améliorent les performances (tâche de copie d'une figure) chez les jeunes enfants parce que les instructions aident les sujets à comprendre clairement ce qu'ils doivent faire. Les instructions utilisées par Lewis, Russel et Berridge (1993) consistent à demander aux enfants de « regarder très attentivement » le modèle, ce qui a pour effet d'accroître le réalisme visuel. De même, le fait de changer l'orientation du dessin-modèle devant l'enfant (Davis & Bentley, 1984) est susceptible de diriger son attention vers une vue spécifique du modèle. Il est possible que ces manipulations expérimentales affectent les performances, en influençant les stratégies de distribution de l'attention des enfants vers les dessins-modèles. Dans l'expérience conduite par Sutton & Rose (1998), les stratégies d'attention visuelle étaient estimées par des tâches de dessin, auprès d'enfants de 3 à 9 ans. Les consignes étaient manipulées pour tester l'effet hypothétique selon lequel le fait d'entraîner une plus grande attention augmente le niveau de réalisme visuel. L'hypothèse testée était la suivante : les enfants produisant des dessins sur la base du réalisme intellectuel ou du réalisme visuel diffèrent en termes de stratégies attentionnelles plutôt qu'en termes de stades de développement. Les résultats ont prouvé que la progression du réalisme intellectuel au réalisme visuel a lieu entre 6 et 8 ans, et s'accompagne d'une augmentation spontanée de l'attention vers les dessins-modèles. A tous les âges, les instructions explicites accroissent l'attention portée sur le modèle, et l'utilisation d'une stratégie attentionnelle efficace est associée au réalisme visuel. Aussi, les sujets s'appuyant sur le réalisme visuel portent leur attention sur le modèle de façon continue alors qu'ils sont en train de le dessiner. Le fait de provoquer ou d'induire des comportements attentionnels révèle comment les enfants réagissent à différents types d'instructions, c'est-à-dire en faisant varier leurs stratégies attentionnelles. Les enfants les

plus jeunes comprennent qu'on leur demande d'être attentifs au modèle (en le regardant régulièrement par exemple), mais ne semblent pas utiliser cette consigne efficacement. Les enfants les plus âgés adoptent une stratégie plus bénéfique : en coordonnant leur attention visuelle avec la production qu'ils sont en train de réaliser, ils effectuent la tâche avec succès. En outre, les effets d'âge concernant le réalisme du dessin reflètent le développement des capacités de l'enfant d'utiliser une stratégie attentionnelle appropriée, et démontrent par conséquent que le réalisme intellectuel et le réalisme visuel ne sont pas des stades de développement distincts relativement à l'activité de dessin. En fait, à partir du moment où les enfants commencent à développer leur aptitude à avoir recours efficacement à une stratégie attentionnelle, et deviennent capables de comparer de manière continue leur dessin avec l'apparence des objets placés devant eux (ou des modèles qu'ils consultent), leurs productions correspondent plus justement et plus précisément à leur « monde visuel ».

Dans leur revue de questions portant sur le développement des traitements analytique et global, Thibaut et Gelaes (2002) exposent les principales théories relatives à l'évolution du mode d'appréhension ou d'analyse perceptive de stimuli, notamment déterminée par la composante attentionnelle. Ils relatent une diversité de facteurs et de processus pouvant rendre compte de différences dans le traitement de stimuli dans différentes tâches au cours du développement, tels que la sensibilité à des similitudes et des différences perceptives et à la saillance visuelle relatives aux informations locales ou parties constitutives des stimuli, la flexibilité représentationnelle, les connaissances conceptuelles, la nature des mécanismes (préattentifs, c'est-à-dire automatiques, non conscients, ou postperceptifs, c'est-à-dire contrôlés, conscients) au cours du traitement, les capacités d'attention sélective, d'inhibition (désengagement de l'attention) et de mémorisation d'informations, l'utilisation de propriétés configurales émergentes et de planification de l'action.

La récente étude conduite par Brown, Johnson, Paterson, Gilmore, Longhi et Karmiloff-Smith (2003) auprès de jeunes enfants (moins de trois ans) sains et de sujets atteints du syndrome de Williams et du syndrome de Down (deux syndromes entraînant des déficits visuo-spatiaux), a permis quant à elle de rendre compte de l'incidence de déficits attentionnels dans la construction de représentations spatiales et dans la planification oculomotrice (saccades oculaires sous-tendant les actions visuellement guidées), ces derniers pouvant être liés à un déficit de désengagement de l'attention.

Nous avons vu qu'aussi bien les performances dans des tâches de MDT visuo-spatiale que les stratégies attentionnelles évoluent au cours du développement, témoignant des changements cognitifs s'opérant au niveau représentationnel. Nous allons à présent nous intéresser, dans les activités de nature spatiale (et notamment à travers l'activité de dessin), à l'évolution des capacités représentationnelles et de planification de l'action au cours du développement.

2. Représentation, planification de l'action et développement cognitif

2.1. L'évolution des représentations dans l'activité de dessin

Les recherches relatives à l'activité de dessin présentent un grand intérêt en psychologie cognitive, car elles contribuent à l'étude du développement cognitif. Certaines font état de l'existence d'une relation entre les compétences graphiques ou picturales des enfants et leurs capacités intellectuelles (Bertrand, Mervis & Eisenberg, 1997 ; Stiles, Sabbadini, Capirci & Volterra, 2000). A cet égard, des échelles de développement (ou de maturité intellectuelle) ont d'ailleurs été construites sur la base de l'analyse des caractéristiques de

productions graphiques (Barrouillet, Fayol & Chevrot, 1994 ; Goodenough, 1926 ; Harris, 1963 ; Koppitz, 1968). Comme nous le verrons, les changements s'opérant au cours du développement traduisent notamment l'étendue des connaissances sémantiques ou conceptuelles du sujet. Ils sont également la manifestation de la mise en place progressive d'autres processus ayant trait au système représentationnel, en particulier ceux touchant la dimension visuo-spatiale.

Dans cette perspective développementale, le modèle de Luquet (1927), bien que déjà ancien, demeure l'un des rares à rendre compte, à travers l'évolution du dessin enfantin, des changements représentationnels majeurs, en particulier ceux en rapport à la construction de l'espace. Cet auteur définit quatre phases ou stades principaux, en référence à la succession chronologique des différents types de manifestations graphiques chez l'enfant. Le premier est le stade du « réalisme fortuit » (vers 2 ans), correspondant à la fin de la période du gribouillage. A ce stade, il n'y a pas de volonté de représentation initiale. L'enfant exécute un tracé pour le plaisir de tracer des lignes, jusqu'à ce qu'il remarque un jour une analogie entre l'un de ses dessins et un objet réel. Il va alors considérer le tracé comme une représentation de l'objet et énoncer l'interprétation qu'il en donne. Le hasard, une association d'idées imprévues vont contribuer à donner du sens au dessin, à quelque chose qui ressemble à un gribouillage. L'enfant va nommer rétrospectivement son dessin. Le deuxième stade est celui du « réalisme manqué » (à 3-4 ans). L'enfant qui a découvert l'identité forme/objet cherche à reproduire cette forme. Il va annoncer ce qu'il a l'intention de dessiner mais ne parvient pas à faire ressembler son dessin à l'objet réel. Les maladroresses graphiques et psychiques (caractère discontinu de l'attention) donnent lieu à des dessins difficilement identifiables. L'imperfection du dessin, caractéristique primordiale de la phase du réalisme manqué, est appelée « incapacité synthétique » par Luquet. Puis vient le stade du « réalisme intellectuel » (4-5 ans à 8 ans environ), où l'enfant dessine ce qu'il sait plutôt que ce qu'il voit. Le « modèle interne » intervient alors. La notion de « modèle interne » renvoie à la réfraction de l'objet à dessiner à travers l'esprit de l'enfant. L'enfant dessine d'après ce modèle, plus ou moins éloigné de la réalité sensible. La perspective est en général absente, les objets peuvent être disproportionnés, les figurations sont souvent transparentes, il y a des rabattements. Dans cette phase, un dessin doit contenir tous les éléments réels (même invisibles) pour être ressemblant. Le dernier stade est celui du « réalisme visuel » (de 8 ans à 12 ans en moyenne). Les dessins deviennent à cette période de plus en plus comparables à ceux de l'adulte, avec la présence de détails significatifs. Plans d'éloignement, perspective, formes sont respectés. Il y a abandon des caractéristiques du stade précédent (plus de transparence ni de rabattement...).

Par la suite, Piaget et Inhelder (1947) et Piaget, Inhelder et Szeminska (1948) ont décrit différentes étapes de la construction de l'espace, liées à des changements d'ordre représentationnel. Comme nous l'avons vu, la dimension représentationnelle joue un rôle primordial dans le traitement des informations spatiales. En effet, la réalisation de tâches visuo-spatiales repose sur le stockage en mémoire des propriétés du stimulus exploré. Elle s'appuie également sur l'utilisation d'un cadre de référence spatiale. Au cours du développement, le sujet passe par l'établissement de différents cadres de références, qui l'amènent à appréhender et à structurer le monde qui l'entoure dans sa dimension spatiale de façon changeante au cours du développement. Ainsi, pour Piaget et Inhelder (1947) et Piaget, Inhelder et Szeminska (1948), la construction d'un espace dans lequel sont envisagées à la fois les coordonnées déterminant la position d'un élément dans l'espace et les relations spatiales entre plusieurs éléments, n'apparaît pas avant 7 ou 8 ans. Auparavant, l'enfant, incapable de se décentrer, n'est pas en mesure de coordonner les points de vue sur l'objet ni les perspectives, indispensables à la constance de la forme

et de la grandeur. Il est alors dans la période que Piaget qualifie d' « égocentrique ». L'égocentrisme est l'aspect central de la pensée enfantine de 2-3 ans à 7-8 ans. Il correspond à un état « d'indifférenciation du point de vue propre et de celui des autres, ou de l'activité propre et des transformations de l'objet » (Piaget, 1923, p.67). Il se manifeste dans tous les secteurs de l'activité de l'enfant, en particulier dans le jeu symbolique, qui est « l'assimilation du monde extérieur et des personnes aux exigences du moi et à ses points de vue » (Dolle, 1991, p.27). Ainsi, par exemple, les notions spatiales ne sont pas relativisées : la gauche, la droite sont toujours référées au point de vue propre érigé en point de vue absolu. A cette période, on note également une absence de mise en relation des perspectives ou des différents plans de l'espace. Par la suite, la décentration nécessaire à une pensée plus objective (ou opératoire) permettra la constitution d'un cadre de référence exocentré.

2.2. La "flexibilité représentationnelle" : un indicateur du développement cognitif

L'étude des changements relatifs à la dimension représentationnelle et à la capacité de planification au cours du développement a été envisagée à travers la notion de flexibilité représentationnelle. Cette dernière a été abordée dans diverses activités, telles que le dessin ou la résolution de problèmes. Aussi, une des raisons de s'intéresser au dessin chez l'enfant est de l'utiliser comme source d'explication de processus plus généraux à l'origine de compétences et de changements représentationnels.

Karmiloff-Smith (1990) a montré que l'une des façons d'acquérir de nouvelles connaissances est d'exploiter les connaissances déjà représentées, en opérant un processus de changement de représentation interne. Dans cette optique, elle décrit dans son modèle du changement de représentation deux phases : une première phase, implicite (non consciente), de développement (connaissance représentée de manière procédurale), et une phase explicite de « redescription de la représentation » : la connaissance, qui se limitait exclusivement au fonctionnement efficace de certaines procédures, devient disponible pour d'autres parties du système cognitif. Dans cette phase, la connaissance est « restructurée », remaniée, de sorte qu'elle devienne adaptée pour traiter d'autres types d'informations. En d'autres termes, les éléments constitutifs de la même connaissance sont à nouveau représentés à des niveaux d'abstraction différents. Le processus de redescription de la représentation, consistant en un changement de pallier (passage d'un niveau à un autre niveau d'abstraction supérieur au premier, de telle sorte que la connaissance soit finalement représentée à deux niveaux différents), autorise la flexibilité et la créativité représentationnelle. Karmiloff-Smith (1990) fait l'hypothèse que le premier niveau de redescription de la représentation interne est contraint par le caractère inhérent au niveau de la procédure. Cette contrainte signifie qu'il y a relativement peu de flexibilité intra-représentationnelle (flexibilité à l'intérieur d'une même représentation). Les changements introduits au niveau de la représentation sont limités. A ce premier niveau, la flexibilité inter-représentationnelle (passage d'une représentation à une autre) est également faible. En effet, l'enfant ne peut pas lier la représentation nouvellement construite avec d'autres représentations situées en dehors du domaine de départ. Plus tard dans le développement, après de multiples redescriptions, la contrainte de séquentialité dans la procédure s'atténue, jusqu'à donner lieu à une représentation interne possédant une structure ouverte (non encapsulée), rendant possible la flexibilité intra-représentationnelle (connexions à l'intérieur d'un même domaine de connaissances). Le système s'ouvre également progressivement à la flexibilité inter-représentationnelle (échanges ou transferts représentationnels à travers des domaines de connaissances différents). Dans sa recherche, Karmiloff-Smith (1990)

utilise les dessins d'enfants pour analyser le changement et la flexibilité de la représentation interne, et les contraintes sur ces derniers. L'auteur tente de repérer les processus auxquels les enfants peuvent faire appel pour modifier avec succès leurs procédures concernant le dessin, quand on leur fixe de nouveaux buts (en proposant des tâches nouvelles). Les sujets ont entre 4 et 11 ans, et chacun d'eux produit six dessins : une maison, une maison qui n'existe pas, le principe étant le même avec le dessin d'un homme et celui d'un animal. Cette technique oblige les enfants à opérer sur leurs procédures de dessin normales et efficaces. Les résultats rendent compte de différences entre le groupe des 4-6 ans et celui des 8-10 ans. Les modifications introduites par les premiers résident en des suppressions et des changements de taille et de forme. Les modifications apportées par le groupe des 8-10 ans touchent la position et l'orientation des éléments, et l'ajout d'éléments provenant d'autres catégories conceptuelles, résultant de la flexibilité inter-représentationnelle. L'auteur fait ressortir dans son analyse que le premier niveau de redescription de la représentation interne de la connaissance est spécifié comme liste séquentielle fixe, incarnant la contrainte séquentielle inhérente au niveau procédural. Il s'agit là d'un niveau de redescription relativement rigide, laissant peu de place à la flexibilité représentationnelle. Deux types de contraintes séquentielles sont dégagées dans cette étude : une contrainte ordonnée de façon rigide, qui ne peut subir de modifications. La contrainte de séquentialité est à mettre en lien avec la rigidité intra-représentationnelle qui, en « s'assouplissant », devient l'un des processus en lien avec la flexibilité inter-représentationnelle. La deuxième contrainte porte sur le changement des représentations internes. Le développement semble se fonder en partie sur des cycles répétés de changements représentationnels, à partir du simple fonctionnement de procédures automatisées d'une part, et de redescriptions de représentations internes se présentant comme une liste séquentielle fixe d'autre part, ainsi que des représentations internes dont la structure ordonnée est flexible, c'est-à-dire de concepts manipulables. Selon Berti et Freeman (1997), le développement représentationnel peut être évalué à partir du moment où les enfants sont capables de renoncer à des procédures routinières afin de dessiner quelque chose de nouveau. Il existerait deux ressources permettant l'innovation : la capacité précoce de réagir aux modèles externes et, plus tard, la capacité de flexibilité des enfants de devenir pro-actifs en l'absence de modèles. Berti et Freeman (1997) envisagent l'hypothèse d'une troisième ressource résidant dans l'utilisation par les enfants de leur cadre théorique ou conceptuel du possible (qu'est-ce qui, pour eux, est imaginable, ou au contraire, impossible ?). A travers une série d'expériences menées auprès d'enfants de 5 et 9 ans, ces auteurs changent les routines dans l'exécution d'un dessin. Ils demandent aux sujets de dessiner un homme qui n'existe pas, puis un homme à qui il manquerait quelque chose. Des tâches plus spécifiques (contenant des instructions plus précises) sont également effectuées par les sujets : il s'agit de dessiner successivement un homme à deux têtes, un homme sans tête, un homme sans tronc, un homme qui est à la fois un homme et un animal, un homme qui est à la fois un homme et une maison. Les résultats montrent que les enfants les plus âgés : 1) font preuve spontanément d'innovation, obtenue chez les enfants plus jeunes lorsque les instructions sont spécifiques, 2) sont relativement imaginatifs (font des liens par eux-mêmes) là où les enfants plus jeunes font des liens davantage en rapport avec des modèles externes, 3) sont plus performants au niveau de la planification, 4) contrôlent plus l'exécution de leur dessin émergent, et 5) ont souvent bien plus conscience de ce qu'ils font. Les auteurs expliquent que l'utilisation de modèles externes joue un rôle précocement au niveau de l'inspiration ou de l'imagination mais en même temps masque l'importance d'une ressource interne. Le bilan de cette recherche nous apprend que trois ressources peuvent encourager le changement dans le dessin : l'intériorisation de modèles externes (processus exogène), une redescription

endogène des représentations mentales et la consolidation d'un cadre théorique général de possibilités.

Néanmoins, les résultats de recherches subséquentes (Picard & Vinter, 1999 ; Spensley & Taylor, 1999 ; Zhi, Thomas & Robinson, 1997) infirment l'idée d'une rigidité dans les dessin des jeunes enfants, témoignant d'une incapacité à accéder à une flexibilité représentationnelle. Ces études ont en effet montré que déjà à l'âge de 4-5 ans, les enfants 1) parviennent à produire des dessins inhabituels (personnages ou objets incongrus) si les instructions et le matériel utilisés permettent une compréhension claire des manipulations requises, et 2) sont capables d'introduire de nouveaux items au cours de l'exécution de leurs dessins. Ces travaux ont ainsi établi que les dessins des jeunes enfants ne sont pas régis par des procédures totalement rigides, ce qui a amené Karmiloff-Smith (1999) à revoir son modèle initial. Toutefois, elle suggère l'idée que le comportement observé dans l'activité de dessin pourrait s'appuyer sur des routines appliquées partiellement (« sub-routines ») à la production graphique (par exemple, une procédure rigide pour dessiner la tête d'un homme plutôt qu'une procédure rigide pour dessiner entièrement ce même homme). Aussi, une raison pouvant expliquer le manque de données en faveur du recours à des procédures totalement rigides caractérisant la première phase de son modèle résiderait dans la permanence de la trace graphique, la présence d'indices visuels (feedback perceptif) étant à l'origine de l'interruption procédurale. Barlow, Jolley, White et Galbraith (2003) ont conduit une recherche visant à vérifier si le processus de changement représentationnel est inhibé chez les jeunes enfants en raison de contraintes relatives à l'ordre dans lequel les éléments de la représentation sont dessinés, c'est-à-dire à la rigidité procédurale. Dans une première expérience, des enfants de 4 à 8 ans produisaient trois dessins évoquant un sujet familier et un sujet nouveau, afin d'évaluer leur rigidité procédurale. Dans un dessin supplémentaire, il était demandé aux enfants de modifier leur représentation habituelle de chacun des sujets. Les résultats ont révélé que le niveau de rigidité procédurale n'était pas prédictif de la performance de dessin (relativement aux aspects figuratifs et spatiaux des éléments). Deux autres expériences incluant des enfants de 3 à 6 ans ont montré que, lorsqu'ils répondent à des instructions spécifiques, les jeunes enfants s'avèrent capables d'accéder à leurs procédures rigides relativement au tracé d'éléments locaux d'un dessin familier (« rigid sub-procedures ») et de les interrompre. Enfin, dans une quatrième expérience, des enfants de 5 et 8 ans devaient produire des dessins d'objets familiers et atypiques (irréels, et donc inconnus), dans l'une des deux conditions d'exécution, avec ou sans trace graphique. Contrairement à la prédiction envisagée par Karmiloff-Smith (1999), les enfants faisaient preuve d'une plus grande rigidité dans la condition d'exécution avec contrôle visuel sur la trace graphique. En outre, là encore, les résultats n'ont pas permis d'établir une relation entre la rigidité procédurale et le changement représentationnel. Les auteurs suggèrent une révision du concept de rigidité procédurale dans l'activité de dessin, le modèle de « redescription représentationnelle » de Karmiloff-Smith pouvant du reste demeurer une théorie générale (« domain-general theory ») du développement cognitif. La translation de ce concept du domaine du langage parlé (le modèle de redescription représentationnelle ayant été initialement développé en lien avec ce domaine) vers celui du dessin pourrait être inappropriée. Ils soulignent également le rôle crucial des mécanismes de traitement de l'information (notamment le développement de la mémoire de travail, de la capacité de planification de l'action et des fonctions exécutives) dans la flexibilité liée à l'activité de dessin.

Nous venons de voir à travers le modèle du développement cognitif de Karmiloff-Smith (1990, 1999) que l'évolution des performances dans une tâche inhabituelle de dessin permet, sous certaines conditions, d'évaluer la rigidité des procédures établies et la flexibilité

des conduites. Aussi, si le sujet apprend le modèle pour le reproduire de mémoire, il doit élaborer une représentation permettant de guider l'exécution. Une image mentale construite et stockée dans le calepin visuo-spatial est plausible (Baddeley, 1986, 1992). Une préparation très rigide se traduit par de bonnes performances lorsque le but du test est celui annoncé, mais provoque des performances nettement plus faibles quand la tâche-test n'est plus parfaitement en adéquation avec celle prévue. L'écart de performances entre les deux conditions est l'indice de la capacité des sujets de s'adapter à l'imprévu. L'étude de Baldy, Chatillon et Cadopi (1998) porte sur ces aspects. Dans une expérience, ces auteurs proposent à des sujets d'âges différents (6, 8, 10, 12, 15 ans et adultes) des tâches de dessin, où chacun d'entre eux apprend un dessin-modèle soit pour le reproduire de mémoire, soit pour le reconnaître parmi d'autres dessins. La tâche-test est soit en accord avec l'apprentissage (apprendre pour dessiner et dessiner, ou apprendre pour reconnaître et reconnaître), soit en désaccord (apprendre pour dessiner et reconnaître ; apprendre pour reconnaître et dessiner). Le modèle utilisé est une fois de plus la figure de Rey. Les résultats montrent que globalement, la capacité de faire face à un changement imprévu s'installe progressivement au cours du développement et ne se stabilise qu'à l'âge adulte. En outre, « les résultats des enfants de 6 ans montrent que leur représentation mentale est pauvre et peu fonctionnelle. La faible différence de temps d'apprentissage entre les deux conditions suggère qu'ils n'ont pas de stratégie d'apprentissage spécifique. Apprendre pour reconnaître ou apprendre pour dessiner, c'est toujours apprendre » (Baldy & al., 1998, p.23). On peut également retenir qu'entre 10 et 12 ans l'augmentation des temps dans la condition « apprendre pour dessiner » indique que les sujets spécifient leur stratégie d'apprentissage, et vers 12 ans, « l'assimilation de la figure privilégie sa structure au détriment des détails. Cette évolution est bien adaptée à un contrôle optimal de l'exécution du dessin qui devra être fait de mémoire » (Baldy & al., 1998, p.23). La dissymétrie des écarts de performances quand il y a changement de but montre que les sujets n'apprennent pas le dessin de la même façon dans les deux conditions. Il apparaît que « l'image mentale, format privilégié dans le dessin peut assez facilement être reformatée en liste d'éléments, utile pour « énumérer » la figure quand il s'agit de la reconnaître. En revanche, les sujets qui ont appris pour reconnaître obtiennent dans la tâche de dessin des performances inférieures à ceux qui ont appris pour dessiner. Tout se passe comme si la liste d'éléments mal adaptée à l'exécution du dessin était difficilement traduite dans le format imagé » (Baldy & al., 1998, p.24).

Kanellaki-Agathos et Richard (1997), dans une perspective de résolution de problème, ont analysé chez des enfants de 3 à 7 ans d'une part la programmation d'actions complexes dans un environnement familier (à travers une tâche de déplacement et d'emboîtement de gobelets) et, d'autre part, la capacité d'explicitation, hors exécution, la suite ordonnée des actions élémentaires à exécuter pour réaliser une tâche complexe. Selon ces auteurs, trois processus d'élaboration de buts interviennent : 1) détailler un but global en sous-buts qui réalisent chacun une partie du but ; 2) activer une procédure pour réaliser une partie du but ; 3) éventuellement modifier la situation pour la mettre dans l'état où l'on puisse appliquer la procédure. Deux processus sont étudiés dans la recherche menée par ces auteurs :

- la capacité d'exécuter la tâche, c'est-à-dire d'engendrer au fur et à mesure les sous-buts et de les exécuter dès qu'à ces sous-buts correspondent des actions exécutables. Kanellaki-Agathos et Richard (1997) parlent de « planification en acte », en ce sens qu'elle utilise les informations obtenues au cours de l'exécution.
- la conceptualisation de l'action, sur la base d'une explicitation avant l'exécution des actions que le sujet pense faire pour réaliser la tâche. Ce processus renvoie à une « planification avec anticipation », parce qu'elle ne dispose que des informations

sur le but et l'état initial, alors que les informations sur les états intermédiaires qui pourront se présenter au cours de l'exécution devront être anticipés.

Par ailleurs, « le degré de conceptualisation d'une action est fonction de la proximité du résultat de cette action par rapport au but de la tâche et des conflits éventuels entre buts qui peuvent être produits par des processus différents de génération de buts (décomposition du but global en parties et réalisation de prérequis) : un même objet en effet peut être impliqué dans deux actions, dont les résultats ne présentent pas le même degré de proximité par rapport au but. Une action sera difficile à réaliser si elle doit être réalisée d'abord et que son résultat semble s'éloigner du but qui doit être réalisé sur l'objet dans la tâche. On retrouve là la notion d'écart au but qui est essentielle en résolution de problèmes : on montre en effet (Richard, 1994) que des problèmes sont rendus difficiles par le fait que la voie vers la solution s'écarte momentanément du but ». De plus, « il y a des buts qui sont engendrés par l'intention, le but ultime et les sous-buts qui partagent des propriétés communes avec le but et il y a des buts qui sont engendrés au moment de l'exécution par les propriétés de la situation » (Kanellaki-Agathos & Richard, 1997, pp.73-74). L'étude de Kanellaki-Agathos et Richard (1997) repose sur une tâche de déplacement et d'emboîtement d'objets requérant deux types de décomposition de buts : l'un consiste à réaliser successivement dans un ordre défini le but sur chacun des objets de la tâche ; l'autre vise à satisfaire les prérequis qui permettent ensuite de réaliser le but sur l'objet. Les résultats montrent que le niveau de conceptualisation d'une action est fonction de la proximité entre le résultat de cette action et le résultat constitué par le but de la tâche. Comme nous avons pu le voir, cette proximité n'est pas la même selon les deux types de décomposition de buts.

Dans ce chapitre, consacré à l'opération de planification de l'action dans la résolution de problèmes, nous avons montré que les stratégies mises en œuvre pour atteindre le but final visé par la tâche sont liées à la représentation du problème et au mode d'intégration en mémoire des données contenues dans ce dernier. Aussi, dans le cas de l'exécution de dessins complexes qui nous intéresse plus particulièrement dans le cadre de cette recherche, nous considérerons la question de l'encodage perceptif et de l'intégration en mémoire des informations visuo-spatiales, à travers l'étude des relations entre perception et représentation dans deux modalités sensorielles se distinguant par leurs propriétés anatomo-fonctionnelles : la vision et le toucher. Rappelons que l'étude que nous menons ici porte sur le rôle du contenu des représentations dans l'émergence du PEC. Aussi, dans le chapitre qui suit, nous montrerons notamment en quoi les systèmes visuel et tactile, qui permettent tous deux l'extraction des propriétés figuratives et spatiales, s'opposent néanmoins dans le traitement des informations visuo-spatiales, et quelles sont les conséquences directes des différences existant entre l'analyse visuelle et l'exploration tactile manuelle (ou haptique) sur le contenu des représentations stockées en mémoire.

Nous venons de voir que les règles syntaxiques graphiques, en particulier celles relatives à l'exécution de dessins géométriques complexes non familiers, reposent sur une opération de planification de l'action. Ainsi, l'émergence du PEC s'appuie sur l'exercice d'un contrôle pro-actif (qui consiste à définir les étapes successives guidant l'exécution afin d'atteindre le but final) tel que celui intervenant dans la résolution de problèmes (la production de dessins complexes inconnus constituant une situation de résolution de problème). C'est précisément sur cette opération que va porter le chapitre 2, dans lequel nous aborderons également la composante représentationnelle, qui occupe une place primordiale dans la résolution de problèmes, le travail de planification de l'action étant déterminé par la représentation du problème et le contenu de cette dernière (intégration

en mémoire des informations encodées). La question du développement de la capacité de planification de l'action et de l'évolution des représentations sera également traitée.

Chapitre 3. L'encodage et l'intégration des informations visuo-spatiales en perceptions visuelle et haptique

L'un des objectifs de la présente recherche est d'étudier les liens entre le mode d'encodage perceptif et d'intégration en mémoire des informations visuo-spatiales et l'opération de planification de l'action qui sous-tend le PEC. Dans cette perspective, la comparaison des modalités visuelle et haptique dans le traitement des informations visuo-spatiales s'avère pertinente, car ces deux modalités perceptives permettent toutes deux le traitement des propriétés figuratives et spatiales, mais ne sont pas équivalentes quant au mode d'encodage et d'intégration de ces dernières, en raison de leurs spécificités anatomo-fonctionnelles. C'est sur ces dernières que porte ce chapitre. Après une description des architectures neuro-anatomiques des systèmes visuel et haptique, nous nous centrons plus spécifiquement sur le fonctionnement de chacune de ces deux modalités sensorielles puis mettons en évidence les similitudes et les différences existant entre elles dans l'analyse spatiale.

1. Bases anatomo-fonctionnelles des modalités visuelle et haptique

1.1. La modalité visuelle

1.1.1. Le cheminement de l'information visuelle de la rétine au cortex visuel primaire

Les premières étapes du traitement de l'information visuelle se situent avant l'aire visuelle primaire (V1) du cortex cérébral. Aux stades les plus précoces, « l'architecture fonctionnelle visuelle est une image inversée du champ perceptif qui se trouve projetée sur la rétine » (Mellet, 2002, p. 403). La structure de la rétine réside dans la superposition de trois couches : les cellules réceptrices, les cellules bipolaires et les cellules ganglionnaires. Initialement, le traitement visuel se situe au niveau des cellules réceptrices, constituées des cônes, sensibles à la couleur et traitant la zone centrale du champ visuel, et des bâtonnets, qui recueillent l'information provenant du champ visuel périphérique. Les cônes et les bâtonnets convoient l'information visuelle aux cellules ganglionnaires, via les cellules bipolaires. Mellet (2002) précise « qu'à cette connectivité verticale se superpose une connectivité horizontale assurée par les cellules amacrine et les cellules horizontales » (p.404). La majorité des cellules ganglionnaires se répartissent dans deux classes distinctes : les cellules M, très sensibles au changement de contraste lumineux, et les cellules P, responsables de l'acuité et de la vision des couleurs. Les axones des cellules ganglionnaires convergent pour donner naissance au nerf optique. Les fibres issues du champ visuel temporal de chaque œil (correspondant au champ nasal sur la rétine) croisent au niveau du chiasma optique et constituent un tractus optique. Après le chiasma,

l'information visuelle en provenance de l'hémichamp visuel gauche chemine donc dans le tractus optique droit, et vice versa.

Les tractus optiques droit et gauche se projettent sur trois structures : 1) le colliculus supérieur, impliqué dans le contrôle des mouvements oculaires, 2) le prétectum, intervenant dans le contrôle du diamètre pupillaire, et 3) le corps géniculé (ou genouillé) latéral (CGL) au sein duquel font relais environ 90 % des axones ganglionnaires. Cette dernière structure, thalamique, est l'ultime relais avant l'aire visuelle primaire (V1). A propos du CGL, Mellet (2002) ajoute qu'il « préserve une certaine topographie fonctionnelle : les axones issus des cellules ganglionnaires P se projettent sur les cellules des couches dites « parvocellulaires » sensibles au contraste coloré, les axones issus des neurones M se projettent sur les couches « magnocellulaires » sensibles au contraste de luminance. Ainsi, la ségrégation fonctionnelle entre des cellules M sensibles aux faibles contrastes de luminance, capables de suivre des changements rapides du stimulus, et des cellules P sensibles aux contrastes colorés et préservant la finesse de détails de l'image, est maintenue de la rétine jusqu'à l'aire visuelle primaire, premier relais cortical du traitement visuel » (p. 404). Comme nous le verrons ultérieurement, cette séparation fonctionnelle se retrouve bien en aval de l'aire primaire V1, donnant naissance aux voies corticales ventrale et dorsale spécialisées, respectivement, dans le traitement des aspects figuratifs (forme) et spatiaux (localisation) des scènes visuelles.

1.1.2. La spécialisation fonctionnelle du cortex visuel

Une fois l'information visuelle parvenue en V1, celle-ci va transiter dans d'autres aires, spécialisées dans l'intégration de propriétés spécifiques. Concernant V1, il a été démontré en TEP que cette aire (appelée également le cortex strié en raison de son aspect au microscope) possède une organisation rétinotopique : « à chaque point du cortex correspond un point du champ visuel » (Reppas, Dale, Sereno & Tootell, 1996, p. 54). La partie centrale du champ visuel est représentée sur la rétine dans une région appelée fovéa, elle-même représentée sur la partie postérieure de l'aire V1 dans la profondeur et sur les berges de la scissure calcarine (la scissure calcarine est un long repli, ou sulcus, assez rectiligne, qui part du pôle arrière et traverse le lobe occipital. L'aire V1 est logée dans ce repli, les autres aires visuelles se situant à proximité, en dessus et en dessous). Inversement, la rétine périphérique est représentée sur la portion la plus antérieure de V1. Autrement dit, en progressant de la fovéa vers la périphérie de la rétine (c'est-à-dire du champ visuel central vers le champ visuel périphérique), on progresse d'arrière en avant le long de la scissure calcarine.

Les autres aires pour lesquelles une telle organisation a été démontrée chez l'Homme sont dénommées V2v (voie ventrale), V2d (voie dorsale), V3, VP, V3A, V4 et V5. Plus une aire visuelle est éloignée de V1, moins son organisation rétinotopique est précise. De plus, le champ visuel central occupe une aire corticale beaucoup plus importante que le champ périphérique, expliquant la différence d'acuité entre la vision centrale et la vision périphérique.

Outre cette organisation rétinotopique des aires visuelles, la spécialisation fonctionnelle du cortex visuel a été mise en évidence. Ainsi, l'aire dédiée au traitement de la couleur a été localisée sur la face interne de la jonction temporo-occipitale. Mellet (2002) rapporte que pour certains auteurs, cette aire est l'homologue de la région V4 chez le singe, également sélective pour la couleur. D'autres auteurs ont repéré chez l'Homme une aire V4v qui ne serait pas sélective à la couleur, contrairement à une aire située en avant de V4v : l'aire V8 (son existence reste à confirmer). Mais « quelle que soit la dénomination, V4 ou V8, les

auteurs s'accordent pour localiser cette aire fonctionnelle dans le sillon collatéral séparant le gyrus lingual du gyrus fusiforme, à la face interne et inférieure du cerveau, région dont la lésion est responsable de la perte de la vision colorée, dite "achromatopsie" » (Mellet, 2002, p.406). Située au carrefour temporo-pariéto-occipital sur la face latérale du cerveau, l'aire V5 est quant à elle responsable de la perception du déplacement. L'existence d'une aire V5A, satellite de V5, a été suggérée. Sa petite taille n'a pas permis, à l'heure actuelle, de caractériser ses propriétés rétinotopiques. L'ensemble V5 et V5A est parfois désigné sous l'appellation MT+ (aire médio-temporale). Chez l'homme comme chez le singe, cette aire participe à la détection des mouvements (Reppas et al., 1996). Les aires MT+, V3A et SPO (aire supérieure occipito-pariétale) sont toutes trois impliquées dans la perception des mouvements, mais n'assurent pas des fonctions similaires. Reppas et al. (1996) indiquent le rôle de ces aires, à partir d'un exemple : « Quand un objet bouge devant nos yeux, ou lorsque nous nous déplaçons, le système visuel doit accomplir deux opérations assez distinctes. La première consiste à calculer la vitesse et la direction de déplacement des traits locaux de l'image, comme les contours. Cette information n'est pas explicite ; le cerveau doit la calculer d'après la manière dont l'intensité lumineuse change avec le temps en chaque point de la rétine. [...] les aires V3A et MT joueraient un rôle privilégié dans ce calcul. Contrairement à l'aire SPO, toutes deux répondent en effet avec une sensibilité extrême à des mouvements à peine visibles pour l'œil humain, ce qui suggère leur importance dans la détection des mouvements locaux. Pour tirer pleinement parti de l'information sur le mouvement, le cerveau doit effectuer une deuxième opération, qui consiste à extraire le mouvement global de l'image. Ce flux optique global fournit de nombreux indices sur la manière dont nous bougeons. Par exemple, une scène visuelle qui s'agrandit nous apprend que nous avançons, et le foyer de cette expansion indique la direction de nos pas » (p. 55).

1.2. La modalité haptique

1.2.1. Définition

La perception dite « haptique » (ou tactilo-kinesthésique) fait référence à une exploration active d'objets. On l'appelle aussi « toucher actif » (Hatwell, 1986 ; Robles-De-La-Torre & Hayward, 2001), car elle implique un codage des informations motrices par l'intermédiaire de récepteurs articulaires et vestibulaires, et par l'activation des mécanorécepteurs. Ce toucher actif s'oppose au toucher passif, pour lequel seul l'objet exploré est en mouvement. La stimulation est alors appliquée sur un segment immobile du corps. Loomis et Lederman (1986) mentionnent que la modalité haptique renvoie à un système perceptif intégrant des entrées (inputs) issues de systèmes sensoriels multiples. En effet, elle inclut un système cutané sensible à la pression et aux vibrations, ainsi qu'à la température. En plus de ces sous-systèmes tactiles, la modalité haptique comprend un système kinesthésique, qui participe au traitement de la position et à l'enregistrement des mouvements grâce aux récepteurs musculaires et articulaires. Klatzky et Lederman (1987) expliquent que « le terme haptique est une sorte de parapluie qui regroupe tous les sous-systèmes sensoriels dérivés de l'implication de la peau, des muscles et des articulations. Nous soulignons l'importance de la nature du traitement haptique pendant une exploration active et intentionnelle » (p.121). La perception haptique associe les perceptions kinesthésiques issues des mouvements exploratoires et les perceptions purement cutanées induites par le contact entre le stimulus et la peau (Gibson, 1962 ; Revesz, 1950). La perception haptique pourrait donc se résumer par la formule suivante : perception haptique = perception cutanée + mouvements exploratoires.

1.2.2. Propriétés anatomo-fonctionnelles et neurophysiologiques de la perception haptique

1.2.2.1. Des mécanorécepteurs cutanés et proprioceptifs au cortex somesthésique

Le système haptique est doté de mécanorécepteurs cutanés, qui codent les informations issues de la déformation de la partie de la peau stimulée. Ces récepteurs se répartissent dans les différentes couches (superficielle : épiderme, profonde : derme, et intermédiaire) de la peau glabre, qui renvoie à la face palmaire de la main (Tubiana & Thomine, 1990).

Ces récepteurs se distinguent par leurs propriétés morphologiques et fonctionnelles (Vallbo, 1995) : caractéristiques d'adaptation (rapide (AR) : récepteurs actifs au début du contact avec le stimulus, ou lente (AL) : récepteurs actifs durant tout le temps du contact avec le stimulus) et de taille des champs récepteurs (réduits-délimités : type I, ou large-flous : type II). Dans le tableau 1 qui suit, sont indiquées les propriétés des quatre principaux types de récepteurs intervenant dans la perception cutanée.

Tableau 1 : Les différents types de mécanorécepteurs de la peau glabre, suivant leurs propriétés anatomo-fonctionnelles.

		Champs récepteurs	
		Réduits et délimités (type I)	Large et flous (type II)
Adaptation	Lente (AL)	Disques de Merckel (ALI)	Corpuscules de Ruffini (ALII)
	Rapide (AR)	Corpuscules de Meissner (ARI)	Corpuscules de Pacini (ARII)

Les récepteurs à adaptation rapide (AR) codent les dimensions temporelles dans la stimulation (début-fin), telles que la vitesse d'application (ARI) ou l'accélération de la stimulation (ARII). Les récepteurs à adaptation lente (AL) sous-tendent l'encodage des attributs spatiaux de la stimulation, lorsque les réponses sont toniques. Ils codent la continuité de la stimulation avec une réactivité plus importante à la sensibilité dynamique pour les récepteurs ALI et une mobilisation plus intense des récepteurs ALII pour coder le fréquence statique. De plus, « dans la perception haptique, aux informations cutanées s'ajoutent les informations issues de la déformation mécanique des récepteurs proprioceptifs résultant des mouvements d'exploration du système épaule-main » (Gentaz, 2000a, p. 20). Dans le tableau 2 qui suit, sont regroupées les fonctions des récepteurs proprioceptifs dans la perception haptique.

Tableau 2 : Propriétés fonctionnelles des différents récepteurs proprioceptifs dans la perception haptique (d'après Gentaz, 2000a).

Type de récepteurs	Fonction(s)
Musculaires (fuseaux neuromusculaires)	-Ils fournissent des informations sur la longueur des muscles ou sur la vitesse de changement de cette longueur. -Ils ont une fonction motrice (muscles agonistes) ou sensorielle (muscles antagonistes).
Tendineux (organes tendineux de Golgi)	Ils donnent des informations sur le niveau de tension du muscle (niveau de force développée) et ses variations dans le temps.
Articulaires (corpuscules de Ruffini, de Golgi et de Pacini)	Ils jouent un rôle dans la régulation et/ou la facilitation de la proprioception musculaire (leur rôle est encore discuté).

Les informations codées par les mécanorécepteurs cutanés et proprioceptifs sont transmises au système nerveux central via deux voies ascendantes majeures par le biais desquelles les premiers traitements sont réalisés : les systèmes lemniscal (ou colonnes dorsales) et extralemniscal (ou antérolatéral, ou encore spino-thalamique). Les caractéristiques de chacun de ces systèmes sont regroupées dans le tableau 3.

Tableau 3 : Caractéristiques principales des systèmes lemniscal et extralemniscal

	Vitesse de transmission	Projections	Type d'informations traitées
Système lemniscal	Rapide : 30 à 110 m/s (axones de grands diamètres)	-Trajet ipsilatéral (croisement au niveau du bulbe rachidien de la moëlle épinière) ; projection hémisphérique contro-latérale. -Relais centraux : noyaux ventro-postéro-latéraux et groupe nucléaire postérieur du thalamus. -Projections vers les aires somesthésiques primaire (SI) et secondaire (SII), les aires pariétales postérieures et le cortex moteur.	-sensibilité tactile fine -sensibilité proprioceptive
Système extralemniscal	Lente : 8 à 10 m/s (axones de petits diamètres)	-Trajet ipsilatéral (comme système lemniscal) - Relais centraux : formation réticulée bulbo-ponto-mésencéphalique et groupe nucléaire postérieur du thalamus. -Projections corticales vers les mêmes aires cérébrales que le système lemniscal	-sensibilité thermique -sensibilité à la douleur -sensibilité proprioceptive

Dans la mesure où nous nous centrons, dans le cadre de cette recherche, sur l'extraction des propriétés spatiales dans des dessins bi-dimensionnels, nécessitant une perception tactile fine, nous nous intéresserons davantage au système lemniscal. Avant de nous pencher sur la question de l'analyse spatiale en modalité haptique, nous allons relater les propriétés générales des aires somesthésiques. Nous verrons notamment que les aires corticales sous-jacentes aux modalités visuelle et haptique partagent des caractéristiques communes.

1.2.2.2. Propriétés des aires corticales intervenant dans la perception haptique

Dans ce qui suit, nous décrivons les propriétés anatomo-fonctionnelles des principales aires corticales impliquées dans la perception haptique. La modalité haptique (ou tactilo-kinesthésique) combinant la perception cutanée et la proprioception ainsi que la motricité liées à l'activité exploratoire de la (des) main(s), elle sollicite donc la participation conjointe d'aires somesthésiques et motrices.

Certaines des propriétés des aires cérébrales impliquées dans la perception haptique sont comparables à celles des structures qui sous-tendent la perception visuelle. Ainsi, on retrouve la même organisation topologique dans les aires primaires visuelle, somesthésique et motrice. Les informations qui arrivent par exemple dans l'aire somesthésique primaire SI, région corticale située dans la partie antérieure du cortex pariétal, « se distribuent dans cette aire en fonction de leur origine, selon une carte somatotopique, [et] la totalité de l'hémicorps controlatéral est représenté dans SI [...]. Pour chaque neurone de SI (spontanément actif), il existe une région spécifique de la peau dont la stimulation modifie, soit en l'augmentant, soit en la diminuant, son régime d'activité. Cette région constitue le champ récepteur de la cellule » (Gentaz, 2000, p. 22). De plus, la taille et la densité des champs récepteurs sont fonction de l'importance fonctionnelle des différentes parties du corps : c'est le facteur de magnification. Gentaz (2000) rapporte que « les régions les plus sensibles et qui ont la plus grande représentation corticale (les lèvres, la langue et les doigts) ont les champs récepteurs les plus petits et les récepteurs les plus nombreux par unité de surface cutanée. Au fur et à mesure que l'on remonte le long du bras, les champs récepteurs sont moins denses et plus vastes » (p. 22). Par ailleurs, le fonctionnement neural des récepteurs corticaux somesthésiques est régi par le phénomène d'inhibition latérale : chaque champ récepteur comporte une région centrale excitatrice et une région périphérique inhibitrice, de sorte que la stimulation d'un point de la peau entraîne l'activation d'un groupe de neurones corticaux et simultanément l'inhibition des neurones avoisinants, conférant une augmentation du contraste ou de la précision perceptive. En outre, une autre propriété des neurones du cortex somesthésique (aire SI) est leur sélectivité. Le codage neuronal d'une propriété d'un stimulus est estimé par la fréquence et l'intensité des décharges des neurones qui rentrent en activité (le codage étant assuré par une population de neurones plutôt que par un seul neurone). En effet, « pour un neurone donné, le codage est non binaire : ce neurone ne code pas une propriété selon la loi du tout ou rien [selon laquelle l'activation d'un neurone se produit, de façon constante, si un seuil limite est atteint], mais code avec des amplitudes différentes plusieurs paramètres de cette propriété. Par exemple, un neurone sélectif à l'orientation verticale présente une réponse maximale lorsque l'orientation de la barre coïncide avec l'orientation de son champ récepteur. Dès que le stimulus s'écarte de cette orientation optimale, la réponse du neurone diminue. Ainsi, un neurone sélectif à l'orientation verticale ne code pas seulement l'orientation verticale d'un stimulus, mais aussi les différentes orientations (avec des amplitudes moindres) autour de cette verticale » (Gentaz, 2000, p. 23). Les neurones impliqués dans le traitement haptique d'informations ne sont du reste pas tous unimodaux, puisqu'une partie d'entre eux sont à la fois somesthésiques et visuels, et certains répondent même à des stimuli visuels, auditifs et tactiles. D'autres, enfin, peuvent à la fois être sensoriels et moteurs. Gentaz (2002) ajoute que « l'effet de la stimulation bimodale ne semble pas additif mais multiplicatif : une réponse faible à un stimulus visuel peut être amplifiée jusqu'à douze fois si elle est déclenchée par un stimulus bimodal visuo-auditif » (p. 24).

Les aires somesthésiques primaire et secondaire

Situées dans la partie antérieure du cortex pariétal, les aires somesthésiques primaire (SI) et secondaire (SII) traitent les afférences cutanées et proprioceptives. Localisée entre le sillon de Rolando et le sillon post-central, l'aire SI est organisée en colonnes verticales et en six couches horizontales. Chacun des neurones se trouvant sur une de ces colonnes réagit à une même modalité : certaines colonnes interviennent dans la proprioception, alors que d'autres sont responsables de la sensibilité tactile. Horizontalement, les cellules d'une même colonne, selon la couche à laquelle elles appartiennent, assurent la réception

de l'information ou le transfert de cette information vers une autre structure. L'aire SI se décompose en quatre sous-aires, 1, 2, 3a et 3b de Brodmann, suivant la nature des stimuli. Les neurones des aires 1 et 3b répondent principalement à des stimulations cutanées légères. Ceux de l'aire 3b sont spécialisés dans le traitement tactile de forme et de texture (Di Carlo, Johnson & Hsiao, 1998). Les neurones de l'aire 3a reçoivent des afférences proprioceptives musculaires et les neurones de l'aire 2 des afférences cutanées profondes et proprioceptives articulaires. Sur chacune de ces quatre aires, l'hémicorps controlatéral est représenté : il existe par conséquent dans l'aire SI quatre représentations juxtaposées de la moitié opposée du corps. L'aire SII, située à la base du gyrus postcentral, présente une organisation fonctionnelle proche de celle de l'aire SI, mais reçoit des afférences en provenance de l'ensemble du corps.

L'aire motrice primaire

L'aire motrice primaire (ou le cortex moteur) est adjacente au sillon de Rolando dont elle constitue la berge antérieure. Elle est organisée de manière somatotopique. Gentaz (2000) rapporte que « les aires de la main et de la face sont très étendues alors que celles du tronc, de la partie proximale des membres et des pieds sont beaucoup plus restreintes (Homuncule moteur de Penfield) » (pp. 26-27). Le cortex moteur est relié à la moëlle épinière via la voie pyramidale, qui constitue sa principale efférence. Cette voie est entièrement croisée (unilatérale) pour la musculature distale, et bilatérale pour la musculature axiale ou proximale (tête, cou, épaules). Aussi, « l'aire motrice primaire contrôle des mouvements élémentaires plutôt que des muscles. La microstimulation de cette aire provoque généralement un mouvement controlatéral avec activation des muscles agonistes et inhibition des muscles antagonistes. La représentation corticale de la commande d'un même mouvement peut être multiple » (Gentaz, 2000, p. 27).

Par ailleurs, les neurones de l'aire motrice primaire sont impliqués dans le traitement des informations somesthésiques. Des mouvements tels que la saisie ou l'agrippement d'un objet nécessitent l'intégration d'informations cutanées ou somesthésiques (Hikosaka, Tanaka, Sakamoto & Iwamura, 1985 ; Johansson, 1996). En outre, les régions activées dans l'aire motrice primaire pour l'initialisation d'un mouvement seraient différentes suivant l'amplitude de celui-ci requise par la tâche à accomplir, faisant intervenir de façon plus ou moins importante le traitement d'informations somesthésiques (Humphrey & Tanji, 1991 ; Zilles, 1996). « En conclusion, les neurones de l'aire motrice primaire forment, avec leurs afférences sensorielles, des modules sensori-moteurs. Cependant, il est à noter que ces modules sensori-moteurs sont sous l'influence d'autres structures, comme le néocervelet, les noyaux de la base et les aires associatives pariétales, prémotrices et préfrontales » (Gentaz, 2000, p. 28).

Les aires pariétales postérieures et prémotrices

Les aires pariétales postérieures renvoient aux aires 5 et 7. L'aire 7 se divise en deux sous-aires, 7a et 7b, sur lesquelles repose la représentation de l'espace. Seuls les neurones de l'aire 7b sont moteurs et somesthésiques. Parmi ceux-ci, on dénombre un ensemble de neurones bimodaux, visuo-tactiles, qui répondent par exemple à la même localisation spatiale du stimulus dans l'une et l'autre des deux modalités. Pour l'aire 5, les neurones sont aussi somesthésiques et moteurs. Les premiers répondent à des stimuli complexes, sollicitant plusieurs articulations ou la mobilisation simultanée d'afférences articulaires et de champs récepteurs cutanés, alors que les seconds sont actifs lors de mouvements de projection du bras ou de manipulations.

Les aires prémotrices englobent les aires prémotrice et motrice supplémentaire (AMS), qui correspondent chacune à une partie de l'aire 6. L'aire prémotrice proprement dite, siégeant sur la face externe du cortex, est en relation avec le cervelet. Elle « joue un rôle important dans l'organisation des mouvements déclenchés et contrôlés par des signaux extérieurs (visuels, tactiles) : mouvements visuo-guidés, tâches de manipulation, tâches de préhension de nourriture » (Gentaz, 2000, p. 29). L'AMS, située sur la partie médiane de l'aire 6, entretient des relations avec les noyaux de la base. Cette aire « intervient dans les activités auto-initiées, dans la préparation et l'exécution de séquences temporelles et les activités bimanuelles non symétriques. La plupart des actions contrôlées par l'AMS sont des actions mémorisées » (Gentaz, 2000, p. 29).

Le cortex préfrontal et le système limbique

Le cortex préfrontal, occupant la majeure partie du lobe frontal, communique avec les aires motrice, prémotrice et motrice supplémentaire. Par ses efférences vers le cortex prémoteur et le striatum, il participe au contrôle moteur. Il a également des connexions réciproques avec toutes les aires impliquées dans le traitement des informations sensorielles. Avec les aires pariétales (aires 5 et 6) et temporales (aires 21 et 22), il joue un rôle prévalent dans la préparation du mouvement, l'attention au stimulus et la mémorisation (il est en relation avec le complexe amygdalo-hippocampique et le thalamus, structures qui sous-tendent elles aussi le processus de mémorisation) à court terme de séquences d'événements sensoriels. Gentaz (2000) note que « les subdivisions observées dans les aires pariétales postérieures se retrouvent au niveau de la partie de l'aire associative préfrontale qui est spécialisée dans la mémorisation à court terme des cibles spatiales » (p. 29). Quant aux structures limbiques, elles interviennent également dans l'activité motrice (organisation du mouvement) de la perception haptique, dans la mesure où celle-ci n'est possible que dans un contexte de motivation qui est sous la dépendance du système limbique.

Pour résumer et permettre une vue d'ensemble des multiples connexions entre les principales structures cérébrales qui sous-tendent la perception haptique, nous avons repris le schéma (figure 6) proposé par Gentaz (2000).

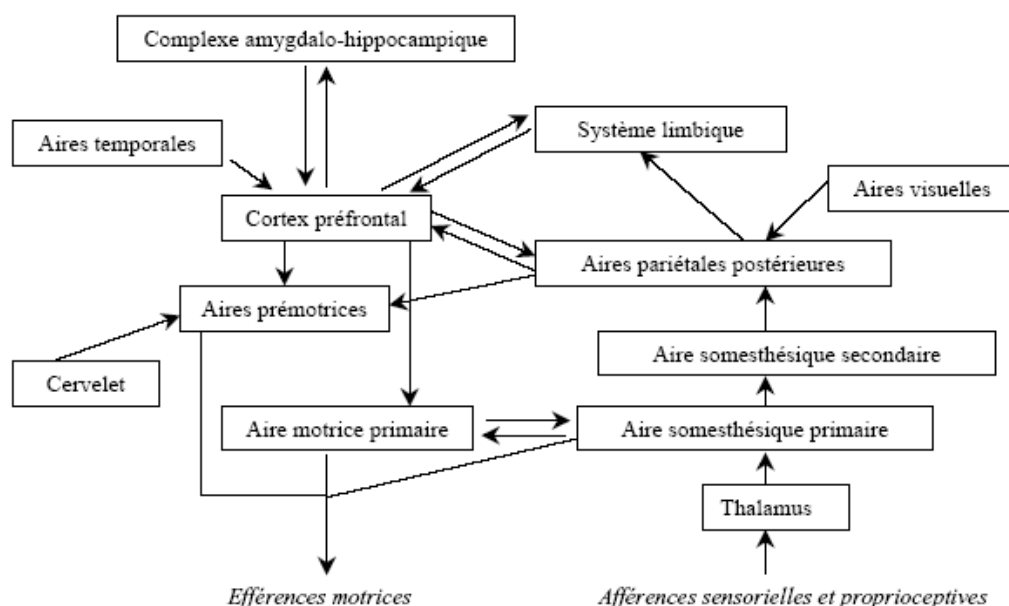


Figure 6 : Schéma simplifié illustrant les principales connexions entre les différentes structures cérébrales impliquées dans la perception haptique (d'après Gentaz, 2000).

A propos de l'organisation générale des interconnexions entre les différentes aires somesthésiques et motrices, Felleman et Van Essen (1991) ont élaboré un modèle, dans lequel les auteurs décrivent une organisation hiérarchique distribuée entre les treize structures qu'ils distinguent. L'aire SI serait dédiée aux traitements de plus bas niveau, l'aire SII interviendrait dans les traitements de niveau intermédiaire, et les aires associatives seraient impliquées dans les traitements de plus haut niveau. De plus, les relations entre les treize aires obéissent à une règle de réciprocité, et les connexions sont à la fois horizontales et verticales, avec des liaisons directes (sans relais synaptiques) pouvant franchir plusieurs niveaux. Les interconnexions entre les différentes aires somesthésiques et motrices ont d'autres caractéristiques. En particulier, le nombre important de liaisons existant entre les aires d'un même niveau de traitement suggère que le système ne fonctionne pas selon un système hiérarchique strictement séquentiel. De plus, le nombre d'interconnexions d'une aire donnée est proportionnelle au niveau qu'occupe cette aire dans l'organisation hiérarchique. Enfin, si le nombre de connexions entre les aires adjacentes est élevé, la majorité des connexions traverse plusieurs niveaux. Mais ce sont les voies ascendantes qui semblent pouvoir franchir plusieurs niveaux sans relais synaptiques, alors que les voies descendantes en franchissent rarement plus de deux. Aussi, le temps d'intégration des informations descendantes est donc plus long que celui des informations ascendantes, dans la mesure où le temps de traitement cortical d'une information augmente avec le nombre d'intermédiaires synaptiques.

2. Propriétés fonctionnelles des systèmes visuel et haptique dans le traitement des informations visuo-spatiales

2.1. Le traitement des informations visuo-spatiales par le système visuel

Précédemment, nous avons décrit l'architecture fonctionnelle des aires visuelles responsables du traitement des propriétés de luminance, de couleur et de mouvements, en laissant volontairement de côté les propriétés de forme et de relations spatiales, sur lesquelles nous allons nous centrer maintenant.

2.1.1. La distinction « quoi » (what) et « où » (where) dans le traitement des informations visuo-spatiales

Il a été établi, d'abord chez le primate non humain, que le traitement de l'information visuelle pouvait emprunter deux grandes voies neuroanatomiques distinctes, selon les propriétés visuelles ou spatiales à extraire. La recherche de Ungerleider et Mishkin (1982) sur les lésions chez des singes rhésus a permis de distinguer deux voies corticales dans l'analyse spatiale. Ces auteurs ont observé qu'une lésion du cortex temporal crée des perturbations dans la reconnaissance visuelle d'objets, alors qu'une lésion pariétale occasionne des troubles dans l'organisation spatiale. Ainsi, Ungerleider et Mishkin (1982) ont mis en évidence l'existence de deux voies, l'une ventrale, qui chemine le long d'un axe occipito-temporal (elle projette de V1 vers V2, V3, V4 et la partie postérieure de l'aire temporale inférieure, jusqu'au cortex temporal inférieur), l'autre dorsale, comprenant des régions situées sur un axe occipito-pariétal (elle projette de V1 vers V2, V3, l'aire médio-temporale et l'aire temporale supérieure, jusqu'au cortex pariétal postérieur). La voie ventrale est donc spécialisée dans le traitement de la forme, et plus largement des caractéristiques

figuratives des objets et des visages. Elle répond à la question « quoi ? » (« what ? ») ou « qui ? » (« who ? »). La voie dorsale est engagée dans la localisation des objets et l'analyse des attributs spatiaux des scènes perçues. Elle répond à la question « où ? » (« where ? »). Haxbi, Grady, Horwitz, Ungerleider, Mishkin, Carson, Herscovitch, Schapiro et Rappoport (1991) ont par la suite confirmé, avec la TEP, cette dichotomie chez l'Homme. Ils ont montré que, durant le traitement des visages, les activations se répartissent sur un axe occipito-temporal, jusqu'au gyrus temporal inférieur et fusiforme. En revanche, durant la localisation d'un point, le débit sanguin augmente dans des régions occipito-pariétales s'étendant jusqu'au lobule pariétal supérieur. Aguirre et D'Esposito (1997) ont mené une étude en IRMf pour tester les différences entre les systèmes « quoi » et « où » dans l'apprentissage d'un environnement. Après avoir appris un environnement virtuel, les sujets devaient répondre à des questions concernant l'apparence ou les relations spatiales (position) relatifs à l'environnement. Pour les questions portant sur les aspects figuratifs (apparence) de l'environnement, les sujets devaient dire si le mot présenté correspondait ou non à l'image de la partie de la scène visuelle qu'ils avaient explorée. Pour les questions portant sur la localisation spatiale, l'expérimentateur donnait au sujet une image et le nom de l'endroit qu'elle représentait, puis le nom d'un autre endroit de l'environnement. Le sujet devait indiquer la direction pour rejoindre le nouvel endroit. Les résultats montraient que les patterns d'activation pour chacune des tâches se situaient au niveau des voies ventrale et dorsale pour les questions portant sur l'apparence et la position, respectivement. L'étude de Zeki et Shipp (1988) a révélé cependant que ces deux voies convergeraient dans une aire des structures postérieures des lobes pariétaux, qui supporterait le stockage en MDT des représentations visuo-spatiales (Stein, 1992). Cela explique pourquoi les processus perceptifs peuvent emprunter des voies parallèles séparées, mais le fait qu'ils aient une destination commune dans le cortex est cohérent avec le fait que les représentations contiennent à la fois les propriétés de forme et de localisation.

2.1.2. La distinction « quoi » (what) et « comment » (how) dans le traitement des informations visuo-spatiales

Plus récemment, la dichotomie "quoi" (what) / "où" (where) a été revue par Milner et Goodale (1995), qui classent les deux voies visuelles selon la distinction "quoi" (what) / "comment" (how). Cette distinction se centre moins sur les différences concernant le type d'informations utilisées par ces deux systèmes, mais davantage sur les différences relatives à la manière dont l'information est transformée en sortie (output). Elle prend donc en compte avant tout le but recherché par le sujet, en considérant l'interaction entre cognition et action (Creem & Proffitt, 2001a). Cette théorie définit deux systèmes visuels distincts, en référence au cadre de référence utilisé. Ces deux systèmes intègrent les mêmes informations sur l'objet perçu et ses caractéristiques spatiales, mais transforment celles-ci d'une manière différente en fonction du but visé. Le système ventral (what) représente le monde visuel tel qu'il apparaît au sujet (cadre de référence égocentré) mais aussi de manière invariante à tout observateur (cadre de référence exocentré, ou allocentré), conférant une conscience de la structure persistante du monde. La conscience perceptive utilise des cadres de référence de l'environnement pour lesquels les attributs et les significations à propos des objets sont encodés en rapport à eux-mêmes ou à des objets externes (Creem & Proffitt, 2001b). En revanche, le système dorsal transforme les informations relatives à la localisation spatiale, l'orientation et la taille des objets. D'autres chercheurs (Jeannerod, 1997 ; Rossetti, 1998), dans une approche similaire, proposent de séparer le système de conscience des objets (système « what ») de celui de l'action guidée visuellement (« how »). La dissociation perception/action a été largement approuvée (Daprati & Gentilucci, 1997 ; Jackson & Shaw,

2000 ; Wraga, Creem & Proffitt, 2000). L'étude conduite par Haffenden et Goodale (1998), qui utilisent l'illusion d'Ebbinghaus, va dans ce sens. Dans cette illusion, les deux disques identiques présentés aux sujets paraissent être de taille différente, du fait de la grandeur variable du cercle entourant chacun des disques. Les participants étaient invités à donner une estimation perceptive du diamètre du disque cible, à travers une tâche manuelle d'évaluation de la distance entre leur pouce et leur index. Ils devaient également répondre avec une tâche visuo-motrice dans laquelle ils devaient aller saisir (tâche de grasping) le disque sans voir leurs mains. Les résultats ont montré que l'ouverture des bras pour aller saisir le disque cible était en adéquation avec la taille de ce dernier, alors que l'estimation perceptive manuelle du diamètre du disque était influencé par l'illusion. Faillenot, Toni, Deceti, Gregoire et Jeannerod (1997) ont observé des différences quant à l'activité cérébrale en comparant une tâche de discrimination d'objet et une tâche dans laquelle le même objet était utilisé en vue de réaliser une action. Creem et Proffitt (2001b) font remarquer que bien que ces tâches impliquent toutes deux la perception des caractéristiques de l'objet, leur but diffère substantiellement. Faillenot et al. (1997), en utilisant la TEP, ont comparé une tâche consistant à saisir un objet (« grasping ») et une tâche de discrimination, faisant intervenir les mêmes objets, dénués de signification. De plus, les auteurs ont ajouté une tâche de pointage, afin de contrôler la différence relative à la composante motrice entre les deux tâches. Pour chacune des tâches, le sujet recevait des instructions explicites. Pour la tâche de pointage, il leur était demandé de pointer au moyen de leur index droit le centre de l'objet puis de retourner à la position de départ. Dans la tâche de saisie de l'objet (grasping), les sujets devaient prendre l'objet du bout des doigts de la main droite, et le déposer sur une table. Dans la tâche de discrimination, les sujets observaient les objets présentés sur écran, et appuyaient sur un bouton chaque fois que les formes de deux objets consécutifs étaient identiques. Les résultats ont, comme attendu, mis en évidence une activation du cortex inféro-temporal de l'hémisphère droit durant la tâche de discrimination. Cependant, plusieurs autres aires de la voie dorsale étaient également activées dans cette tâche : le cortex pariétal postérieur droit et le sulcus intrapariétal droit. Pour la tâche de saisie, les aires d'activation se situaient dans les régions motrices de l'hémisphère gauche et, comme pour la tâche de discrimination, au niveau du sulcus intrapariétal droit.

Creem et Proffitt (2001b) relèvent que les études en neuroimagerie soutiennent l'idée d'un système dorsal alloué aux tâches se rapportant aux questions « comment/ où » (« how/where ») et d'un système ventral impliqué dans les tâches portant sur la question « quoi » (« what »). Néanmoins, il n'a pas été établi clairement si les tâches de type « où » peuvent être situées dans les régions plus inférieures du lobe pariétal, comme l'affirment certains auteurs (Milner, 1997). L'une des raisons de cette incertitude est que les tâches de localisation spatiale requièrent souvent des mécanismes attentionnels et des stratégies motrices (mouvements des yeux ou mouvements imaginés) qui seraient associés aux aires pariétale supérieure et prémotrice. Il serait donc nécessaire de comparer de manière plus approfondie « les tâches motrices égocentriques, les tâches spatiales égocentriques non motrices, et les tâches spatiales allocentriques » (Creem & Proffitt, 2001b, p. 55).

2.2. L'analyse visuo-spatiale par le système haptique

2.2.1. Le traitement des informations visuo-spatiales en modalité haptique

Des distinctions semblables à celles faites pour le traitement des informations visuo-spatiales en modalité visuelle ont été proposées pour la modalité haptique. En effet, la dissociation entre les voies "quoi" (what) et "où" (where) a été mise en évidence pour le système haptique. La distinction entre deux voies de traitement des informations spatiales,

l'une responsable de la détection et de l'identification des stimuli (what), et l'autre de leur localisation (where) a pu être démontrée par une double dissociation. D'une part, certains auteurs ont relevé chez des patients un déficit de la voie what, alors que la voie where était préservée. Ainsi, en observant une patiente souffrant d'une lésion pariétale gauche incluant les aires somesthésiques, incapable d'indiquer où elle avait été touchée lors d'une stimulation mais en mesure de pointer vers l'endroit de la stimulation (phénomène de blind-touch), Paillard, Michel et Stelmach (1983) et Paillard (1991) ont mis en évidence la distinction entre deux voies de traitement des informations spatiales, l'une responsable de la détection et de l'identification des stimuli (what), et l'autre de leur localisation (where). Rossetti, Rode et Boisson (1995) ont obtenu des résultats similaires chez un patient présentant une perte complète de la sensibilité de l'hémicorps droit suite à une lésion thalamique gauche. Ces études ont montré par ailleurs que les informations cutanées et proprioceptives peuvent être intégrées et utilisées au niveau sensorimoteur sans qu'une représentation de la localisation des stimuli ne soit disponible. Elles confirment, comme pour le système visuel, l'existence d'une dissociation entre un système "pragmatique" et un système "sémantique" (Jeannerod, 1994 ; Jeannerod, Arbib, Rizzolatti & Sakata, 1995), ou celle relative à la localisation des stimuli (where) et au mode d'atteinte de cette localisation (how). Rossetti (1998) montre par ailleurs que le substrat anatomique pour cette "localisation pour l'action" est le même que pour le blindsight (capacité de pointer un stimulus, malgré une « cécité » provoquée par la lésion de l'aire V1), c'est-à-dire le cortex pariétal postérieur. D'autre part, le pattern inverse a été observé dans une autre manifestation pathologique de la perception cutanée : l'alloesthésie. Les patients atteints de cette pathologie « perçoivent une stimulation appliquée sur l'un de leurs segments corporels sans, toutefois, être en mesure de localiser précisément ce point de contact » (Gentaz & Badan, 2000, p. 37).

Ainsi, la distinction entre les systèmes what, where et how, relevée pour le système perceptif visuel, se retrouve dans le système haptique.

2.2.2. L'exploration perceptive haptique

Comme nous l'avons signalé auparavant, l'exploration haptique résulte de la combinaison de la perception cutanée (contact du stimulus sur la peau) et de la perception kinesthésique (musculaire et articulaire) liée aux mouvements exploratoires produits par le sujet. C'est de ces derniers dont il va s'agir dans ce qui suit.

2.2.2.1. Les procédures exploratoires manuelles

En fonction des propriétés à extraire en exploration tactile manuelle (géométriques, spatiales ou matérielles) le sujet va avoir recours à des stratégies d'exploration différentes. C'est précisément ce qu'ont examiné Lederman et Klatzky (1987, 1990, 1993, 1996). Ces auteurs ont identifié, chez des adultes qui devaient classer des objets selon un critère donné, des « procédures exploratoires » (PE), c'est-à-dire des ensembles spécifiques et assez systématiques de mouvements qui se caractérisent par la quantité d'information qu'ils peuvent apporter. Six principales procédures exploratoires ont été dégagées : 1) le frottement latéral, 2) la pression, 3) le contact statique, 4) le soulèvement, 5) l'enveloppement, et 6) le suivi des contours. Ces PE se définissent par leurs caractéristiques invariantes, relatives à l'état du mouvement (statique ou dynamique), à la direction de la force s'appliquant au mouvement (normale : gravitationnelle, ou tangentielle : parallèle au plan horizontal), à la zone de l'objet entrant en contact avec l'effecteur (surface ou/et contours), et aux contraintes d'action (exploration sur l'ensemble du stimulus ou espace de travail délimité).

Comme le rapporte Hatwell (2000), « certaines procédures sont très spécialisées, d'autres plus générales. Ainsi le Frottement latéral est adapté seulement à la texture, le Soulèvement au poids, la Pression à la dureté du matériau. Le Contact statique informe principalement sur la température et, plus approximativement, sur la forme, la taille, la texture et la dureté. L'Enveloppement donne aussi des informations globales sur ces propriétés, tandis que le Suivi des contours donne une connaissance précise de la forme et de la taille et une connaissance plus floue de la texture et de la dureté » (pp. 73-74). Dans la reproduction haptique de dessins géométriques bidimensionnels (tâche que nous soumettons dans le cadre de cette recherche), qui requiert un traitement précis des propriétés de forme et de taille, le Suivi des contours apparaît donc la PE la plus efficace. De plus, Symmons et Richardson (2000) ont mis en évidence, chez des sujets voyants artificiellement aveuglés qui devaient identifier, suite à une exploration haptique, des stimuli connus (dessins bidimensionnels représentant un sapin, un mot simple et le visage d'un bonhomme) que, malgré une variété de stratégies d'exploration, la méthode consistant à suivre les contours des dessins en utilisant un de leur doigt (qui n'est pas nécessairement toujours le même) s'avèrait largement dominante. Lorsque les sujets sont invités à explorer librement (sans contrainte relative à l'exploration manuelle) en modalité haptique des dessins en 2D, cette procédure d'exploration est adoptée spontanément.

2.2.2.2. La latéralisation dans l'exploration tactile manuelle au cours du développement

Comme le souligne Streri (2000), la question de la latéralisation dans l'exploration haptique pose des problèmes, du fait que la modalité haptique associe les composantes perceptive et motrice. Or la préférence manuelle est différente pour les activités perceptives (dominance de la main gauche) et motrices (dominance de la main droite). Le couplage perceptivo-moteur caractérisant la modalité haptique rend donc difficilement interprétables les asymétries pouvant s'observer dans des situations d'exploration manuelle. Dans ces conditions, il s'avère nécessaire d'étudier isolément les composantes perceptive et motrice afin de pouvoir analyser les asymétries comportementales, qui sont « le reflet d'asymétries dans la prise en charge et le fonctionnement des deux hémisphères » (Streri, 2000, p. 85). En outre, les dissymétries cérébrales relevées (Bradshaw & Nettleton, 1981) témoignent de la spécialisation de l'hémisphère gauche dans la prise en charge d'informations mobilisant un traitement plutôt analytique, séquentiel, sériel et focal (telles que les données verbales), alors que l'hémisphère droit fonctionnerait de façon plutôt globale, simultanée, en parallèle et holistique, et apparaîtrait mieux adapté au traitement des données spatiales. Mais alors, dans la mesure où la modalité haptique est une modalité de contact (par conséquent séquentielle), permettant néanmoins d'appréhender les propriétés spatiales des objets, « comment donc distinguer le moment où la main traite les informations de manière globale et le moment où elle détecte les informations plus locales, traite l'espace ou favorise le séquentiel ? Existe-t-il une main plus habile dans la perception haptique des formes et des orientations tandis que l'autre le serait dans les activités motrices fines ? » (Streri, 2000, p.87). De telles questions suggèrent l'intérêt et la nécessité de distinguer les aspects perceptifs et moteurs de l'activité exploratoire manuelle lorsqu'il s'agit de mettre en évidence les asymétries liées à la latéralisation manuelle.

Concernant le versant moteur de l'exploration manuelle, on remarque une évolution des asymétries au cours du développement. Les études portant sur les habiletés manuelles fines du nourrisson consistent, pour une large majorité, à enregistrer la durée d'agrippement d'un objet, en sollicitant sélectivement l'une ou l'autre main, en alternance (condition unimanuelle), ou les deux mains conjointement (condition bimanuelle). Dans ce deuxième

cas, deux objets identiques sont présentés simultanément à chaque main. Les résultats révèlent que, dans la condition unimanuelle, la durée du maintien de l'objet est plus longue pour la main droite que pour la main gauche (Caplan & Kinsbourne, 1976 ; Hawn & Harris, 1983 ; Streri & Gouarir, 1996). La force d'agrippement de l'objet est également plus importante à droite qu'à gauche, dès l'âge de deux semaines (Pétrie & Peters, 1980). Ainsi, déjà chez le nourrisson, une asymétrie en faveur de la main droite, pouvant refléter une dominance précoce de l'hémisphère gauche, a pu être relevée. Cette asymétrie est moins nette en exploration bimanuelle et devient plus importante à partir de 5-6 mois (Hawn & Harris, 1983 ; Streri & Gouarir, 1996). Une interprétation pouvant rendre compte de ce phénomène est l'hypothèse d'une inhibition de l'hémisphère droit par l'hémisphère gauche quand ils sont activés simultanément ou sont en compétition pour prêter attention à une même tâche (Caplan & Lisbourne, 1976).

Puis, chez l'enfant, « le processus de latéralisation s'impose et devient de plus en plus évident au fur et à mesure du développement » (Hatwell, 2000, p. 92). Pour les activités simples et courantes, une préférence manuelle, plus ou moins accentuée suivant les opérations effectuées, est le plus souvent observée dès l'âge de 1 an (la main droite étant généralement la main dominante). Pour la réalisation de tâches complexes ou inhabituelles (comme les tâches de tapping), les enfants sont la plupart du temps plus performants avec leur main préférée (Annett, 1970, 1985 ; Fagard, 1999).

Enfin, chez l'adulte, il a été également montré que, d'une manière générale, la performance (vitesse et précision) dans des tâches spatiales motrices (requérant des déplacements des membres effecteurs du système épaule-main) est meilleure lorsque la tâche à accomplir est réalisée avec la main préférée (l'usage préférentiel d'une main chez un sujet étant établi, comme chez l'enfant, par le calcul d'un indice de latéralité). Bryden, Roy, McManus et Bulman-Fleming (1997) ont montré que la main droite des droitiers excelle lorsqu'il s'agit d'effectuer une séquence rapide de gestes comme le tapping ou lorsque la résolution spatiale et temporelle de l'action est fine. La main gauche des droitiers est plus habile à effectuer certains mouvements individuels des doigts ou de pointage, notamment en l'absence de contrôle visuel. Ainsi, le contrôle visuel est plus important sur la main préférée. La planification de l'action est également un facteur de différence entre les deux mains et se révèle plus important que son exécution (Fagard, 1999).

Concernant la dimension perceptive de l'exploration manuelle, des changements relatifs à la latéralisation ont été observés au cours du développement.

Chez le nourrisson, les capacités de prélèvement d'informations sur la forme des objets et de détection des changements de forme ont pu être mises en évidence pour chacune des deux mains (Lhote & Streri, 2003 ; Segond & Streri, 1994 ; Streri, Lhote & Dutilleul, 2000). Toutefois, « la main gauche progresse dans sa capacité à traiter la surface des objets (hémisphère droit), tandis que la main gauche tend à perdre cette compétence au profit de sa fonction de localisation et de transport des objets dans l'espace (hémisphère gauche) » (Streri, 2000, p. 91). De plus, Lhote et Streri (1998) ont observé une asymétrie manuelle dans la mémorisation de stimuli explorés haptiquement. Après une phase d'habituation manuelle avec un objet, ces auteurs ont évalué chez des nourrissons, la mémoire, dans trois conditions : après interférence haptique (présentation d'un nouvel objet), un délai de trente secondes et sans délai. Les résultats ont révélé que, d'une manière générale, les bébés retiennent mieux l'information en exploration manuelle gauche qu'en exploration manuelle droite. En outre, afin de mettre en évidence une spécialisation manuelle dans le mode de traitement global vs analytique, Streri (1997) a soumis à des bébés âgés de 4 mois une tâche de discrimination tactile entre deux objets. Le matériel

utilisé comprend deux stimuli s'opposant par leur forme : un carré et un disque. Chacune de ces formes présente des détails, en relief ou en creux. Le groupe « global » devait différencier la forme (en traitant le contour, les détails restant invariants), tandis que le groupe « détail » devait différencier l'aspect creux ou en relief des éléments situés sur la surface des objets (le contour restant invariant). Chacune des mains des bébés était stimulée. Il s'est avéré que les bébés recourent préférentiellement à leur main droite pour discriminer les détails, alors que pour la discrimination des contours, un usage privilégié de la main gauche est observé.

Chez l'enfant, la latéralité perceptive a été étudiée à partir des situations de transfert intramodal et intermodal, qui révèlent des compétences perceptivo-cognitives importantes (nous reviendrons ultérieurement sur ce point, dans le chapitre 4). Le paradigme expérimental utilisé classiquement comprend deux phases : 1) la présentation tactile du stimulus, suivie de 2) la reconnaissance qui s'effectue par le canal tactile (condition intramodale : même modalité perceptive sollicitée durant les deux phases) ou, le plus souvent, par le canal visuel (condition intermodale : une modalité sensorielle différente est mobilisée pour la présentation et la reconnaissance). L'effet de latéralité manuelle (témoignant de la spécialisation hémisphérique) est étudié en présentant les stimuli soit successivement à chaque main (condition monohaptique), soit simultanément aux deux mains (conditions dichaptique). En dépit des différences relevées dans certaines études entre les filles et les garçons, les travaux réalisés ont pu mettre en évidence une spécialisation hémisphérique droite pour le traitement haptique des données spatiales (Coiffi & Kandel, 1979 ; Verjat, 1988), cette spécialisation apparaissant à partir de l'âge de 2 ans (Rose, 1984).

A l'âge adulte, les mêmes asymétries perceptives se retrouvent en règle générale (les résultats rapportés dans la littérature ne sont toutefois pas toujours concordants ni cohérents). Les données recueillies chez des sujets présentant des lésions gauches ou droites et des sujets commissurotomisés font état de la supériorité de l'hémisphère droit dans le traitement haptique des formes (Franco & Sperry, 1977 ; Nebes, 1971). Des résultats similaires ont été obtenus auprès de sujets sains, que la situation d'exploration soit du reste monohaptique intramodale ou intermodale (Fagot, Lacreuse & Vauclair, 1997 ; Lacreuse, Fagot & Leclerc, 1996 ; Verjat, 1989).

D'autres auteurs ont en outre suggéré que les asymétries manuelles (ou hémisphériques) et les changements liés à l'âge concernant le traitement haptique de données spatiales ne relèvent pas uniquement d'un processus simple de latéralisation, mais dépendent également de stratégies cognitives (processus centraux) sous-jacentes aux performances (Benoit-Dubrocard, Liégeois & Harlay, 1997 ; Koenig & Hauert, 1986 ; Lacreuse et al., 1996) ou de processus de maturation cérébrale (Dehaene-Lambertz, 1997).

3. La perception des caractéristiques visuo-spatiales en modalités visuelle et haptique

Après avoir décrit séparément les architectures neuro-anatomiques des systèmes visuel et haptique, nous allons maintenant voir dans quelle mesure ces deux modalités perceptives peuvent se distinguer ou s'opposer, ou au contraire être rapprochées. Nous nous attacherons également à considérer les interactions existant entre les systèmes visuel et haptique.

3.1. Différences et similitudes entre les modalités visuelle et haptique dans le traitement des informations visuo-spatiales

Les propriétés anatomo-fonctionnelles de la modalité haptique ont pour conséquence directe de rendre le traitement des informations spatiales très séquentiel, analytique et souvent incomplet (Gentaz, Colé & Bara, 2003 ; Gentaz & Rossetti, 1999). Le caractère séquentiel de cette modalité perceptive s'oppose au traitement quasi-simultané et beaucoup plus global que permet la perception visuelle. Le toucher se distingue de la vision en ce qu'il est une modalité de contact (qualité de proximo-réception). En raison de cette propriété, le champ perceptif tactile est limité à la zone de contact avec les objets, ce qui restreint la quantité d'informations pouvant être simultanément traitées (Loomis, Klatzky & Lederman, 1991). L'exiguïté du champ perceptif tactile engendre « une appréhension morcelée, plus ou moins cohérente, parfois partielle et toujours très séquentielle, qui charge lourdement la mémoire de travail et qui nécessite, en fin d'exploration, un travail mental d'intégration et de synthèse pour aboutir à une représentation unifiée de l'objet, [alors que] le vaste champ perceptif visuel permet une appréhension globale et immédiate de beaucoup d'aspects du stimulus » (Hatwell, 2000, p. 2). De plus, l'amplitude des mouvements oculaires est extrêmement faible comparativement à celle des mouvements manuels. Pour ces raisons, « il est donc justifié de considérer le toucher comme beaucoup plus séquentiel que la vision » (Hatwell, 2000, p. 3). Aussi, de nombreux travaux rendent compte, chez des sujets voyants, des différences et des plus grandes difficultés à traiter les propriétés spatiales d'un stimulus en modalité haptique, comparativement à l'extraction des caractéristiques spatiales par le système perceptif visuel. Le traitement de l'organisation spatiale générale apparaît par exemple plus problématique en haptique, cette modalité étant, à cause de ses caractéristiques anatomo-fonctionnelles, peu adaptée au traitement global de la forme. C'est pourquoi le toucher s'avère moins sensible que la vision aux lois gestaltistes régissant l'analyse des configurations spatiales (Hatwell, Orliaguet & Brouty, 1990). En outre, les illusions perceptives classiquement observées pour la vision ne se retrouvent généralement pas en exploration haptique. L'illusion de la verticale-horizontale, dans laquelle les longueurs orientées verticalement sont surestimées par rapport aux mêmes longueurs orientées horizontalement, s'avère de moindre ampleur en modalité haptique (Heller, 2000 ; Taylor, 2001). De même, l'illusion de Müller-Lyer, dans laquelle les sujets jugent plus court un segment fléché à ses deux extrémités suivant deux directions opposées tournées vers l'extérieur (cf. figure 7 : stimulus A) qu'un segment de même taille délimité par les patterns > et < à ses extrémités gauche et droite, respectivement (stimulus B), apparaît le plus souvent moins prégnante lorsque les stimuli sont explorés haptiquement (Heller, 2000 ; Millar & Zainab, 2002).

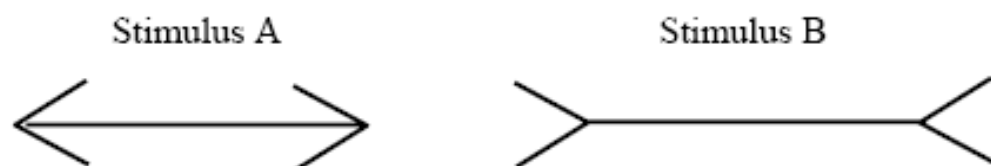


Figure 7 : L'illusion de Müller-Lyer. Le segment constitutif du stimulus B est jugé plus long que le segment constitutif du stimulus A.

D'autres principes existant pour la perception visuelle ne semblent pouvoir s'appliquer à la perception haptique. C'est le cas de la perspective (Hopkins, 2000 ; Lopes, 1997). La représentation d'un espace en trois dimensions serait propre à la modalité visuelle. De même, on ne trouve pas, dans la perception haptique des formes, l'effet facilitateur de la symétrie, en particulier verticale, qui apparaît toujours dans la vision (Ballasteros, Manga & Reales, 1997 ; Locher & Wagemans, 1993 ; Wagemans, 1995). Par ailleurs, la plus grande imprécision de la modalité haptique par rapport à la modalité visuelle dans l'analyse des informations spatiales a été mise en évidence pour la perception de la longueur ou de la distance (Klatzky, 1999 ; Lanca & Bryant, 1995 ; Philip & Hatwell, 1998), de la courbure (Kappers, Koenderink & Lichtenegger, 1994 ; Kappers, Koenderink & Pas, 1994 ; Pont, Kappers & Koenderink, 1997, 1998 ; Vogels, Kappers & Koenderink, 1996, 2001) et de la taille angulaire (Lakatos & Marks, 1998). Ces phénomènes seraient principalement liés à l'utilisation d'un cadre de référence spatial différent dans les deux modalités pour coder la localisation spatiale et l'orientation.

Comme l'expliquent Gentaz et Hatwell (2000), « localiser un stimulus dans l'environnement suppose de coder sa place dans un cadre de référence, [mais] comme le système haptique est une modalité de contact qui apporte moins d'informations sur les objets extérieurs que le système visuel, on s'est demandé si, chez les enfants en particulier, une référence égocentrée est plus souvent utilisée qu'une référence allocentrée pour localiser haptiquement un stimulus » (p. 144). Par référence égocentrée, on entend un système de codage des informations spatiales (traitement de la localisation) par rapport au corps propre, alors qu'une référence exocentrée (ou allocentrée) renvoie à un système de codage reposant sur la mise en relation des informations traitées avec des indices extérieurs stables. Dans la perception haptique, « quand la main est en contact avec l'objet-cible, elle ne dispose pas, comme dans le système oculaire, d'un « champ périphérique » ayant une valeur d'appel et pouvant fournir des points d'ancrage. Le sujet doit donc effectuer intentionnellement des mouvements d'exploration dans l'espace de travail pour chercher (s'ils existent) des repères extérieurs » (Hatwell, 2000, p.75). La distinction entre les cadres de référence égocentré et allocentré a été mise en évidence dans l'étude des processus de traitement des orientations spatiales en perceptions visuelle et haptique, et notamment à travers l'analyse d'un phénomène anisotropique, appelé l'« effet de l'oblique ». De nombreux travaux (Appelle, 1972 ; Esock, 1980 ; Howard, 1982 ; Luyat & Gentaz, 2002) ont démontré l'existence d'une anisotropie dans la perception de l'orientation, signifiant que « la perception d'une orientation diffère selon sa valeur » (Gentaz, 2000, p.112). Cependant, alors que cet effet s'observe systématiquement en perception visuelle, il n'apparaît que dans certaines conditions en exploration haptique, relevant de facteurs liés à la latéralité exploratoire (Appelle & Countryman, 1986 ; Gentaz & Hatwell, 1999) et à la posture (Luyat, Gentaz, Corte & Guerraz, 2001). Les indices gravitaires jouent également un rôle important dans la perception haptique des caractéristiques spatiales. Robles-De-La-Torre et Hayward (2001) ont montré, chez des sujets voyants temporairement aveuglés, que la perception haptique de formes bi-dimensionnelles et leur localisation spatiale sont fortement déterminées par les indices de forces physiques. Gentaz et Hatwell (1995, 1996) ont mis en évidence l'influence des contraintes gravitaires dans la perception des orientations (effet de l'oblique). Aussi, la présence ou l'absence de l'effet de l'oblique observée dans les différentes conditions expérimentales testées a permis de mettre en évidence que ce dernier est notamment conditionné par l'utilisation d'un cadre de référence égocentré ou exocentré. L'apparition de l'effet de l'oblique découlerait (au moins en partie) d'un codage des orientations spatiales dans un cadre de référence exocentré, dans lequel les axes vertical et horizontal (repère orthogonal) servent de coordonnées cartésiennes.

Cette anisotropie atteste donc « d'une référence aux coordonnées cartésiennes, qui rend coûteux le traitement des obliques puisqu'il exige la prise en considération de deux coordonnées, tandis que celui de la verticale et de l'horizontale se fait directement sur un seul axe de référence » (Hatwell, 2000, p. 77). L'hypothèse de l'utilisation de cadres de référence différents en perceptions visuelle et haptique a été également mise en avant pour expliquer les difficultés à traiter tactilement le parallélisme (Kappers, 1999, 2002 ; Kappers & Koenderink, 1999) qui témoignent des limites et de l'imprécision du système haptique dans l'analyse des relations spatiales. Ainsi, comme le suggèrent Gentaz, Luyat, Cian, Hatwell, Barraud et Raphel (2001), les systèmes visuel et haptique semblent donc s'appuyer sur des mécanismes spécifiques pour traiter l'orientation.

Malgré les divergences relevées entre les modalités visuelle et haptique dans le traitement des informations spatiales, certains auteurs suggèrent l'idée que ces deux modalités perceptives partageraient néanmoins des mécanismes communs. S'inspirant du paradigme utilisé par D'Angiuli, Kennedy et Heller (1998) avec des enfants aveugles, Kennedy et Bai (2002) ont conduit une série d'expériences auprès de jeunes adultes voyants. Dans une première expérience, ces derniers étaient invités à explorer des « images tactiles » (Eriksson, 1998), qui étaient des dessins en reliefs, qualifiés de bi-dimensionnels (car mettant en jeu une représentation en 2D), tracés sur une feuille plastifiée reposant sur une mince couche de caoutchouc, sur laquelle la pression d'un simple stylo à bille creuse un sillon haptiquement perceptible. La tâche consistait à identifier les dessins d'objets communs. Au cours d'une première phase, les sujets, artificiellement aveuglés, exploraient et nommaient successivement le maximum de dessins composant une série de huit formes significatives et d'objets familiers ou usuels (une étoile, un arbre, un parapluie, etc...). Le temps d'exploration pour chacun des dessins était limité à 120 secondes. Les sujets devaient également estimer, sur une échelle en sept points, le niveau de confiance ou d'exactitude de leur réponse. Puis, après trois minutes, ils exploraient à nouveau tactilement une série de dessins en relief qui comportait, en plus des mêmes stimuli présentés lors de la première phase, deux autres dessins (distracteurs). Ils devaient là encore identifier autant d'objets que possible. Outre le taux élevé d'identification haptique des stimuli, les résultats ont montré un maintien lors de la deuxième phase des réponses correctes énoncées lors de la phase initiale, et un changement des mauvaises réponses (pour lesquelles le degré de confiance était plus bas). Comme D'Angiulli et Kennedy (2000, 2001), Kennedy et Bai (2002) montrent que les sujets sont capables de juger leurs réponses (et de corriger leurs réponses erronées) concernant l'identification (tâche de dénomination) d'objets explorés en modalité haptique. Dans une deuxième expérience, les auteurs se sont intéressés au processus de reconnaissance de mémoire de dessins d'objets explorés tactilement. Kennedy et Bai (2002) soulignent que pour qu'un sujet identifie correctement un objet et soit en mesure de le mémoriser sans trop de difficulté, il doit construire une représentation unifiée de cet objet, intégrant les différents éléments le constituant et leurs positions relatives. Comme dans l'expérience 1, lors d'une première phase, les sujets exploraient haptiquement tour à tour une série de dessins en relief d'objets familiers, puis exploraient, lors d'une deuxième phase, une autre série de dessins, comportant les dessins déjà explorés auparavant, ainsi que six nouveaux dessins (distracteurs). Les stimuli étaient présentés dans des orientations différentes. Les sujets devaient identifier le maximum d'items et estimer, sur une échelle en sept points, le niveau de confiance (degré de certitude) de chacune de leurs réponses. De plus, ils devaient repérer les dessins présentés dans les deux phases, indépendamment de l'orientation. Les résultats ont montré une bonne mémorisation des items, et ont révélé que le niveau de confiance était plus élevé pour les dessins reconnus pour lesquels les sujets jugeaient qu'ils avaient été présentés dans les deux phases que ceux n'ayant pas

été mémorisés. Cette deuxième expérience confirmait la valeur prédictive du niveau de confiance dans l'identification haptique d'objets et dans le processus de mémorisation. Deux autres expériences (3 et 4) avaient pour objet de voir si le niveau de confiance concernant le jugement d'un sujet était corrélé à celui d'un autre sujet, afin de déterminer si l'identification haptique d'objets en 2D repose sur la mise en correspondance entre d'une part, les caractéristiques physiques des lignes explorées (forme) et leur organisation spatiale, et d'autre part, des références ou connaissances stockées en MLT sur l'objet. Les résultats ont mis en évidence le processus d'appariement entre les références du sujet concernant les traits physiques figuraux et spatiaux (forme, taille, et configuration spatiale) spécifiques à l'objet et les caractéristiques extraites du stimulus perçu. Enfin, dans une cinquième et dernière expérience, un autre groupe de sujets devait juger (toujours en utilisant l'échelle en sept points), visuellement, le niveau d'exactitude des réponses données par les participants de l'expérience 1 (exploration haptique) relatives à l'identification des objets dessinés. Une corrélation positive entre les jugements de confiance donnés par les participants de l'expérience 1 et les jugements donnés par les sujets explorant visuellement les stimuli à propos de la précision des réponses fournies par les sujets ayant exploré tactilement les items a été obtenue. Ces travaux suggèrent l'utilisation de représentations visuelles lors de tâches visuo-spatiales tactiles, le recours à une médiation visuelle (Klatzky & Lederman, 1987) permettant la conversion des informations perçues haptiquement en images mentales visuelles pouvant faciliter le traitement des données spatiales.

3.2. Les interactions entre les modalités visuelle et haptique au sein du système cognitif

Jusqu'à présent, nous nous sommes intéressés à l'activité d'imagerie à partir de l'une ou l'autre des modalités visuelle et haptique. Mais il existe des interactions entre ces deux modalités perceptives. Dans de nombreux cas, les composantes ou « modules » (Fodor, 1983) du système cognitif ne fonctionnent pas de façon totalement autonome, le traitement d'une information pouvant faire appel à des modules différents, rentrant en interconnexion. Nous examinerons ici deux types de situations impliquant des interactions intermodales. D'une part, nous aborderons les situations d'appariements intermodaux, dans lesquelles « un objet (ou une propriété) est perçue par une modalité (par exemple, la vision), puis un test de reconnaissance est donné dans l'autre modalité (le toucher). Cela permet d'évaluer le « transfert intermodal », c'est-à-dire la communication de l'information d'une modalité à l'autre » (Hatwell, 2000, pp. 211-212). D'autre part, nous nous intéresserons aux situations de fonctionnement bisensoriel simultané, dans lesquelles « les deux modalités appréhendent en même temps un même objet et se coordonnent pour l'estimer de façon cohérente. Les caractéristiques de cette coordination, en cas de conflit perceptif, montrent la contribution de chacune au percept final » (Hatwell, 2000, p. 212).

3.2.1. Les échanges d'informations entre les modalités visuelle et haptique : le transfert inter-modal

Les représentations construites sur la base d'une modalité perceptive pour l'extraction d'une propriété d'un stimulus peuvent être exploitées pour traiter cette même propriété dans une autre modalité sensorielle. Un « transfert inter-modal » s'opère alors. Rose (1984) a mis en évidence le transfert d'informations relatives à la forme d'un stimulus, chez de jeunes enfants de 1, 2 et 3 ans. Les sujets manipulaient un objet avec l'une ou l'autre main (procédure dichaptique) pendant une durée de 25 secondes, puis leur étaient présentés visuellement l'objet familier et un objet nouveau pendant 10 secondes. Le temps

d'observation du nouvel objet était significativement plus long que le temps passé à regarder l'objet déjà exploré, attestant d'un transfert intermodal du toucher à la vision. Cependant, en raison d'importantes différences interindividuelles constatées chez les nourrissons dans le transfert intermodal, certains auteurs se sont demandés si ces différences sont stables dans le temps et corrélaient avec les performances intermodales mesurées quelques années plus tard. Ainsi, Rose, Feldman, Futterweit et Janowski (1998) ont suivi un groupe d'enfants entre 7 mois et 11 ans, dont ils ont évalué les compétences spatiales de transfert toucher-vision (haptique-vision : H-V), de transfert audition-vision et vision-audition (ceci afin de savoir si les capacités intermodales sont générales ou spécifiques à certaines modalités), ainsi que le QI et les aptitudes spatiales. Les résultats ont révélé une certaine stabilité avec l'âge des scores intermodaux H-V (uniquement lorsque les objets sont explorés de la main gauche ; pour le problème de la latéralité des fonctions manuelles, cf. chapitre 1), ainsi qu'une corrélation significative avec le QI (mais cette dernière ne peut être imputée à des aptitudes spatiales car elle se maintient même si on neutralise ce facteur spatial). En revanche, la corrélation entre les tâches inter-modales H-V et celles impliquant la vision et l'audition n'est pas significative, ce qui suggère que la continuité des capacités intermodales avec l'âge est spécifique aux modalités tactile et visuelle. En outre, si l'on ne tient pas compte de l'amélioration des performances intra-modales (vision-vision et toucher-toucher) concomitantes à l'amélioration des performances inter-modales, les capacités de transfert intermodal s'avèrent stables au cours du développement (Hatwell, 1986 ; Juurmaa & Lehtinen-Railo, 1994).

Si l'existence d'un transfert inter-modal a donc pu être mise en évidence, notamment entre les modalités visuelle et haptique, il a été par ailleurs montré que le traitement d'informations, en particulier spatiales (puisque ce sont celles qui nous intéressent plus spécialement ici), n'est le plus souvent pas amodal. Garbin (1988) et Hatwell (1986) ont ainsi montré que, dans des tâches spatiales, les performances intermodales sont supérieures aux performances intramodales de la modalité la moins efficace (la modalité haptique pour ce qui est du traitement de propriétés géométriques), soulignant le rôle facilitateur de la vision dans l'analyse des informations spatiales. De plus, lorsque les performances intramodales spatiales visuelles et haptiques sont comparables, il y a le plus souvent une supériorité des performances intramodales sur les performances intermodales (Milewski & Laccino, 1982). La nature non amodale du traitement de l'information spatiale ressort également à travers l'asymétrie caractérisant le transfert inter-modal. En effet, le transfert est très souvent mieux réussi dans le sens H-V que dans le sens V-H (Jones, 1981 ; Juurmaa & Lehtinen-Railo, 1994 ; Newham & McKenzie, 1993 ; Hatwell, 1986, 1994). Ces résultats vont à l'encontre de la position de Gibson (1966), qui soutient une conception amodale du traitement de l'information, notamment spatiale. Il semble que les diverses modalités perceptives (visuelle et haptique ici) fassent appel à des modes de codage de l'information spatiale différents et spécifiques, et que le passage de l'information d'une modalité à une autre nécessite donc un recodage de l'information à traiter (Connolly & Jones, 1970 ; Hatwell, 1994). Aussi, les différences ou asymétries observées entre les modalités visuelle et haptique proviennent en partie du fait que les informations stockées en mémoire divergent selon l'entrée sensorielle sollicitée.

3.2.2. Les interférences entre les représentations visuelles et haptiques : les conflits inter-modaux

Plusieurs auteurs ont examiné les modes de traitement de l'information spatiale en situation d'exploration bimodale simultanée. Dans le cadre de cette recherche, dans la mesure où nous nous intéressons aux modalités visuelle et haptique, nous nous centrerons donc

sur le cas de l'exploration visuo-tactile. Dans cette perspective, une grande partie des travaux cherchent à évaluer la dominance de l'une de ces deux modalités perceptives dans une tâche bimodale dans laquelle, afin d'extraire une propriété spatiale, le sujet peut avoir recours simultanément à des indices visuels et haptiques. Une concurrence ou une interférence entre ces deux types d'indices peut alors apparaître, et être à l'origine de conflits représentationnels. Dès 1964, Rock et Victor ont mis en évidence la dominance de la vision en situation de conflit vision-toucher dans l'analyse de la propriétés de forme. Dans l'expérience proposée par ces auteurs, les sujets étaient invités à palper un carré sous un rideau, tout en percevant visuellement ce carré à travers une lentille lui donnant l'apparence d'un rectangle. Ils devaient ensuite reconnaître cet objet parmi plusieurs autres soit visuellement soit haptiquement. Les résultats ont mis en évidence une capture visuelle totale, les sujets choisissant l'objet correspondant à sa forme visuelle (rectangle) en ne tenant nullement compte des informations tactiles conflictuelles (carré). Par la suite, Misceo, Hershberger et Mancini (1999) et Miller (1972) ont abouti à des résultats analogues chez des populations d'enfants et d'adultes, respectivement. Toutefois, la notion de dominance visuelle a été nuancée car, chez l'adulte, elle se manifeste surtout quand le test est visuel. Lorsque le test est haptique, un « compromis » (Hatwell, 1986 ; Hatwell & Cazals, 1988), voire une tendance à la capture haptique (Hershberger & Misceo, 1996 ; Misceo, Hershberger & Mancini, 1999) sont observés. De plus, un compromis (Power & Graham, 1976) ou même une capture haptique nette (Heller, 1983) apparaissent lorsque l'intensité de la discordance est très forte. Ces données suggèrent que la vision s'avère dominante dans le traitement spatial et que les informations haptiques ne sont utilisées qu'en cas de rupture franche de la cohérence intermodale.

Récemment, Ernst et Banks (2002) ont modélisé mathématiquement (sous la forme d'une fonction psychométrique) le traitement de l'information en situation d'exploration bimodale visuelle-haptique. Selon ces auteurs, les informations visuelles et haptiques sont intégrées, via le système nerveux, dans un modèle statistique qui détermine ou estime, pour une propriété physique donnée de l'environnement, la part (ou le poids) de chacune des modalités perceptives. Ainsi, lorsque les modalités visuelle et haptique sont conjointement mobilisées dans l'analyse d'une caractéristique d'un stimulus, le système nerveux opère un calcul par le biais duquel va être évaluée la quantité (en proportion ou probabilité) moyenne d'information traitée par chacune des modalités perceptives. Le poids attribué à chacune des modalités sensorielles est plus ou moins équilibré, suivant la propriété faisant l'objet du traitement.

Dans ce chapitre, consacré au traitement des propriétés figuratives et spatiales en explorations visuelle et haptique, nous avons montré l'existence de différences entre ces deux modalités dans l'encodage perceptif et l'intégration en mémoire des informations visuo-spatiales. En effet, il résulte du caractère séquentiel de l'exploration tactile manuelle une difficulté de construction de représentations cohésives, alors que l'exploration visuelle, qui permet un encodage global des données, rend aisée l'élaboration de représentations unifiées. Ainsi, la modalité perceptive d'exploration, visuelle ou haptique, conditionne le mode d'intégration en MDT des informations visuo-spatiales, et donc le contenu des représentations. Dans le chapitre qui suit, nous nous interrogerons non plus sur le contenu des représentations dans le traitement des informations visuo-spatiales, mais sur la nature de ces dernières. Rappelons que l'hypothèse générale que nous formulons dans le cadre de cette recherche est précisément que l'émergence du PEC est non seulement conditionnée par le contenu des représentations, mais également par le format de stockage en mémoire de celles-ci. Nous mettrons l'accent sur le rôle des représentations visuelles et verbales dans le traitement des informations visuo-spatiales.

Chapitre 4. Le format de stockage des informations visuo-spatiales

Ce chapitre est consacré aux questions relatives à la nature des représentations stockées en mémoire dans l'extraction de propriétés visuo-spatiales. Nous abordons successivement la construction des images mentales visuelles en fonction de la modalité perceptive (visuelle vs haptique) de traitement des informations visuo-spatiales et du statut visuel du sujet, puis celle des représentations verbales.

1. Imagerie visuelle en perceptions visuelle et haptique

Concernant l'activité d'imagerie mentale visuelle, nous traiterons, en premier lieu, séparément les situations d'exploration visuelle et d'exploration haptique, puis évoquerons les relations pouvant exister entre ces deux modalités perceptives dans l'émergence de représentations permettant le traitement des propriétés visuo-spatiales d'un stimulus.

1.1. Perception et imagerie visuelles

1.1.1. Les principaux modèles d'imagerie visuelle

La plupart des modèles relatifs à l'imagerie mentale sont essentiellement consacrés à l'imagerie visuelle, et sont appliqués à des situations ou des tâches pour lesquelles l'activité d'imagerie fait suite à une exploration visuelle du stimulus. Considérant le cas des images mentales visuelles, Mellet (2002) explique : « Les images mentales visuelles sont un type de représentation utilisé lorsqu'on s'appuie sur une information visuelle stockée en mémoire plutôt que sur une information fournie directement par la perception. [...] il paraît raisonnable de penser que celle-ci se construit à partir d'une expérience perceptive visuelle ; en ce sens elle pourrait être assimilée à un souvenir visuel. Mais il ne s'agit là que d'un aspect de l'image mentale » (pp. 419-420). Roland et Gulyas (1994) définissent l'imagerie visuelle comme la représentation d'expériences visuelles générées en l'absence d'entrée (input) rétinienne. Mellet (2002) précise néanmoins que l'imagerie mentale s'étend à d'autres formes de représentations, non visuelles. Dans le cadre de cette recherche, nous envisageons également une définition large du concept de représentation, qui ne se réduit pas aux images visuelles, mais aux différentes formes d'évocation (interne) d'informations stockées en mémoire (MDT ou MLT) en dehors de toute perception.

Les modèles relatifs à l'activité d'imagerie rendent compte des opérations permettant l'émergence de représentations visuelles à partir de la perception ou de l'évocation d'objets. Partant du principe que les traits que le système visuel extrait initialement des objets sont spatiaux et formés d'arêtes orientées, Biederman (1987) et Hummel et Biederman (1992) ont développé une théorie de la reconnaissance visuelle d'objets, selon laquelle les traits de bas niveau, ou primitives, sont basés sur des arêtes spatialement arrangées, de manière à produire un trait (feature) constitutif, c'est-à-dire un volume régulier appelé « géon ». Un nombre restreint de géons, disposés de façon adéquate dans l'espace et ayant une taille appropriée, serait suffisant pour recréer n'importe quel objet familier. Dès lors, le processus de reconnaissance de pattern consiste notamment à extraire les arêtes, déterminer les géons à partir de leur localisation et leur agencement spatial, combiner ces géons en un objet, et comparer cet objet aux représentations stockées en MLT contenant les diverses catégories d'objets.

Kosslyn (1980) a proposé un autre modèle explicatif du fonctionnement de l'activité d'imagerie visuelle, dans lequel il postule la présence d'une mémoire visuelle à long terme, contenant les informations sur l'apparence des objets. Une seconde structure, le « buffer visuel », dans laquelle sont stockées les propriétés invariantes du stimulus, permet l'émergence des images mentales visuelles. Kaski (2002) explique que notre expérience consciente d'une image consiste en une activation de patterns dans le buffer visuel. Bien que, comme le cache visuel issu du modèle de la MDT de Logie (1995), le buffer visuel permette la maintien temporaire d'informations visuo-spatiales, ces deux structures ne sont néanmoins pas équivalentes. Alors que le cache visuel constitue une simple réserve d'informations visuo-spatiales alimentant le processeur exécutif central, le buffer visuel est le siège de la manipulation consciente d'une partie de l'information visuo-spatiale contenue dans le cache visuel (il remplit donc les mêmes fonctions que l'administrateur central). Bideaud et Courbois (1998) expliquent que « chez Kosslyn (1980, 1994), le buffer visuel, qui sert à la fois de système de traitement de l'input sensoriel et de « mémoire à court terme », dirige les informations visuo-spatiales vers les structures de mémoire à long terme (mémoire visuelle, mémoire associative). Chez Logie, l'information visuelle passe nécessairement en mémoire à long terme avant d'être maintenue ou travaillée dans la mémoire de travail visuo-spatiale » (p. 166). Dans le modèle de Logie (1995), « les processus de perception ont directement accès à la base des connaissances stockées concernant les stimuli perçus. C'est seulement après que cette connaissance stockée a été activée que l'information devient disponible pour la MDT » (Pearson & Logie, 1998).

Par la suite, Kosslyn (1994) remanie ce premier modèle et en conçoit un second comportant sept sous-systèmes indépendants mais interconnectés. Parmi ceux-ci, on retrouve le buffer visuel, qui traite les informations visuelles en provenance de la rétine tout en servant de support aux représentations visuelles. Le buffer visuel pouvant contenir plus d'informations qu'il n'est possible d'en traiter à un moment donné, une deuxième structure, mobile, nommée « fenêtre attentionnelle », sélectionne la région de ce dernier (par un mécanisme d'inhibition des autres régions du buffer) qui fera l'objet de traitements ultérieurs. Le système d'encodage des propriétés visuelles de l'objet (système ventral) traite les caractéristiques de forme, de couleur et de texture, alors que le système d'encodage des propriétés spatiales (système dorsal) est sensible aux variations de localisation, d'orientation et de taille. La mémoire associative constitue le lieu de convergence des données provenant des systèmes ventral et dorsal, qui sont reliés l'un à l'autre et associés à d'autres informations concernant l'objet (nom, catégorie, etc.). Une sixième structure intervient dans la sélection des représentations en mémoire associative qui font l'objet d'un test d'hypothèse lorsque plusieurs représentations sont candidates dans le traitement des propriétés visuo-spatiales d'un stimulus : il s'agit du système de recherche d'information. Enfin, le système de déplacement de l'attention commande les mouvements de la fenêtre d'attention qui permet la recherche d'information concernant un stimulus. Une fois la fenêtre placée, son contenu est ensuite traité.

Les informations alors stockées sont manipulées et subissent différents traitements. Un processus de « génération » sous-tend la création de l'image dans le buffer visuel à partir des informations stockées dans la mémoire visuelle à long terme. Un processus d'« inspection » opère l'exploration des patterns pour récupérer les informations telles que la forme et la configuration spatiale. D'autres processus transforment l'image (rotation, translation, réduction de la taille...). Gallina (1998) a montré, chez des enfants entre 5 et 11 ans, que les processus de génération, de maintien et d'inspection de l'image constituent trois modules d'imagerie relativement indépendants.

Le modèle de Tye (1984, 1988) concernant l'imagerie mentale se centre autour de l'idée que les images mentales visuelles sont encodées dans des régions du cortex visuel possédant une organisation topographique. Comme Kosslyn (1980), cet auteur postule que les images mentales sont générées plutôt que seulement récupérées, et peuvent donc être modifiées en manipulant les informations stockées en mémoire. Pour les images visuelles, le buffer visuel est activé par des processus de génération agissant sur les informations relatives à l'apparence physique et à la structure spatiale des objets, qui sont stockées en MLT. Dans le cas de la perception visuelle, le buffer visuel est activé par des processus opérant sur les informations parvenant à la rétine. La théorie de Tye (1984, 1988) est donc conforme à celle de Kosslyn (1980, 1994).

En outre, si la plupart des modèles d'imagerie mentale se focalisent sur la composante perceptive, la théorie piagétienne prend également en compte le rôle important de la motricité dans la genèse et le développement des images mentales. Selon Piaget et Inhelder (1966), l'image mentale ne peut pas être considérée comme une simple copie du réel basée sur des mécanismes perceptifs, mais procède d'une reconstruction active qui suppose l'intervention de la motricité. Bideaud et Courbois (1998) relatent deux arguments en faveur de cette hypothèse : « Le premier fait référence aux corrélats électrophysiologiques qui accompagnent l'imagerie motrice. Des électromyogrammes permettent en effet de déceler une légère activité musculaire périphérique au niveau du bras lorsque le sujet s' imagine bouger celui-ci. Le second argument fait référence à la similitude de la motricité oculaire observée lorsque le sujet explore visuellement un objet ou lorsqu'il s'en construit une image mentale » (p. 167). Ainsi, tout comme la perception, la motricité participe donc elle aussi à l'activité d'imagerie. Aussi, en dépit de l'existence de différences entre les images mentales visuelles et motrices, qui se distinguent par la modalité mise en œuvre (Lautrey, 1989) et par la possibilité d'explicitement verbalement leur contenu (Annett, 1995 ; Jeannerod, 1994), ces deux types de représentations présentent des analogies fonctionnelles (Jeannerod, 1994, 1995) et partagent des ressources communes (Annett, 1995 ; Quinn, 1994), les interactions (effet facilitateur ou interférence) dont elles peuvent faire l'objet témoignant de ces similitudes.

1.1.2. L'imagerie mentale et la perception visuelles : des bases neurales communes

De nombreux éléments comportementaux, issus de la psychologie expérimentale, suggèrent que l'imagerie mentale et la perception visuelles partagent un certain nombre de propriétés et qu'elles mobilisent donc des processus neurocognitifs communs. Cette proximité se traduit par la mise en jeu de structures cérébrales communes à l'imagerie et à la perception. En particulier, la dichotomie, décrite en perception visuelle, entre les deux grandes voies fonctionnelles de traitement de l'information, est également valide dans le domaine de l'imagerie mentale. Plusieurs études en TEP ont en effet démontré que la voie dorsale (« où ? ») pouvait être mise en jeu en l'absence de toute entrée visuelle, lors de tâches spatiales effectuées sur des images mentales. Mellet (2002) rapporte une de ses expériences (Mellet et al., 1995), dans laquelle il était montré que l'exploration mentale d'une carte visuellement apprise provoque une activation du gyrus occipital supérieur droit et du sillon intrapariétal gauche, s'étendant jusqu'au précunéus, à la face interne du lobe pariétal. L'imagerie cérébrale fonctionnelle a ainsi permis de montrer que la voie anatomo-fonctionnelle occipito-pariétale, spécialisée dans le traitement perceptif de l'information visuo-spatiale, intervient également dans les aspects spatiaux de l'imagerie mentale. De la même façon, la voie ventrale occipito-temporale, qui joue un rôle majeur dans l'identification des objets (« quoi ? ») ou des visages (« qui ? »), est également impliquée lorsque ces objets

sont évoqués sous la forme d'une image mentale. O'Craven et Kanwisher (2000) ont ainsi rapporté que, comme pour la perception, l'aire fusiforme du visage (fusiform face area, ou FFA) est activée durant l'imagerie mentale de visages tandis que l'aire parahippocampique des lieux (parahippocampal place area, ou PPA) l'est pendant l'imagerie mentale des lieux. Les régions de la voie ventrale, nécessaires à l'identification des informations visuelles, sont donc aussi engagées dans l'imagerie mentale, en dehors de toute entrée perceptive.

Ainsi, la dichotomie anatomo-fonctionnelle entre la voie dorsale et la voie ventrale, selon la nature spatiale ou figurative de la tâche d'imagerie mentale, se superpose à celle mise en évidence dans le domaine de la perception visuelle. Cette communauté de structure matérialise les analogies entre la perception visuelle et l'imagerie mentale observées en psychologie cognitive. D'autres recherches (Farah, 1984, 1988 ; Kosslyn, 1980, 1987, 1994) suggèrent que l'activité d'imagerie fait appel à des mécanismes normalement dédiés à la perception visuelle, en soutenant l'idée que le buffer visuel serait le support commun de l'entrée (input : le percept) et de la sortie (output : l'image mentale).

En outre, concernant la perception et l'imagerie visuelles, Mellet (2002) souligne que « le sens du flux d'information est [...] opposé pour ces deux activités : des aires visuelles primaires vers les aires visuelles associatives, puis vers les aires intégratives (pariétales et frontales entre autres) pour le traitement perceptif ; des aires intégratives vers les aires visuelles associatives pour l'imagerie mentale. Le traitement est dit bottom-up en anglais (« de bas en haut ») pour la perception et top-down (« de haut en bas ») pour l'imagerie mentale » (pp. 423-424). Il soulève la question de savoir jusqu'où descend le traitement top-down nécessaire à la génération des images mentales : jusqu'aux aires visuelles associatives ou jusqu'à l'aire visuelle primaire (V1) ?

1.1.3. Rôle de l'aire visuelle primaire (V1) dans le processus top-down de l'imagerie mentale

De nombreuses recherches confortent l'hypothèse de l'existence d'un substrat neural commun à la perception et à l'imagerie visuelles. Mais si nombreuses sont les études démontrant qu'au moins certaines aires visuelles d'ordre supérieur, situées dans les lobes pariétal et temporal, participent à la fois à la perception et à l'imagerie (Miyashita, 1995 ; Moscovitch, Behrmann & Winocur, 1994), toutes ne rapportent pas que l'aire V1 est impliquée dans la génération d'une image mentale visuelle. Les positions concernant l'implication de l'aire visuelle primaire V1 (ou cortex strié) dans le processus top-down de l'imagerie mentale divergent. Pour certains auteurs, la participation de l'aire V1 dans ce processus est réelle. Ainsi, l'activation ou le rôle du cortex occipital dans l'activité d'imagerie a été mise en évidence (Goldenburg, Podreka, Steiner, Willmes, Suess & Deecke, 1989 ; Goldenburg, Steiner, Podreka & Deecke, 1992 ; Kosslyn, Alpert, Thompson, Maljkovic, Weise, Chabris, Hamilton & Buonanno, 1993). Kosslyn (1994) postule que la préservation, dans les images mentales, de certaines propriétés structurales et fonctionnelles suppose une implication des aires visuelles rétinotopiquement organisées, y compris l'aire V1. Il émet l'hypothèse que la génération d'une image mentale requiert une activation de V1 et du cortex avoisinant, consécutive à un flux rétrograde d'information (top-down) provenant des aires visuelles associatives occipito-pariétales et occipito-temporales. L'aire visuelle primaire serait le support neural de la mémoire tampon visuelle (« buffer visuel »), entité cognitive commune à la perception et à l'imagerie mentale. D'autres travaux mettent en avant l'idée que les aires visuelles de bas niveau et celles de plus haut niveau sont réciproquement connectées (Montero, 1991 ; Murphy, Duckett & Sillito, 1999). Le flux bidirectionnel (ascendant : forward, et descendant : backward) de l'information est rendu

possible, en partie, par les connexions cortico-corticales directes entre les aires visuelles de bas et haut niveau (Douglas & Rockland, 1992). L'implication de V1 dans l'imagerie mentale a été également démontrée dans l'étude de Le Bihan, Turner, Zeffiro, Cuenod, Jezard & Bonnerod (1993) sur le rappel mental d'une configuration simple, ou encore celle de Kosslyn, Thompson & Alpert (1995), qui révèle que l'image mentale respecte l'organisation rétinotopique du cortex visuel primaire. En effet, lorsque l'image présentée aux sujets est de petite taille, la partie la plus postérieure du cortex strié est activée (correspondant au champ visuel central), lorsqu'elle est de grande taille, le pic d'activation se déplace dans la partie antérieure du cortex strié, ce phénomène témoignant d'une sollicitation de la périphérie du champ visuel mental. Plus récemment, sur la base de deux techniques d'imagerie cérébrale (TEP et SMTr : stimulation magnétique transcranienne régionale), Kosslyn, Pascual-Leone, Felician, Camposano, Keenan, Thompson, Ganis, Sukel & Alpert (1999) agrémentent ces données en montrant qu'une inactivation transitoire de la région visuelle primaire et du cortex avoisinant conduit à une dégradation des performances en imagerie mentale comme en perception visuelle, suggérant que l'aire V1 serait indispensable à l'imagerie mentale.

Cependant, Mellet (2002) contrecarre ces résultats car « d'autres auteurs [...] ont trouvé, en TEP et en IRMf, que les structures cérébrales communes à la perception visuelle et à l'imagerie mentale se limitent aux régions occipito-pariétales et occipito-temporales et qu'aucune rétroactivation des aires associatives vers les aires primaires n'est nécessaire » (p.425). Le travail de Per Roland et al. (1987, cité par Mellet, 2002), mettant en œuvre un paradigme d'exploration mentale d'un itinéraire, signalait qu'aucune activation de l'aire visuelle primaire n'était observée. En utilisant la TEP chez des sujets normaux devant générer des images mentales de formes complexes, Roland et Gulyas (1994) concluent que les aires 17 et 18, correspondant, respectivement, au cortex visuel primaire (V1) et à l'aire V2, sont impliquées uniquement dans la perception, mais pas dans l'imagerie visuelle. De plus, chez des sujets rappelant des scènes visuelles se rapportant à des environnements familiers, ces auteurs n'ont guère observé de variations du flux sanguin cortical (technique du FSCr) en V1 et près des aires visuelles associatives. En 1995, ces mêmes auteurs ont montré que l'imagerie visuelle mobilisée dans la formation de patterns de grande taille, complexes et/ou colorés, n'active pas les aires du lobe occipital, ni V1, ni les aires extrastriées V2, V3 ou V4 censées intervenir dans ces traitements (Clarke & Miklossi, 1990 ; Zilles & Schleider, 1993). Ces résultats vont à l'encontre de l'hypothèse d'activations descendantes (backward) des aires visuelles associatives précoces et de V1 générées par l'imagerie visuelle de patterns complexes. Plus récemment, Kosslyn, Thompson & Alport (1997), ont procédé à une comparaison directe entre l'imagerie visuelle et la perception, chez des sujets sains, en utilisant la TEP durant des tâches de perception et d'imagerie. Dans la tâche perceptive, les sujets devaient juger si des noms étaient appropriés en référence à des objets présentés sous une perspective canonique (les objets étaient alors facilement reconnaissables) ou non canonique (objets non immédiatement reconnaissables). Dans la condition d'imagerie, les sujets visualisaient une grille dont l'une des cases était marquée d'une croix. Puis une lettre apparaissait dans l'une des cases. Les sujets devaient juger si la lettre-stimulus et la croix occupaient ou non la même case. Les résultats montraient que si les deux tiers des aires activées l'étaient à la fois pour la perception et l'imagerie, un certain nombre d'aires corticales étaient néanmoins activées en imagerie mais pas en perception, et vice versa, témoignant d'un substrat neural différent (non exactement similaire, ou non parfaitement commun) pour ces deux types d'activité. Des études conduites auprès de patients atteints de cécité corticale démontrent également que l'intervention du cortex visuel primaire n'est pas un prérequis dans l'activité d'imagerie

(Chatterjee & Southwood, 1995 ; Dalman, Verhagen & Huygen, P.L.M., 1997 ; Goldenburg, Müllbacher & Nowak, 1995).

Mellet (2002) dresse un bilan général, et note qu' « en fait, à l'heure actuelle, la moitié des travaux de neuroimagerie décrit une activation de V1, alors que l'autre moitié n'en rapporte pas » (p. 425). Pour tenter de comprendre les modalités d'intervention de l'aire V1 dans l'activité d'imagerie, Mellet (2002) formule l'hypothèse selon laquelle « la nature des régions mobilisées dépendrait des opérations effectuées sur les images mentales. On peut suggérer, par exemple, qu'une tâche d'inspection mentale, pour laquelle prévaut la fidélité au percept, favorise le recrutement de V1. Au contraire, une activité d'imagerie dynamique exigeant des transformations importantes de l'image, et donc une forme d'altération du percept initial, ne nécessiterait pas de rétroactivation de V1 » (p. 426-427). Cette hypothèse est partagée par Kaski (2002), qui relève que les déficits ou troubles relatifs à l'imagerie visuelle ne peuvent être imputés ou associés aux dommages occasionnés sur les aires intervenant dans la perception visuelle, mais trouvent également leur origine dans d'autres régions cérébrales, localisées dans le lobe occipital, temporal et/ou pariétal. L'activité d'imagerie visuelle semble engager une pluralité de mécanismes en interaction, tels que des processus de raisonnement et de mémoire (Damasio & Damasio, 1990 ; Roland & Gulyas, 1995). En outre, des travaux ont mis en évidence l'existence d'interactions neurales entre l'imagerie et la perception visuelles, en montrant que l'imagerie visuelle peut perturber (effet d'interférence, ou d'inhibition) ou améliorer (effet facilitateur) les performances dans différentes tâches concourantes de détection visuelle (Craver-Lemley & Reeves, 1987, 1992; Craver-Lemley, Reeves & Arterberry, 1997 ; Farah, 1985), suggérant des mécanismes communs à l'imagerie et à la perception visuelles (Ishai & Sagi, 1995).

1.2. Perception haptique et imagerie visuelle

Les principaux modèles d'imagerie mentale ont été développés en référence à la perception visuelle, sans prendre en compte les cas où l'entrée (input) sensorielle provient d'une autre modalité perceptive, notamment de la modalité haptique, qui se distingue fortement de la vision dans le domaine spatial (cf. chapitre 3). Aussi, l'application des modèles de reconnaissance visuelle d'objets tels que celui de Bideaud (1987) à la reconnaissance haptique s'avère problématique, car « le système haptique est peu performant dans l'extraction de l'information spatiale sur les arêtes » (Klatzky & Lederman, 2000, p. 111). Mais alors, comment s'opère l'activité d'imagerie, chez le sujet voyant, lorsque l'entrée sensorielle est haptique ?

A notre connaissance, seul le modèle de Klatzky et Lederman (1987) intègre l'émergence des représentations mentales en distinguant clairement la modalité sensorielle, visuelle ou haptique, sollicitée dans l'exploration du percept. Ce modèle repose sur l'hypothèse d'un traitement de l'information spatiale haptique par médiation visuelle (cf. figure 8). Par le biais d'un traducteur visuel, l'information tactile perçue est convertie en image mentale visuelle. Ce modèle est en accord avec l'idée selon laquelle les images visuelles peuvent être, même chez les sujets voyants, des représentations basées sur les informations collectées à travers différentes modalités sensorielles et que, par conséquent, une image visuelle peut être générée uniquement en touchant un objet (De Beni & Cornoldi, 1988).

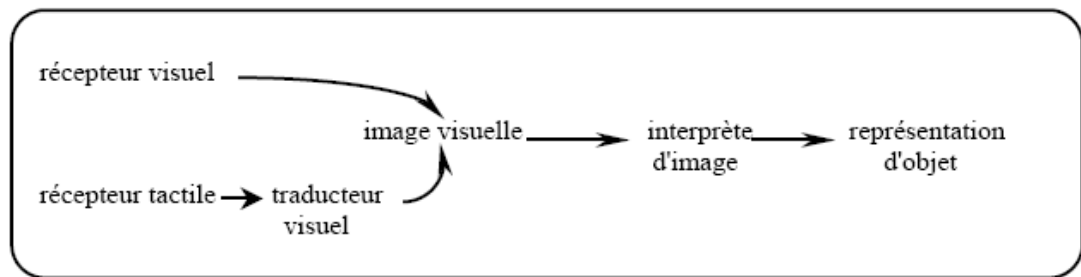


Figure 8 : Modèle par médiation d'images (d'après Klatzky & Lederman, 1987).

Le recours à une représentation visuelle dans le traitement d'un stimulus exploré haptiquement serait une stratégie pertinente pour l'analyse de propriétés spatiales (géométriques), telles que le traitement des contours d'un objet (dessin) bi-dimensionnel permettant d'identifier sa taille et sa forme. Pour l'extraction des caractéristiques matérielles d'un stimulus, comme sa texture ou sa rigidité, Klatzky et Lederman (1993) suggèrent un second modèle, sans médiateur visuel, dans lequel l'extraction des propriétés est directe (modèle d'appréhension haptique directe). Ainsi, chez le sujet voyant, le traitement d'informations spatiales s'appuierait sur l'émergence d'un même type de représentations, visuelles, en perceptions visuelles et haptique. L'existence d'un processus représentationnel commun (même format de stockage des informations) aux modalités visuelle et haptique pourrait expliquer, au moins en partie, les données issues de travaux établissant des rapprochements entre ces deux systèmes perceptifs dans le traitement d'informations de nature spatiale.

Jusqu'à présent (dans ce chapitre et le précédent), nous avons abordé la question du traitement des informations spatiales exclusivement chez les sujets voyants, qui disposent donc d'un système de référence spatiale visuelle parfaitement opérationnel. Mais qu'en est-il de l'activité d'imagerie chez des sujets présentant une déficience visuelle ? Le processus de médiation visuelle est-il opérant chez des sujets aveugles de naissance ? Quelles sont les conséquences entraînées par une expérience visuelle limitée, voire nulle, sur le traitement de l'information spatiale ? Les sujets voyants, moins exercés à la modalité haptique par rapport aux sujets aveugles, obtiennent-ils des performances plus faibles dans des tâches spatiales réalisées en exploration tactile manuelle (sous occlusion visuelle) ? C'est à ces questions auxquelles nous allons tenter de répondre à présent.

2. L'incidence du statut visuel dans l'émergence des représentations visuelles

La question fondamentale de savoir s'il existe une relation directe entre imagerie et perception visuelles remonte à plusieurs siècles. Dans la revue de questions de Kaski (2002) à propos des liens entre perception et imagerie visuelles, celui-ci rapporte la situation imaginée par Molyneux à la fin du 17^{ème} siècle concernant ce problème. Ce dernier évoque le cas fictif d'un aveugle recouvrant l'usage de la vue, capable de nommer correctement un globe et un cube lorsqu'on lui présente ces objets (Morgan, 1977, cité par Kaski, 2002). Molyneux pose ainsi la question de savoir si les perceptions tactiles peuvent être « transférées » en représentations mentales, visuelles. Afin de déterminer si l'expérience visuelle est un prérequis pour la formation d'images mentales, de nombreuses études ont focalisé leurs analyses sur l'imagerie visuelle chez des populations de sujets présentant

une déficience visuelle, notamment des aveugles congénitaux. Si l'imagerie visuelle se fonde sur l'expérience visuelle, on peut s'attendre à ce que les individus atteints d'une cécité de naissance qui, par conséquent, n'ont pas d'expériences visuelles antérieures, fassent preuve d'une incapacité à générer des images visuelles, ce qui serait susceptible de rendre plus difficile le traitement d'informations spatiales (dans la mesure où, nous l'avons vu, l'analyse spatiale semble mettre en jeu l'activité d'imagerie visuelle). Les travaux visant à tester cette hypothèse sont de deux ordres. La plupart d'entre eux portent sur des mesures comportementales, et d'autres utilisent des techniques d'imagerie afin de déterminer les bases neurales et fonctionnelles du traitement d'informations visuo-spatiales chez des populations de sujets s'opposant par leur expérience ou leur statut visuel.

De nombreuses recherches se sont attachées à comparer, dans des tâches réalisées en modalité haptique requérant l'analyse de propriétés visuelles et/ou spatiales, les modes de traitement de l'information ou/et les performances de sujets voyants aveuglés et aveugles (pour cette seconde population, l'expérience visuelle était prise en compte ; une distinction était en effet considérée entre d'une part, les aveugles congénitaux ou précoces, et d'autre part les aveugles tardifs). Les études conduites à ce sujet rendent compte à la fois de similitudes et de différences, plus ou moins marquées, entre les différentes populations testées.

2.1. Les similitudes liées à l'imagerie mentale et au traitement des informations visuo-spatiales chez les sujets voyants et aveugles

Des travaux ont mis en évidence des ressemblances ou des points communs entre différentes populations de sujets se distinguant par leur statut visuel, relativement au traitement de propriétés visuelles ou/et spatiales.

En observant les dessins de sujets aveugles précoces et en analysant les performances de sujets aveugles congénitaux et voyants (groupe contrôle) dans des épreuves impliquant le traitement de propriétés spatiales telles que l'extraction des contours d'objets simples, l'appréhension de la perspective, la localisation spatiale ou la perception du mouvement, Kennedy (1997) aboutit à la conclusion que « pour dessiner, les aveugles utilisent les mêmes conventions que ceux qui voient ». Il ajoute que « l'analyse des dessins exécutés par les aveugles révèle que le cerveau traite de la même façon des informations provenant de la vue et du toucher » (p. 76). En effet, considérant l'exemple de la perception des contours, Kennedy (1997) explique que « notre système visuel et notre système tactile ne lisent pas les deux contours d'un trait épais comme un seul trait. La région du cerveau responsable de l'interprétation des contours à partir des informations sensorielles est donc un système général de perception des surfaces. La discrimination qu'elle assure ne repose pas sur des critères purement visuels, tels la brillance ou la couleur, mais prend en compte les deux bords d'un trait épais et les traite comme des indicateurs de la position d'un seul bord d'une surface. Si, pour des personnes voyantes, ce sont des frontières de brillance qui sont traitées comme des indicateurs de limite de surfaces, pour les aveugles ce sont les frontières de pression qui sont traitées de la même façon. Les principes qui sont ici en jeu ne sont pas seulement visuels : la région du cerveau qui les accomplit pourrait donc être qualifiée d'amodale. Un tel système amodal reçoit à la fois des informations visuelles et tactile et les considère comme des informations relatives à des caractéristiques telles que recouvrement, avant-plan, arrière-plan, surfaces planes ou courbes, et points de perspective » (pp. 80-81). Aussi, grâce à ce système amodal, le traitement des limites des surfaces peut s'opérer sur la base de signaux visuels et/ou tactiles. Ce même auteur a montré que les aveugles congénitaux complets sont capables d'identifier des dessins en

relief (stimuli bidimensionnels) représentant des objets communs ou familiers, et de rendre reconnaissables ce même type de dessins (Kennedy, 1993 ; Kennedy & Markas, 2000). Dans l'étude conduite par Heller, Brackett et Scroggs (2002) auprès d'adultes voyants (aveuglés), aveugles précoces (cécité congénitale ou survenue avant l'âge de un an), aveugles tardifs (cécité survenue après l'âge de un an) et déficients visuels présentant une vision résiduelle (low-vision subjects), les sujets percevaient également haptiquement des dessins bi-dimensionnels représentant des objets réels (concrets). Il leur était demandé d'indiquer, à quinze reprises, parmi un ensemble de quatre dessins d'objets d'une même catégorie (instruments de musique, parties du corps humain, animaux, outils de charpentier ou vêtements), celui correspondant au nom énoncé initialement par l'expérimentateur. Les analyses réalisées sur le nombre de réponses correctes et les temps de réponse n'ont permis de dégager aucune différence significative dans les performances entre les différents groupes de sujets, soulignant là encore l'idée que l'expérience (ou l'imagerie) visuelle n'est pas un pré-requis au traitement haptique d'images d'objets familiers. De la même façon, D'Angiulli, Kennedy et Heller (1998) ont mis en évidence qu'à la fois les enfants voyants et aveugles sont en mesure d'identifier (en les nommant) des dessins en relief, et que les dessins les plus souvent identifiés par une de ces populations sont également ceux identifiés le plus fréquemment par l'autre population. De plus, lorsqu'il est demandé aux mêmes sujets d'identifier une seconde fois les stimuli explorés lors d'une première session s'étant déroulée quelques minutes plus tôt (reconnaissance de mémoire), tout comme les sujets voyants, les sujets aveugles changent les réponses erronées qu'ils avaient pu donner au cours de la première session, et conservent les réponses correctes. Récemment, Heller, Brackett, Scroggs, Steffen, Heatherly et Salik (2002) ont conduit une étude portant sur l'appréhension de la perspective dans des images tactiles (dessins géométriques bi-dimensionnels) selon le statut visuel du sujet. Leur travail portait sur des populations de sujets voyants, aveugles congénitaux, aveugles tardifs et de sujets présentant une faible acuité visuelle). Leurs résultats ont confirmé l'idée que l'expérience visuelle n'est pas nécessaire pour appréhender la perspective dans des dessins. Dans une recherche menée auprès de populations similaires, Heller, Brackett, Wilson, Yoneyama, Boyer et Steffen (2002) ont montré que l'illusion haptique de Müller-Lyer ne dépend pas de l'imagerie visuelle ou de l'expérience visuelle. Une conclusion similaire a été suggérée par Heller, Brackett, Scroggs, Allen et Green (2001) à propos de la perception de l'horizontale. Tout comme les sujets voyants, les sujets aveugles témoignent d'une capacité à juger de l'orientation horizontale d'un liquide dans un récipient quelle que soit l'inclinaison de ce dernier (principe de conservation de l'horizontale), même s'il s'avère que l'aspect configurationnel du récipient (récipient de forme ronde ou rectangulaire) détermine en partie ce jugement (plus grande difficulté à conserver l'horizontale lorsque le récipient contenant le liquide est rectangulaire que lorsqu'il est rond, les sujets étant sensibles aux indices environnementaux qui, dans le cas du récipient rectangulaire, constituent un cadre de référence externe prégnant qui rend plus difficile l'appréhension de l'horizontale lorsque le récipient est incliné). D'autres auteurs ont établi un parallèle dans les patterns de performances relevés chez des populations de sujets dont le statut visuel variait. Ainsi, Zimler et Keenan (1983) ont comparé des adultes voyants et aveugles congénitaux, ainsi que des enfants, dans des tâches présumées impliquer le stockage en mémoire d'une image visuelle. Selon ces auteurs, l'acquisition des connaissances relatives au monde visuel passerait par des processus différents selon le statut visuel. Alors que les sujets voyants ont recours à l'imagerie visuelle pour se représenter mentalement des objets réels, les sujets aveugles auraient recours à des images mentales issues d'autres modalités ou utiliseraient des représentations sémantiques. Afin de tester cette hypothèse, Zimler et Keenan (1983) ont conduit une série de trois expériences. La première d'entre elles consistait en une tâche d'association de mots

présentés par paire, consistant à rappeler le deuxième item (cible) correspondant à chacun des mots indices proposés, afin de recomposer les différents couples de mots. Les auteurs ont relevé que le rappel était meilleur pour les paires de mots évoquant des images visuelles par rapport aux autres couples de mots, moins suggestifs visuellement, ceci aussi bien chez les aveugles que chez les voyants. La deuxième expérience était une tâche de rappel libre de mots appariés selon leurs attributs perceptifs (propriété auditive : évocation d'un son, ou propriété visuelle : évocation d'une couleur). Les résultats ont révélé que si les performances des sujets aveugles étaient inférieures à celles pour les mots appariés sur l'aspect sonore, elles étaient proches de celles des sujets voyants pour les mots groupés par couleur. Le fait que les aveugles obtiennent des performances comparables à celles des voyants à des tâches impliquant le traitement d'informations visuelles et spatiales suggère que l'imagerie visuelle utilisée par les voyants n'est pas plus efficace que les représentations sémantiques auxquelles ont recours les aveugles, ou que l'imagerie visuelle n'est pas nécessaire pour ces tâches. Dans une troisième expérience, Zimler et Keenan (1983) ont soumis aux mêmes sujets une tâche d'imagerie visuelle, consistant à imaginer des scènes et à classer ensuite des objets-cibles selon qu'ils sont visibles ou non visibles parce que cachés par un autre objet. Si le phénomène d'occlusion est bien perçu par le système visuel (De Wit & Van Lier, 2002 ; Rubin, 2001 ; Van Lier, 1999 ; Van Lier & Wagemans, 1999), il l'est également en perception haptique. En effet, comme les voyants, les aveugles rappelaient davantage les objets visibles que les cibles qui ne l'étaient pas, témoignant d'une préservation du phénomène d'occlusion, quelle que soit la nature perceptive, visuelle ou haptique, des images mentales. Cornoldi, Cortesi et Preti (1991) et Cornoldi, Bertuccelli, Rocchi et Sbrana (1993) ont également étudié les capacités d'imagerie visuo-spatiales de sujets aveugles congénitaux, en leur demandant de suivre un parcours imaginaire. Les sujets devaient écouter les instructions verbales données par l'expérimentateur, qui énonçait les déplacements à effectuer mentalement à partir d'un point initial à retenir, sur une matrice (grille) plus ou moins complexe (de taille variable), comportant deux ou trois dimensions. Les résultats ont montré que les sujets aveugles, comme ceux du groupe contrôle (sujets voyants), ont recours à des stratégies visuo-spatiales spécifiques, même s'ils ont de plus grandes difficultés que les sujets voyants pour les matrices tridimensionnelles. Des résultats similaires ont été également observés dans l'apprentissage d'environnements réels. Dans la recherche de Golledge, Jacobson, Kitchin et Blades (2000), des adultes voyants aveuglés, aveugles complets et disposant d'une très faible vision apprenaient un itinéraire nouveau. Les participants effectuaient individuellement une première fois le trajet guidés par l'expérimentateur, puis le parcouraient par eux-mêmes (toujours accompagnés de l'expérimentateur qui les observait) à trois reprises successives. Pour chaque essai, la connaissance du parcours appris était évaluée en demandant aux sujets de pointer les différents repères jalonnant l'itinéraire lors de leurs déplacements, de décrire verbalement ce dernier et d'en construire un « modèle » (plan) en utilisant des pièces magnétiques qu'ils positionnaient sur un tableau métallique. Les résultats ont révélé qu'au bout du troisième essai, les performances des différents groupes étaient équivalentes, quelle que soit la tâche (pointage, description verbale ou modélisation). Aussi, tout comme les sujets voyants, les sujets aveugles précoces et ceux disposant d'une faible vision sont en mesure d'apprendre rapidement et efficacement un environnement nouveau, les sujets déficients visuels n'ayant besoin que d'un ou deux essais supplémentaires pour rappeler le parcours aussi précisément que les sujets voyants. Passini et Proulx (1988), Ochaita et Huertas (1993), puis Espinosa, Ungar, Ochaita, Blades et Spencer (1998) avaient abouti à cette même conclusion dans leurs études respectives. De plus, Blades, Lippa, Golledge, Jacobson et Kitchin (2002) ont en outre voulu savoir si les tâches de pointage, de description verbale et de modélisation étaient susceptibles de faciliter l'apprentissage

d'un parcours dans un environnement réel non familier, et si ces tâches apportaient une aide de même importance selon la sévérité des troubles visuels. Après avoir constitué deux groupes de sujets adultes en fonction de leurs déficits visuels sur la base d'un questionnaire (un groupe de sujets ayant des troubles visuels sévères les rendant incapables de percevoir le moindre élément dans un environnement et un groupe de sujets avec des troubles visuels modérés leur permettant de percevoir en présence de lumière certains éléments environnants), les auteurs ont répliqué la procédure de l'expérience conduite par Jacobson et al. (2000). Chacun des participants aveuglés effectuait le parcours guidé d'un itinéraire en suivant les instructions verbales de l'accompagnateur relatives aux directions à emprunter aux intersections et aux différents repères jalonnant l'itinéraire (phase d'apprentissage), puis devaient par eux-mêmes parcourir ce même trajet à trois reprises. Pour chacun des essais, l'expérimentateur relevait le temps mis par chacun des participants pour effectuer le trajet ainsi que le nombre d'erreurs (déviations) commises quant aux choix directionnels (décisions d'aller soit tout droit, soit de tourner à droite ou à gauche aux intersections, ou encore de s'arrêter devant chacun des points de repères appris). Concernant les tâches réalisées lors du parcours, quatre conditions expérimentales étaient testées. Dans la condition contrôle, les sujets devaient uniquement parcourir le trajet appris, en nommant chacun des repères rencontrés. Dans la condition de verbalisation, les sujets devaient également donner une description verbale du parcours aussi détaillée que possible à l'issue de chacun des essais. Dans la condition de modélisation, ils devaient, à la fin de chaque essai, produire une carte (plan) de l'itinéraire au moyen de pièces magnétiques symbolisant les différents repères et portions du trajet qu'ils fixaient à un tableau métallique. Enfin, dans la condition de pointage, les participants devaient montrer du doigt, à chacun des cinq repères du parcours (départ, trois repères intermédiaires et arrivée) sur lesquels ils se trouvaient, les quatre autres points de repère (soit au total vingt repères désignés pour chacun des trois essais). Les résultats ont montré qu'aussi bien pour le nombre d'erreurs (déviations) commises durant l'itinéraire que pour le temps nécessaire à parcourir le trajet, les performances s'amélioraient au fil des essais. De plus, les performances des sujets avec un déficit visuel modéré se sont avérées supérieures à celles des sujets avec un trouble visuel sévère. Cependant, les auteurs précisent que cette différence était particulièrement faible et que les scores obtenus par l'ensemble des groupes étaient élevés, confortant l'idée que les sujets déficients visuels sont en mesure d'apprendre un itinéraire complexe dans un environnement inconnu après y avoir été exposé de manière relativement peu importante. En outre, bien que l'effet de la tâche ne se soit pas révélé significatif, les auteurs faisaient remarquer qu'en considérant uniquement les différents points du parcours requérant un choix directionnel aux intersections (aller tout droit, à gauche ou à droite, ou s'arrêter devant un repère) pour lesquels les sujets commettaient un nombre important d'erreurs lors du premier essai (les points nécessitant un choix directionnel pour lesquels avaient été relevées peu ou pas d'erreurs dès le premier essai ayant pu masquer l'effet de la tâche sur l'apprentissage de l'itinéraire), les performances du groupe contrôle et celles du groupe de sujets ayant produit un plan du parcours après chacun des essais étaient similaires pour le premier essai, mais dès le deuxième essai, les sujets de la condition de modélisation étaient plus performants que les sujets du groupe contrôle, cette différence de performance inter-groupes devenant moindre lors du troisième essai, en raison de l'effet de répétition du parcours. Ce résultat a conduit Blades et al. (2002) à conclure que la modélisation du parcours était susceptible de favoriser son apprentissage.

Par ailleurs, d'autres études reposant sur la présentation tactile manuelle d'une tâche dans laquelle le sujet doit engendrer une représentation ayant la propriété des images mentales visuo-spatiales, ont démontré que les aveugles et les voyants possèdent une

capacité égale de se représenter les objets à travers la perception tactile, laissant supposer chez les sujets privés de vision et d'expérience visuelle une capacité à générer et à utiliser les images mentales (Carreiras & Codina, 1992 ; Kerr, 1983 ; Klatzky, Golledge, Loomis, Cicinelli & Pellegrino, 1995). A cet égard, la récente étude neuropsychologique conduite en TEP par Vanlierde, De Volder, Wanet-Defalque et Veraart (2003) a permis de vérifier au niveau du substrat biologique les données comportementales suggérant la capacité d'imagerie visuo-spatiale en dépit de toute faculté de perception visuelle, en montrant à la fois chez des adultes voyants et aveugles précoces une activation des aires occipito-pariétales de la voie dorsale dans le traitement d'informations visuo-spatiales.

2.2. Les différences relatives à l'imagerie mentale et au traitement des informations visuo-spatiales chez des sujets voyants et aveugles

A l'inverse des études rapportées précédemment, des recherches ont montré des divergences, plus ou moins importantes, entre les sujets voyants et ceux présentant une cécité (précoce ou tardive) ou une déficience visuelle, soulignant le rôle de l'expérience visuelle dans le traitement d'informations spatiales. Heller et Joyner (1993) ont ainsi noté des différences entre des sujets voyants aveuglés et des aveugles congénitaux et tardifs relativement à l'illusion haptique de la verticale-horizontale. De plus, Heller et Kennedy (1990) ont montré que des sujets aveugles précoces mettent deux fois plus de temps que des sujets voyants aveuglés et aveugles tardifs pour appréhender la perspective. Cette différence est attribuée à l'utilisation d'un cadre de référence différent chez les différents groupes de sujets testés. Pour traiter les relations spatiales, tout comme les jeunes enfants voyants (Acredolo, 1985, 1990), les sujets aveugles précoces (Millar, 1994) privilégieraient le recours à un codage égocentré (centré sur le corps), alors que les voyants aveuglés et les aveugles tardifs utiliseraient plus massivement un cadre de référence spatiale de type exocentré, permettant la localisation des objets les uns par rapport aux autres. Millar (1981) a mis en évidence la dominance du codage égocentré chez des enfants aveugles au cours d'une tâche spatiale requérant un déplacement du sujet. L'inconvénient lié à l'usage d'un tel cadre de référence pour encoder les relations spatiales est le risque accru de surcharge mnésique, car le sujet est alors contraint de réactualiser en permanence sa position dans l'espace par rapport aux éléments environnants, ce qui mobilise d'importantes ressources attentionnelles (De Beni & Cornoldi, 1988 ; Gaunet & Thinus-Blanc, 1995 ; Vecchi, 1998). La recherche de Ungar, Blades et Spencer (1995) indique toutefois que, dans une tâche de localisation spatiale (rotation mentale), ce n'est pas tant le statut visuel qui détermine la performance que les stratégies mises en œuvre par les sujets.

Dans une étude centrée sur les propriétés visuelles de l'activité d'imagerie, Arditi, Holtzman et Kosslyn (1988) ont invité des sujets aveugles à générer une image mentale et à juger des angles visuels selon la distance à laquelle se situait l'objet représenté. Leurs résultats témoignent de l'absence du concept de perspective chez ces sujets, et reflètent le caractère non visuel des images mentales existant chez les sujets aveugles. Ces données ont été confirmées par Heller, Calcaterra, Tyler et Burson (1996), qui ont aussi montré, à travers une tâche de dessin d'un panneau rectangulaire inclinable vu sous différents angles, que les aveugles précoces, contrairement aux aveugles tardifs et aux voyants, ne semblent pas utiliser les lois de la perspective. Heller, Kennedy et Joyner (1995) ont trouvé que les performances d'aveugles précoces sont considérablement réduites par rapport à celles d'aveugles tardifs et de voyants travaillant sans voir dans une tâche où il faut indiquer à quelle place doit se tenir un observateur pour avoir un certain point de vue sur une maison dessinée (vue de haut, de trois quarts ou de côté).

Par ailleurs, l'émergence et l'évolution des techniques d'imagerie ces dernières décennies (TEP et IRMf en particulier) a permis la conduite de travaux destinés à montrer l'influence du statut visuel sur l'activité cérébrale lors de tâches spatiales tactiles. De Volder, Bol, Blin, Robert, Arno, Grandin, Michel et Veraart (1997) ont examiné les répercussions de la cécité précoce et tardive sur l'organisation corticale des aires visuelles primaire et secondaire. Ils ont comparé les activités cérébrales de trois populations : des aveugles précoces (cécité congénitale ou survenue avant l'âge de 3 ans), des aveugles tardifs (cécité survenue à l'âge adulte à la suite de lésions des voies visuelles périphériques) et des voyants. Ils ont mesuré avec la TEP le métabolisme cérébral au repos ou dans des tâches tactiles d'exploration d'objets avec la main droite ou de reconnaissance de patterns tridimensionnels à l'aide de l'Optacon (dispositif permettant de convertir les stimulations lumineuses en stimulations tactiles). Les résultats indiquent des différences dans le métabolisme des aires visuelles primaire et secondaire des trois populations, alors que l'activité corticale des autres aires est similaire dans les différents groupes. L'activité métabolique des aires visuelles primaires et secondaires des aveugles tardifs est moindre par rapport à celle de voyants ayant les yeux fermés. En revanche, elle est plus importante chez les aveugles précoces que chez les voyants ou les aveugles tardifs. Cet hypermétabolisme des aires visuelles observé chez les aveugles précoces est présent aussi bien en situation de repos qu'au cours de la réalisation des tâches tactiles. Est-ce à dire pour autant que les sujets aveugles précoces disposent de représentations visuelles pour traiter des informations spatiales? Sadato, Pascual-Leone, Grafman, Ibanez, Deiber, Dold et Hallet (1996) ont interprété cet hypermétabolisme comme le fait que les aires visuelles peuvent avoir une fonction non visuelle dans certaines populations. En effet, en soumettant des tâches de discrimination haptique de propriétés spatiales (angles, largeur) à des sujets aveugles précoces et voyants (sous occlusion visuelle momentanée), ces auteurs ont constaté, par le biais de la TEP, que les aires visuelles n'interviennent pas nécessairement pour traiter haptiquement des informations spatiales, puisque ces aires sont activées uniquement chez les aveugles précoces, mais pas chez les voyants. Büchel, Price, Frackowiak et Friston (1998) ont également relevé une incidence du statut visuel sur l'organisation fonctionnelle du cortex visuel. En comparant, au moyen de la TEP, les patterns d'activation du cortex visuel chez des sujets aveugles congénitaux et aveugles tardifs au cours d'une lecture en braille, ils ont remarqué une activation du cortex visuel primaire uniquement chez les sujets aveugles après la puberté. Chez les sujets aveugles congénitaux, seule une activation des aires visuelles extrastriées et associatives pariétales apparaissait. Ces données confortent l'idée d'une association entre l'imagerie visuelle et l'activation du cortex visuel primaire (aire V1).

Ainsi, les travaux relatifs au traitement des informations visuelles et spatiales, à l'existence de représentations mentales et au format de stockage de ces dernières selon le statut visuel des sujets rapportent des résultats assez hétérogènes (qui divergent partiellement, ou substantiellement), qui ne permettent pas de démontrer de façon claire et univoque les mécanismes intervenant dans l'activité d'imagerie chez des populations de sujets se distinguant par leur expérience visuelle (comparaison, notamment, entre les aveugles congénitaux et les voyants). C'est ce qui a amené certains auteurs à considérer que l'activité d'imagerie n'est pas liée à une modalité sensorielle particulière, et que le traitement visuo-spatial n'est pas simplement déterminé ou conditionné par un format unique de stockage de l'information en mémoire. A propos des images mentales visuo-spatiales, Cornoldi et Vecchi (2000) soulignent que « la cécité précoce totale n'empêche nullement ce genre de représentations, mais [...] l'organisation des différentes sources d'information doit nécessairement être différente. On peut supposer que, chez l'aveugle, l'image mentale

se base sur une plus grande proportion d'informations d'origine tactile, et qu'elle donne plus de poids aux informations spatiales qui ne sont pas d'origine visuelle et sont moins utilisées par le voyant. Cela ne nous autorise toutefois pas à établir une différenciation radicale entre images visuelles, images spatiales liées à la vision et images spatiales liées à d'autres modalités sensorielles, car ces aspects sont intimement liés et interconnectés dans les images que nous élaborons et utilisons dans la vie de tous les jours. C'est la raison pour laquelle nous considérerons les images visuo-spatiales d'une façon unitaire » (pp. 175-176). Aussi, en dépit de l'existence de divergences quant à la question de la nature des représentations spatiales selon le statut visuel des sujets, il s'avère que, comme le soulignent Hatwell, Mellier et Lécuyer (2003), la vision n'est pas indispensable pour parvenir à une bonne représentation de l'espace.

Après nous être centrés sur les représentations visuelles dans le traitement des informations spatiales selon la modalité sensorielle (input perceptif) mobilisée et le statut visuel du sujet, nous allons à présent aborder la question du codage verbal des informations spatiales.

3. Codages imagé et verbal dans le stockage des informations visuo-spatiales

3.1. La théorie du « double codage » (Paivio, 1986)

Nous avons vu que la MDT permet de maintenir pour une courte durée du matériel figuratif (imagé) ou langagier. En effet, les traces mnésiques qui sont momentanément conservées dans cette unité de stockage résultent d'un codage de l'information traitée soit sous forme visuo-spatiale, faisant intervenir le calepin visuo-spatial, soit sous forme phonologique ou verbale (lexicale), par le biais de la boucle phonologique (Baddeley, 1986, 1992). Aussi, pour encoder une information visuelle ou langagière en MDT, le sujet dispose de deux voies : une voie imagée (visuo-spatiale), et une voie verbale. Ces deux types de MDT, visuelle et verbale, sont fonctionnellement différentes (Andrade, Kemps, Werniers, May & Szmalec, 2002). En recourant au paradigme de double tâche, Gyselinck, Cornoldi, Dubois, De-Beni et Ehrlich (2002) ont mis en évidence l'existence de deux sous-systèmes distincts au sein de la MDT, l'un dédié au traitement d'informations linguistiques, l'autre exploité dans le traitement d'informations imagées ou picturales. Dans une première expérience, ils ont montré comment la boucle phonologique pouvait intervenir dans la mémorisation à court terme d'informations scientifiques présentées dans un format uniquement textuel ou textuel et imagé (texte accompagné d'illustrations). Ils ont observé que lorsqu'une tâche concurrente de "tapping" (tâche de nature spatiale dans laquelle le sujet est invité à exécuter des mouvements dirigés vers des cibles, qu'il doit "frapper") devait être effectuée parallèlement au traitement des informations, l'effet bénéfique des illustrations en complément du texte disparaissait. De plus, les résultats d'une deuxième expérience, portant sur la comparaison entre les formats uniquement textuel (texte seul) et uniquement imagé (illustrations) ont montré qu'une tâche concurrente articulatoire (tâche dans laquelle la boucle phonologique est rendue inopérante, en demandant au sujet de répéter durant la phase d'encodage un mot ou un pseudo-mot) n'affectait que le traitement des informations présentées sous forme textuel. Ces données confortent l'idée de la présence, au sein de la MDT, d'un sous-système qui sous-tend l'encodage d'informations imagées (le calepin visuo-spatial) et d'un sous-système assurant le maintien d'informations de nature verbale ou linguistique (la boucle phonologique).

Toutefois, la nature du stimulus traité, visuo-spatiale ou verbale (linguistique), ne détermine pas le format de stockage de l'information en MDT. C'est notamment le cas de l'encodage d'informations verbales, pour lequel il n'existe pas de règle de correspondance parfaite ou systématique entre la nature langagière du stimulus traité et le format de stockage de l'information. En analysant les mécanismes en jeu dans la construction d'une image mentale visuelle d'un objet ou d'une scène à partir d'une description verbale, Paivio (1971, 1986) montre de quelle manière un changement de format sur le message délivré peut s'opérer. Il relate le processus de transformation d'une information de type symbolique, représentée par des mots, dont la structure ne contient pas les attributs figuratifs de l'objet désigné, à une information de type analogique dans laquelle l'image formée reproduit ces attributs et se situe dans un espace mental qui incorpore les contraintes de l'espace physique. Pour étudier l'interaction entre ces deux types de représentation, Paivio (1986) propose une épreuve de mémorisation de listes de mots, contenant des mots concrets et des mots abstraits. Il remarque que les mots concrets, dont l'écoute est propice à la génération, et les mots abstraits sont codés différemment par le système cognitif. Les mots abstraits ne bénéficient que d'un simple codage, sous forme verbale, alors que les mots concrets donnent lieu à un double codage, à la fois verbal et imagé (cf. figure 9). Ce double codage explique que l'écoute de mots concrets, s'appuyant sur une double représentation, conduit à une meilleure mémorisation que l'écoute de mots abstraits.

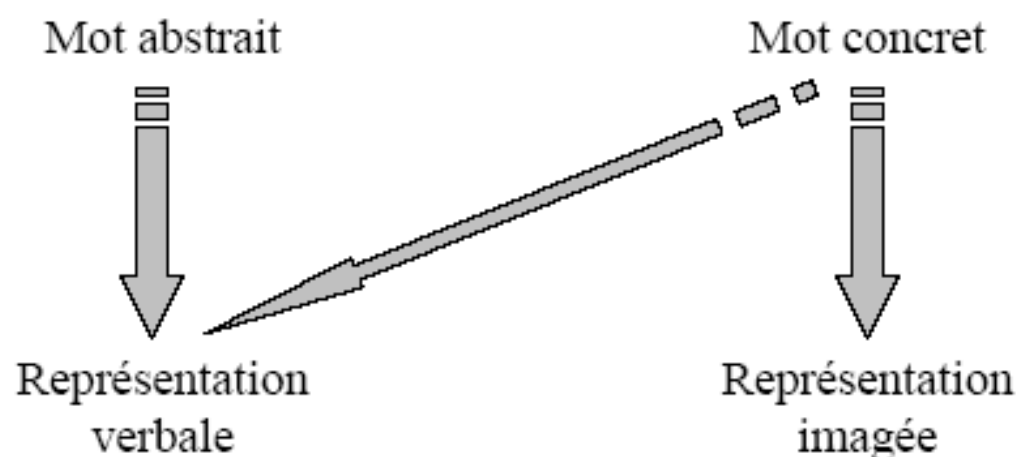


Figure 9 : La théorie du « double codage » (Paivio, 1986)

En outre, la traduction neurale de ce double codage a pu être examinée au moyen de techniques d'imagerie cérébrale, comme la TEP. Mellet et al. (1998, cités par Petit & Zago, 2002) ont montré que lorsqu'il est demandé à des sujets de créer l'image mentale d'un objet concret sur la base de sa définition énoncée oralement, on observe, d'une part, une implication des aires temporales et frontales du langage liée à l'activité de compréhension des définitions, et d'autre part, une activation de régions appartenant à la voie ventrale, alors même que les sujets avaient les yeux fermés et se trouvaient plongés dans le noir complet, interdisant toute entrée visuelle. L'image mentale alors produite provient de la réactivation d'une représentation stockée dans la MLT. Mais les auteurs signalent que l'on peut tout autant construire l'image mentale d'une configuration que l'on n'a jamais perçue visuellement.

3.2. Encodages imagé et verbal dans la mémorisation de propriétés visuo-spatiales

La question du format de stockage dans le traitement d'informations spatiales se pose également à travers la distinction entre les modes d'encodage verbal ou imagé. Dans ce qui suit, nous abordons le rôle de ces deux modes d'encodage, d'abord dans les situations de mémorisation d'informations langagières décrivant une configuration spatiale, puis dans la mémorisation de données spatiales imagées.

3.2.1. Rôle des représentations imagées dans le traitement d'informations langagières à caractère visuo-spatial

Certains auteurs se sont attachés à rendre compte des interactions de l'image et du langage dans la construction des représentations de configurations spatiales à partir de données textuelles, que ces dernières soient lues (input visuel) ou entendues (input auditif). Les travaux consacrés à cette question soutiennent l'hypothèse de l'existence de deux systèmes de représentation parallèles, l'un propositionnel réservé à l'encodage des informations langagières, l'autre analogique fournissant un « modèle mental » (Johnson-Laird, 1983) ou « modèle de situation » (Van Dijk & Kintsch, 1983) réunissant les données encodées (Denis & Cocude, 1989, 1992 ; Denis & Denhière, 1990 ; Denis & Zimmer, 1992). Aussi, comme le souligne Gallina (1998), « l'image mentale peut être considérée comme un mode privilégié de spécification des modèles mentaux lorsque ces derniers incluent des données figurables [comme] c'est particulièrement le cas des textes à configurations spatiales [...] qui ont pour caractéristique d'évoquer des objets liés entre eux par des relations de nature spatiale. [...] Le rôle de l'image dans l'élaboration d'un modèle de la configuration est supposé permettre, grâce aux propriétés spécifiques de cette forme de représentation, un degré élevé d'intégration et d'organisation interne » (p. 116). L'imagerie visuelle contribuerait donc à la construction d'une représentation mentale ou « carte cognitive » (Pêcheux, 1980, 1990) de la configuration spatiale décrite.

L'étude menée par Blanc et Tapiero (2000) auprès d'adultes à propos de l'effet du mode de présentation, textuel (description propositionnelle) ou plus « imagé » (mots isolés spatialement disposés), des informations relatives aux éléments d'une île et à leur localisation, témoigne de la plus grande efficacité et facilité d'intégration des données spatiales lorsque ces dernières sont encodées dans un format qui revêt une dimension imagée. Les résultats suggèrent que la représentation spatiale construite à partir de la perception visuelle de l'emplacement des éléments géographiques de l'île est plus précise (moins d'erreurs de jugement sur la position relative des éléments et temps de réponses correctes plus courts) et plus rapidement accessible (temps d'apprentissage de la configuration de l'île plus court) que le modèle spatial élaboré à partir du texte descriptif.

Gallina et Lautrey (2000) ont en outre abordé la question du rôle de l'image mentale dans la compréhension d'un texte à caractère spatial dans une perspective développementale. L'expérience était conduite auprès d'enfants entre 5 et 11 ans. Elle débutait par l'audition d'un texte (enregistré sur bande magnétique, et pouvant être écouté à plusieurs reprises en fonction des besoins du sujet) décrivant un parcours comportant des repères entre les différentes portions du trajet. Puis les enfants effectuaient une série d'épreuves verbales (rappel immédiat et vérification d'énoncés) et graphiques (rappel immédiat et choix de figures représentant des itinéraires) visant à évaluer leur capacité à mémoriser les informations données et leur aptitude à construire une représentation globale de l'ensemble des éléments et de leurs relations spatiales, c'est-à-dire d'élaborer

une carte cognitive de la configuration spatiale décrite. Les résultats obtenus ont montré que d'une part, les repères étaient mieux retenus que les trajets (ceci à tous les âges) et, d'autre part, que les représentations évoluaient au cours du développement. Avant 11 ans, les enfants construisent une représentation morcelée, traduisant une juxtaposition d'éléments plutôt qu'une vision coordonnée de la configuration spatiale. A 8 ans, certains enfants parviennent à reconstituer l'itinéraire pas à pas mais sans vision globale de l'ensemble. Par ailleurs, Gallina (1998) a également mis en évidence chez ces enfants que les représentations imagées ne jouaient pas un rôle similaire tout au long du développement. En soumettant trois épreuves d'imagerie visuelle (de génération, de maintien en MDT et d'inspection d'images mentales) en plus des épreuves mentionnées précédemment concernant l'intégration des informations visuo-spatiales issues de la description du parcours entendue par les enfants, il a montré qu'à 8/9 ans aucune capacité d'imagerie visuelle n'était corrélée à la compréhension du texte, alors que cette dernière était liée à la capacité de maintien des images en mémoire à 5/6 ans et à la capacité d'inspection des images à 11 ans. Ainsi, la contribution ou l'implication des différents processus d'imagerie visuelle dans l'intégration de données verbales à caractère spatial ne revêt pas la même importance (ou la même utilité) à différentes périodes au cours du développement.

3.2.2. Rôle des représentations verbales dans le traitement d'informations visuo-spatiales imagées

De nombreux travaux ont montré qu'un recodage verbal peut être utilisé pour encoder des informations spatiales. Ainsi, Fenner, Heathcote et Jerrams-Smith (2000) ont montré, à travers une tâche de rappel d'un parcours dans un environnement, que les performances des enfants de 5-6 ans étaient fortement liées à leurs capacités visuo-spatiales, alors que ce n'était pas le cas des enfants de 9-10 ans. Ces auteurs suggèrent qu'alors que les jeunes enfants n'ont pas la capacité de former des modèles mentaux de leur environnement dans un format propositionnel (verbal), l'utilisation de ce type de codage s'accroît avec l'âge. L'étude de Miles, Morgan, Milne et Morris (1996) va dans le même sens. Ces derniers ont montré que lorsqu'une tâche visuelle d'identification de patterns est couplée à une suppression articulatoire, les performances sont significativement diminuées chez des enfants de 7 ans et des adultes, mais pas chez les sujets plus jeunes, suggérant l'idée qu'une stratégie verbale pourrait favoriser le rappel de patterns visuels. D'autres recherches ont également suggéré que les enfants de plus de 7 ans auraient tendance, lorsque des images leur sont présentées, à opérer un recodage des informations spatiales sous une forme phonologique (Hitch, Halliday, Dodd & Littler, 1989; Hitch, Halliday, Schaafstal & Schraagen, 1988 ; Hitch, Woodin & Baker, 1989 ; Pickering, 2001) et que la suppression articulatoire peut affecter les performances à des tâches visuo-spatiales (Pelizzon, Brandimonte & Fravretto, 1999). Par ailleurs, Pickering et al. (2001) ont tenté d'expliquer pourquoi le rappel de stimuli dans des épreuves visuelles et spatiales était meilleur lors de la présentation statique que lors d'une présentation dynamique (expérience 1, décrite pp. 55-56), et pourquoi les enfants de 8 et 10 ans testés obtenaient des scores significativement plus élevés que les enfants de 5 ans. Ils ont émis l'hypothèse que les enfants de 8 et 10 ans procédaient à un recodage sous forme verbale ou phonologique de l'information visuo-spatiale, et que par ailleurs ce recodage s'opèrerait plus aisément pour des images statiques que pour des stimuli dynamiques, car la récupération en MLT de connaissances concernant la reconnaissance de patterns et leurs labels verbaux serait plus facilement appliquée à des images statiques. Pour tester cette hypothèse, ils constituent deux groupes d'enfants de 6 et 10 ans (seul le deuxième est censé avoir recours de façon régulière à une stratégie de recodage de l'information visuo-spatiale, auquel ils

soumettent une tâche visuelle de rappel de patterns (tâche des matrices), successivement dans deux versions, statique et dynamique. Chaque version est combinée à trois conditions : tâche seule, tâche avec suppression articulatoire (boucle phonologique inopérante, ou pour le moins fortement perturbée) et tâche avec "tapping" spatial (cette dernière condition permettant de contrôler l'effet de l'interférence occasionnée par la tâche secondaire venant perturber la tâche principale). La suppression articulatoire était générée en demandant au sujet de répéter le mot "table", régulièrement et sans interruption durant l'apparition des stimuli sur l'écran d'ordinateur. La tâche secondaire de "tapping" spatiale était réalisée au moyen d'un tableau carré en bois, sur lequel était disposée aux quatre coins une cheville. Afin que le niveau de difficulté soit équivalent pour chacun des groupes d'âge, les enfants de 6 ans devaient taper avec la main entre deux chevilles sur un plan horizontal, tandis que les enfants de 8 ans devaient taper chacune des quatre chevilles en suivant le sens des aiguilles d'une montre. Les résultats ont révélé un effet significatif de l'âge (les scores étaient significativement supérieurs chez les enfants les plus âgés) et du format de la tâche (scores plus élevés pour la version statique), ainsi qu'une interaction significative entre ces deux facteurs, montrant des variations inter-groupes plus importantes pour la tâche statique. Mais l'hypothèse formulée par les auteurs n'a pas été vérifiée. En effet, il n'a pu être établi que la suppression articulatoire durant l'encodage des stimuli avait un effet néfaste sur la performance à la tâche. Aussi, l'accroissement plus important des performances pour la version statique par rapport à la version dynamique de la tâche visuelle (tâche des matrices) n'apparaît pas dû au recours plus massif des enfants les plus âgés au recodage verbal, puisque le fait d'empêcher ce recodage verbal durant l'encodage des stimuli visuo-spatiaux n'entraîne pas une baisse significative des performances lors d'une présentation de la même tâche seule (sans tâche secondaire interférente venant perturber l'usage et le fonctionnement de la boucle phonologique). Mais les auteurs ont jugé ces résultats incertains. En effet, pour savoir si la suppression articulatoire et le "tapping" spatial ont une influence sur les performances à la tâche des matrices (tâche visuelle), il aurait été nécessaire de connaître les performances relatives à ces deux tâches secondaires, en les faisant passer également seules, afin de voir si la réalisation de la tâche visuelle conjointement à une tâche secondaire provoque ou non un déclin des performances dans cette dernière. C'est pourquoi ils proposent une expérience complémentaire, dans laquelle ils évaluent à nouveau les performances d'enfants de 6 et 10 ans dans les deux versions (statique et dynamique) de la tâche des matrices, chacune de ces versions étant passée seule ou combinée à l'une des deux tâches secondaires (suppression articulatoire et "tapping" spatial). Un enfant figurait donc non plus dans six, mais dans neuf conditions expérimentales. De plus, un groupe d'adultes était ajouté, afin de déterminer si les changements développementaux observés chez les enfants étaient généralisables aux adultes. Ce dernier groupe passait une épreuve supplémentaire par rapport aux enfants, elle aussi combinée ou non à l'une des deux tâches secondaires (soit au total douze conditions expérimentales). Il s'agissait d'une tâche de rappel verbal immédiat d'une liste de chiffres entendus ("digit recall"). Le niveau de complexité augmentait par l'ajout, tous les quatre essais, d'un item dans la liste. L'utilisation de cette tâche visait à s'assurer, d'une part, que la tâche de suppression articulatoire est responsable de la désactivation de la boucle phonologique, et d'autre part, que la tâche de tapping spatial n'engendre pas des diminutions dans les performances simplement parce que c'est une tâche plus difficile. Les résultats relatifs au rôle de la boucle phonologique dans la réalisation de la tâche visuelle ont montré une interaction significative entre le format de présentation de la tâche des matrices (statique vs dynamique) et l'âge des sujets, et l'examen des performances pour la version statique et pour la tâche de suppression articulatoire n'a pas révélé de baisse significative à la tâche visuelle lorsque la boucle phonologique est désactivée. Par

conséquent, le rôle du recodage verbal de l'information visuo-spatiale n'a pu être mis en évidence dans le cas de la réalisation de la tâche des matrices dans sa version statique. Ces résultats rejoignent ceux observés par De Ribeaupierre, Lecerf et Bailleux (2000), qui notent un changement développemental tardif dans les modes d'encodage utilisés dans des épreuves visuo-spatiales. Ces auteurs ont proposé une série de trois expériences, visant à déterminer, d'une part, la nature de l'encodage (visuo-spatial et/ou verbal) utilisé pour la mémorisation de propriétés visuo-spatiales (localisation et/ou couleur) et, d'autre part, si le type d'encodage donne lieu à des changements développementaux. La tâche utilisée consistait à rappeler les positions de jetons colorés placés sur une personnage (un clown en forme de cacahuète : M. Peanut). Les jetons étaient soit de même couleur (M. Cacahuète violet : Purple-P task), auquel cas le sujet devait mémoriser les positions des jetons, soit de couleur différente, le sujet devant alors mémoriser à la fois les positions et les couleurs des jetons. Dans la première expérience, des enfants de 6, 8 et 10 ans ont effectué chacune des deux tâches, conjointement à une tâche verbale (suppression articulatoire) ou spatiale. La tâche concourante articulatoire visait à supprimer l'usage de la boucle phonologique, en faisant répéter "bla-bla-bla" durant l'encodage. La tâche interférente spatiale consistait à dessiner, de façon répétée, sur une feuille placée sur le côté, avec l'index de la main dominante, un grand "8" en adoptant un mouvement gardant la même amplitude. Les performances aux tâches secondaires n'étaient pas enregistrées (l'expérimentateur veillait néanmoins à ce que le sujet effectue correctement ces tâches). Un groupe contrôle, réalisant la tâche principale seule, sans tâche concourante, était par ailleurs constitué. Le niveau de complexité de la tâche principale augmentait en ajoutant, à chaque nouvel essai, un jeton sur le personnage. Le temps d'exploration du personnage était proportionnel au nombre de jetons placés (trois secondes si trois items étaient présents, quatre secondes en présence de quatre jetons, etc...). Outre le fait que les performances dans chacune des épreuves de rappel de localisation spatiale (M. Peanut-Violet) et de rappel d'associations couleur-position (M. Peanut-Couleur) croissaient au cours du développement, les résultats ont montré que les trois groupes d'enfants recouraient massivement à un encodage de type spatial, la suppression articulatoire ne provoquant pas de baisse significative des performances à la tâche, contrairement à la présence de la tâche secondaire spatiale. Dans une deuxième expérience, De Ribeaupierre et al. (2000) soumettent les mêmes tâches à des sujets adultes, afin de voir si le recodage verbal des informations visuo-spatiales est une stratégie prégnante chez cette population. En outre, afin de tester l'hypothèse selon laquelle l'encodage des informations visuo-spatiales est favorisée lorsque les positions sont encodées en même temps (car le sujet dispose alors d'une image globale), les auteurs proposent deux versions pour chacune des deux tâches (M. Peanut-Violet et M. Peanut-Couleur). En plus de la présentation simultanée utilisée dans la première expérience, ils soumettent une présentation séquentielle (les jetons apparaissaient les uns après les autres). Les résultats ont montré que la suppression verbale durant l'encodage avait un effet néfaste sur les performances des sujets sur chacune des épreuves, quelle que soit le mode de présentation. Les adultes recouraient, de façon quasi exclusive, à un encodage de type verbal. Du reste, les performances relevées ne se distinguaient pas de façon significative entre les deux modes de présentation des stimuli (simultanée vs séquentielle). Enfin, dans une troisième expérience, conduite également avec des adultes, les deux mêmes tâches secondaires (répétition verbale vs spatiale) et modes de présentation (simultanée vs séquentielle) étaient conservés (le groupe contrôle étant lui aussi maintenu), mais l'épreuve originale était modifiée. Les contours externes de la figure du clown ont été supprimés (d'où le nom "Cacahuète-Fantôme" ("Ghost-Peanut task") donné à la tâche), afin de limiter le recours à un encodage verbal des positions. Seule la tâche d'association position-couleur (M. Peanut-Couleur) était utilisée. Les résultats attestaient qu'un encodage de

nature spatiale intervenait, en dépit du fait que l'encodage verbal n'était pas totalement supprimé. Les auteurs en concluent que, lorsque les conditions le permettent et bien qu'il ne soit pas le plus efficace, les adultes adoptent de façon quasi systématique un codage verbal pour traiter une information visuo-spatiale.

Il apparaît donc que le recodage verbal de l'information visuo-spatiale est non seulement fonction de l'âge des sujets, mais aussi de la nature de la tâche à réaliser et du contexte expérimental. Comme l'ont montré de nombreux travaux (De Ribeaupierre et al., 2000 ; Miles et al., 1996 ; Pelizzon et al., 1999), il peut jouer un rôle essentiel et constituer une stratégie efficace dans le rappel de stimuli visuo-spatiaux. L'usage de représentations multiples dans l'encodage en MDT d'items visuo-spatiaux constituerait une base plus solide pour leur mémorisation que le recours simple à des représentations uniquement visuelles (Palmer, 2000).

Deux raisons ou facteurs pouvant rendre compte des changements de comportement relatifs au codage des informations visuo-spatiales au cours du développement ont été mis en avant. La première explication est que la capacité de transformation d'une information dans un format visuel à un format phonologique dans une tâche mnésique est étroitement liée à l'acquisition de la langue (Conant, Fastenau, Giordani, Boivin, Chounramany, Xaisida, Choulamoutary, Pholsena & Olness, 1997 ; Fastenau, Conant & Lauer, 1998 ; Logie, Della Sala, Wynn & Baddeley, 2000).

Le deuxième facteur jouant un rôle dans les changements développementaux quant à la conversion des informations visuelles sous forme verbale est la maturation des fonctions associées à l'exécuteur central de la MDT, qui est impliqué dans une multitude de processus cognitifs. Si les jeunes enfants ont recours à un codage visuel dans le rappel d'informations visuo-spatiales, c'est parce qu'ils se limitent aux caractéristiques perceptives des stimuli (Longoni & Scalisi, 1994 ; Palmer, 2000). Les étapes précoces du développement de la MDT s'appuient sur l'établissement de fonctions basiques perceptives et sensori-motrices, alors que les changements développementaux subséquents reposent sur la maturation de systèmes neurologiques permettant l'intégration de processus complexes associés à la MDT. De plus, plusieurs mécanismes ou facteurs participent au développement de la MDT visuo-spatiale, en particulier ceux ayant trait à la récupération de connaissances sémantiques ou lexicales stockées en MLT (Vecchi, Montecellai & Cornoldi, 1995 ; Wilson, Scott & Power, 1987), à la planification de l'action et à la manipulation des informations stockées (Baddeley, 1996), à l'efficacité d'utilisation d'une stratégie adaptée à la résolution d'un problème requérant le rappel d'une information (Cowan, 1997 ; Schneider & Sodian, 1997), à la vitesse de traitement de l'information en MDT (Cowan, Wood & Borne, 1994 ; Cowan, Wood, Wood, Keller, Nugent & Keller, 1998 ; Smyth & Scholey, 1996) et à l'attention (Cowan, 1997).

La question de l'encodage verbal des données spatiales imagées a été également étudiée en situation de perception haptique. Le codage verbal d'informations spatiales semble également contribuer à la construction des représentations spatiales haptiques. En effet, des différences dans la reconnaissance de formes explorées haptiquement ont été observées, chez l'enfant, selon que ces dernières pouvaient être connues ou étaient dépourvues de signification. Un avantage de la main gauche (donc de l'hémisphère droit, prenant en charge les fonctions spatiales) a été montré lorsque les formes palpées sont sans signification (Summers & Lederman, 1990), alors que quand les stimuli utilisés sont des lettres, on ne retrouve plus cette asymétrie de performances (Gibson & Bryden, 1983). Une interprétation pouvant expliquer ce résultat est que la perception des lettres par le canal haptique exige un traitement spatial effectué par l'hémisphère droit qui peut être

perturbé, voire même éliminé par le traitement linguistique réalisé par l'hémisphère gauche (Coiffi & Kandel, 1979 ; Witelson, 1977). Aussi, comme le souligne Stréri (2000), « le problème lié à l'utilisation d'objets concrets est qu'ils sont aisément identifiés par leur nom et qu'une médiation verbale, comme pour les lettres, peut affaiblir la capacité de traitement de l'hémisphère droit » (p. 96).

Le recours possible à un codage verbal de stimuli visuo-spatiaux a également été mis en évidence par l'observation de dissociations caractérisant certaines pathologies. A cet égard, l'exemple de l'aphasie (ou anomie tactile) tactile, qui recouvre un trouble de la dénomination des objets perçus, a fait l'objet de travaux. Cette pathologie est le plus souvent observable chez des patients ayant subi une section chirurgicale ou accidentelle du corps calleux (patients « split-brain »). La plus grande partie des études conduites concernent un déficit du traitement de l'information de la main gauche (ou parfois bimanuel). L'incapacité du sujet à dénommer des objets palpés de la main gauche serait due à la déconnexion hémisphérique qui supprimerait la mise en relation de la représentation de l'objet exploré tactilement et le nom correspondant. En effet, « les aires corticales impliquées dans la construction de la représentation spatiale des objets palpés de la main gauche sont situées dans l'hémisphère droit qui, suite à la section du corps calleux, n'est plus en contact avec les zones du langage situées dans l'hémisphère gauche » (Gentaz & Badan, 2000, p. 39). Les études de Baynes, Tramo, Reeves et Gazzaniga (1997) et Badan et Caramazza (1997) confortent cette interprétation, et montrent que la reconnaissance haptique est dépendante du niveau de familiarité des stimuli présentés, puisque la patiente identifiait plus difficilement des objets sans signification (lettres et formes avec ou sans signification découpées dans du papier de verre). De plus, avec l'emploi d'un matériel moins facilement analysable que des objets communs, la patiente présentait également des troubles de la reconnaissance haptique de la main droite. Endo, Miyasaka, Makishita, Yanagisawa et Sugishita (1992) ont suggéré que, dans l'aphasie tactile, le contenu de la mémoire sémantique ne pourrait être mis en relation avec la mémoire lexicale. Ils ont montré, à partir de l'observation de deux patients présentant des troubles de la perception haptique, que l'aphasie tactile est la conséquence d'une lésion sous-corticale incluant le gyrus angulaire gauche, qui empêche toute liaison entre les aires sensorielles associatives et les aires du lobe temporal inférieur impliquées dans la mémoire sémantique, créant une déconnexion tactilo-verbale.

Les données relatives précédemment montrent que le recodage verbal d'informations spatiales, lorsque le stimulus exploré le permet (selon son degré de familiarité, ou sa nature sémantique : significatif ou non, et suivant les conditions de réalisation de la tâche), est une stratégie pouvant être adoptée par le sujet, si ce dernier dispose des connaissances sémantiques (unités lexicales) requises pour l'appariement entre les représentations mentales stockées en MDT et celles contenues en MLT, au sein du lexique mental. Cette stratégie semble du reste susceptible d'être activée quelle que soit la modalité perceptive d'exploration du stimulus (visuelle vs haptique).

Enfin, il est à noter que les relations entre représentations visuelles (images mentales) et représentations verbales ne s'avèrent pas symétriques chez le jeune enfant. En effet, d'une part, comme nous l'avons vu, de nombreux travaux font état que, pour traiter des stimuli imagés, les jeunes enfants (avant 7-8 ans) ont essentiellement recours à un codage visuel, alors que les enfants plus âgés et les adultes adoptent préférentiellement un codage verbal ou propositionnel. Ainsi, la liaison en mémoire associative entre la représentation visuelle d'un objet et son nom ne s'effectue pas spontanément chez les jeunes enfants. Mais cette différence quant à la nature des liens pouvant s'opérer entre représentations visuelles et représentations verbales au cours du développement ne s'observe pas lorsque

l'information encodée est verbale, comme en témoignent les recherches sur le « contrôle de la source », telle que celle de Foley, Durso, Wilder et Friedman (1991). Ces auteurs ont réalisé une expérience dans laquelle, après la présentation d'une série de mots se référant à des objets concrets et d'images représentant des objets différents de ceux évoqués par les mots, des enfants de 6 et 9 ans ainsi que des adultes étaient soumis, sans avoir été prévenus, à une tâche de contrôle de la source dans laquelle ils devaient dire si le mot prononcé par l'expérimentateur avait été présenté sous forme d'image, de mot, ou s'il était nouveau. Aucune évolution développementale notable ne se dégageait des résultats. Le même type d'erreurs était observé chez les enfants et les adultes : tous affirmaient plus facilement qu'un mot avait été présenté sous forme d'image que sous forme de mot. Ainsi, lorsque l'entrée en mémoire associative s'effectue par un mot, il s'avère que l'association du mot avec la représentation visuelle est de même force chez les jeunes enfants et chez les adultes. Les données issues de ces différentes expériences suggèrent donc une asymétrie chez les jeunes enfants concernant les relations en mémoire associative entre représentations visuelles et représentations verbales, le mot apparaissant plus facilement associé à l'image que l'image au mot.

Les quatre chapitres théoriques précédents ont fait l'objet des composantes principales sur lesquelles porte notre étude. Après avoir défini les analyses syntaxiques du dessin (résidant dans la description de règles graphiques) et avoir présenté les travaux sur la règle syntaxique sur laquelle porte plus spécifiquement notre recherche (chapitre 1), nous avons abordé le processus sur lequel s'appuie le PEC : l'opération de planification de l'action (chapitre 2). Cette opération sous-tend l'élaboration de stratégies dans la résolution de problèmes tels que l'exécution de dessins complexes non familiers (inconnus), et mobilise le système représentationnel, ce dernier assurant l'intégration en mémoire des données du problème. De plus, notre travail étant consacré à l'examen du rôle du contenu et du format des représentations dans l'émergence du PEC au cours du développement, nous nous sommes intéressés :

1. d'une part, aux capacités représentationnelles (et à leur évolution) relatives à l'intégration en mémoire des données en situation de résolution de problème (construction de représentations unifiées) ; dans cette optique, nous avons envisagé la distinction entre les modalités visuelle et haptique dans l'appréhension perceptive et le traitement des propriétés visuo-spatiales (chapitre 3), et
2. d'autre part, au format de stockage des informations visuo-spatiales (chapitre 4) ; nous nous sommes alors interrogés sur le rôle (ou la nécessité) de l'imagerie visuelle (recours à des représentations dans un format imagé) et du codage verbal (exploitation de représentations phonologiques ou propositionnelles) des données visuo-spatiales.

Rappelons que la présente recherche a pour objet de déterminer le rôle du contenu et du format des représentations dans l'émergence du PEC, et s'inscrit dans une perspective développementale. Nous formulons l'hypothèse générale selon laquelle le PEC s'appuie sur une opération de planification de l'action, basée sur une intégration cohésive des données (élaboration de représentations globales, contenant les propriétés d'ensemble des dessins à exécuter). Par ailleurs, cette dernière serait conditionnée par le format des représentations pouvant être exploitées par les enfants au cours du développement. Les deux séries d'expériences qui suivent visent précisément à tester ces hypothèses.

Partie II. Section expérimentale

Chapitre 5. Rôle du contenu des représentations dans l'émergence du PEC

La série d'expériences qui suit vise à étudier le rôle du contenu des représentations dans l'émergence du PEC. Pour ce faire, nous introduisons des variables susceptibles d'influer sur l'encodage perceptif et/ou l'intégration en mémoire des propriétés visuo-spatiales des dessins, et par conséquent sur le PEC (puisque nous faisons l'hypothèse que la mise en œuvre de cette stratégie d'exécution est dépendante du contenu des représentations). L'étude des effets de ces variables au cours du développement permettra par ailleurs de rendre compte de l'évolution de mécanismes cognitifs.

1. L'incidence des contraintes de construction des représentations dans la résolution de problèmes d'exécution de dessins géométriques complexes chez des enfants normaux et présentant un THADA

Comme nous l'avons mentionné précédemment, nous postulons que l'émergence du PEC repose principalement sur une opération de planification de l'action, qui réside dans l'établissement de règles d'exécution définies en fonction des propriétés visuo-spatiales des dessins explorés (un ensemble de formes élémentaires agencées selon une organisation d'emboîtement). Aussi, comme le soulignent Bialystok et Jenkin (1998), une caractéristique décisive dans le choix des solutions dans la résolution de problèmes, est « la facilité ou la simplicité de la construction de la représentation mentale » (p. 73). Les trois expériences qui suivent ont pour objet d'examiner, au cours du développement, dans la résolution de problèmes d'exécution de dessins complexes composés de formes géométriques élémentaires emboîtées, les relations entre le degré de difficulté de construction des représentations des informations visuo-spatiales et l'émergence du PEC, chez des enfants « normaux » et présentant un THADA (trouble hyperactif avec déficit attentionnel).

1.1. L'influence de la modalité perceptive d'exploration sur le PEC (expérience 1)

Dans cette première expérience, nous examinons l'incidence de trois facteurs sur l'émergence du PEC, chez des enfants de 6 et 8 ans :

- d'abord, celle de la modalité perceptive d'exploration des stimuli, visuelle ou haptique. De nombreux travaux ont montré la dominance de la modalité visuelle par rapport à la modalité haptique dans le traitement des informations visuo-spatiales (Klatzky, 1999 ; Lakatos & Marks, 1998 ; Vogels & al., 2001). Alors que la modalité visuelle permet une appréhension perceptive globale des données visuo-spatiales, qui rend aisée la construction de représentations unifiées de ces dernières, les propriétés anatomo-fonctionnelles du système haptique induisent

un traitement séquentiel et analytique des informations visuo-spatiales ayant pour conséquence une difficulté d'intégration en mémoire des propriétés d'ensemble des stimuli explorés, qui se traduit par une plus grande difficulté d'élaboration de représentations cohésives (Gentaz & al., 2003 ; Hatwell, 2000 ; Loomis & al., 1991). C'est pourquoi nous prédisons un usage plus massif du PEC en exploration visuelle qu'en exploration haptique. Toutefois, si l'émergence du PEC n'est pas simplement conditionnée par l'appréhension perceptive des stimuli mais est également liée aux capacités de maintien en mémoire des informations encodées afin de construire des représentations globales de ces derniers, alors ce principe devrait être plus souvent utilisé par les enfants de 6 ans que ceux de 8 ans, en particulier en situation d'exploration haptique (interaction âge \times exploration significative), en raison de l'accroissement au cours du développement des capacités de maintien en mémoire d'informations visuo-spatiales (Case, 1985 ; Gallina, 1998 ; Pascual-Leone & Baillargeon, 1994).

- ensuite, celle des contraintes visuo-motrices de tracé. Baldy et al. (1996) ont mis en évidence, chez des enfants de 9 ans, l'incidence de la suppression des indices visuels sur l'organisation de l'exécution de la figure complexe de Rey (FCR). Ils ont montré l'effet néfaste de la suppression de l'information visuelle sur l'organisation du tracé de la FCR. Qu'en est-il pour le PEC ? Ce phénomène s'applique-t-il également à la reproduction de dessins complexes composés de formes géométriques élémentaires emboîtées ? Si, comme nous le postulons, l'émergence du PEC repose avant tout sur une opération de planification de l'action, alors les contraintes visuo-motrices de tracé ne devraient pas conditionner ce principe d'exécution. En effet, le travail de planification de l'action relevant de l'analyse perceptive des stimuli explorés et le tracé des dessins constituant une étape ultérieure à cette analyse, les contraintes visuo-motrices d'exécution ne devraient donc pas influencer sur le PEC.
- enfin, celle du modèle exploré, relativement à la position des formes élémentaires constitutives des stimuli explorés, ceci afin de vérifier l'hypothèse selon laquelle le PEC est indépendant des propriétés spatiales liées à la localisation des figures géométriques simples constitutives des stimuli explorés.

1.1.1. Méthode

1.1.1.1. Population

516 enfants de 6 et 8 ans issus respectivement de classes de CP et CE2 d'écoles primaires publiques de la région lyonnaise ont participé à l'expérience. 36 d'entre eux (27 enfants de CP et 9 enfants de CE2) n'ont pu être retenus en raison de leur grande difficulté d'exploration haptique des stimuli ayant eu pour conséquence une reproduction erronée des modèles, et pour lesquels les stratégies d'exécution n'ont donc pu être prises en compte. Les dessins exécutés par ces enfants n'étaient pas fidèles au modèle-test exploré du point de vue figuratif, certaines des formes élémentaires constitutives de ce dernier n'ayant pas été identifiées correctement ou tracées suffisamment précisément (non respect des orientations verticale, horizontale ou oblique des segments, les écarts relatifs à la dimension de ces derniers ayant été tolérés), et/ou ne respectaient pas les propriétés spatiales des stimuli explorés (respect des tailles relatives des différentes figures géométriques simples et de leurs positions relatives ; nous n'avons en revanche pas tenu compte de la qualité graphique des dessins produits concernant la taille globale de chacune des formes élémentaires). Les

480 enfants sélectionnés étaient répartis équitablement entre les deux groupes d'âge, 6 ans (âge moyen : 6 ; 5 ans ; s=4 mois) et 8 ans (âge moyen : 8 ; 6 ans ; s=4 mois).

1.1.1.2. Tâche

La tâche consistait pour le sujet à reproduire successivement deux dessins-modèles : un modèle-essai et l'un des deux modèles-tests (cf. figure 10).

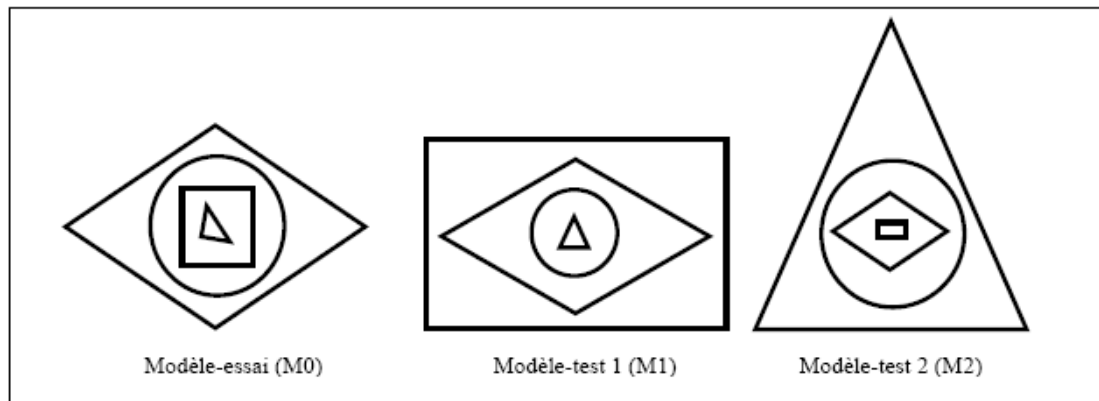


Figure 10 : Dessins-modèles (M0, M1 et M2) utilisés dans l'expérience

Dans chacune des conditions expérimentales, la passation débutait par la reproduction du modèle-essai, permettant de nous assurer de la bonne compréhension de la consigne, en particulier dans les conditions d'exploration manuelle. Par ailleurs, nous avons ici limité la tâche de reproduction à un seul modèle-test par enfant, en raison du niveau élevé de difficulté (et par là de la durée de réalisation souvent importante, celle-ci dépassant parfois quinze minutes pour le seul modèle-essai) que présente cette dernière en situation d'exploration haptique chez les enfants les plus jeunes (les enfants de 8 ans faisant généralement preuve d'une plus grande habileté et se montrant beaucoup plus à l'aise et performants que les enfants de 6 ans dans chacune des situations d'exploration haptique). Suite à la reproduction du modèle-essai (M0), pour chacune des conditions expérimentales, la moitié des sujets de chaque groupe d'âge reproduisait le modèle-test M1 tandis que l'autre moitié reproduisait le modèle-test M2.

Les modèles que nous avons utilisés étaient semblables à ceux de Magnan et al. (1999, 2000) du point de vue de leur composition et de leur organisation ou configuration spatiale: ils étaient constitués des mêmes figures géométriques simples, positionnées de façon similaire les unes par rapport aux autres. Le modèle-essai comprenait un losange (diagonales : 14 \square 8,5 cm), un cercle (diamètre : 5,8 cm), un carré (3,4 cm de côté) et un triangle (base : 2 cm, hauteur : 1 cm). Les deux modèles-tests étaient composés des mêmes formes géométriques simples. Seules les positions relatives des figures élémentaires étaient modifiées ; celles-ci étaient inversées : l'ordre centripète du modèle M1 correspondait à l'ordre centrifuge du modèle M2. Chacun de ces modèles incluait non pas un carré mais un rectangle (13,2 \square 7 cm pour M1 et 1,4 \square 0,7 cm pour M2), ainsi que, comme pour M0, un losange (diagonales : 10 \square 5 cm pour M1 et 4,5 \square 3,1 cm pour M2), un cercle (diamètre : 3,2 cm pour M1 et 6,4 cm pour M2) et un triangle (de bases et hauteurs respectives 1,1 \square 1,1 cm pour M1 et 13 \square 12,4 cm pour M2). Néanmoins, nous avons supprimé les points de tangence présents dans les stimuli utilisés par Magnan et al. (1999, 2000), afin de faciliter l'extraction haptique des formes élémentaires (la présence de points de contact entre chacune des formes élémentaires rendant la tâche trop complexe). C'est pourquoi dans cette expérience

les différentes formes simples ont été régulièrement espacées et positionnées de telle sorte que chacune des figures élémentaires soit en tout point distante de la précédente et/ou de la suivante d'un minimum de 0,50 cm, ceci afin de permettre une meilleure discrimination des diverses formes lors du suivi de leur contour. Ce dernier constitue la méthode exploratoire manuelle la plus appropriée et la plus spontanée lorsqu'il s'agit d'extraire la propriété de forme d'objets bi-dimensionnels (Symmons & Richardson, 2000).

Les stimuli se présentaient sous deux formes différentes selon que l'exploration était réalisée en modalité visuelle ou haptique. En situation d'exploration visuelle, les modèles figuraient au centre d'une feuille de papier blanc (21×29,7 cm), alors qu'en situation d'exploration haptique, ils se présentaient sous la forme de dessins en relief, préalablement collés sur des plaquettes en bois (19×21 cm). Il s'agissait plus précisément de figures qualifiées de "bi-dimensionnelles" (donnant lieu à des représentations intégrant deux dimensions (coordonnées issues de la combinaison des axes vertical et horizontal du plan orthogonal), la troisième dimension (hauteur, ou profondeur) permettant uniquement la perception haptique mais n'étant pas prise en compte dans la représentation construite), pour lesquelles les lignes délimitant le contour des différentes formes composant chacun des modèles se situent sur un même plan, leur hauteur (relief) et leur épaisseur étant de faible amplitude (de l'ordre du millimètre). La technique de mise en relief employée ici afin de rendre possible la ségrégation figures/fond repose sur l'utilisation d'un stéréocopieur (four chauffant) dans lequel on insère des feuilles « encapsulées » (contenant du gaz emprisonné entre plusieurs couches de papier plastifié) permettant de créer localement un volume.

La suppression d'indices visuels lors de l'exploration (situation d'exploration haptique) et/ou au moment du tracé (situations d'exécutions haptique et en aveugle) était obtenue au moyen d'un dispositif expérimental composé d'un large socle carré en bois (planche de 50 cm de côté) sur lequel étaient fixées de chaque côté, à l'avant, deux barres métalliques verticales (d'une hauteur d'environ 50 cm) et une barre horizontale joignant les deux sommets des barres verticales permettant d'y suspendre un rideau (figure 11). Le socle était posé sur un plan horizontal (perpendiculaire à la partie supérieure verticale du corps de l'enfant assis, faisant face à celui-ci). Il comportait deux compartiments, l'un destiné au positionnement des plaquettes (19×21 cm) constituant le support des modèles en relief, réservé à l'exploration haptique, l'autre au logement du matériel d'exécution sous occlusion visuelle.

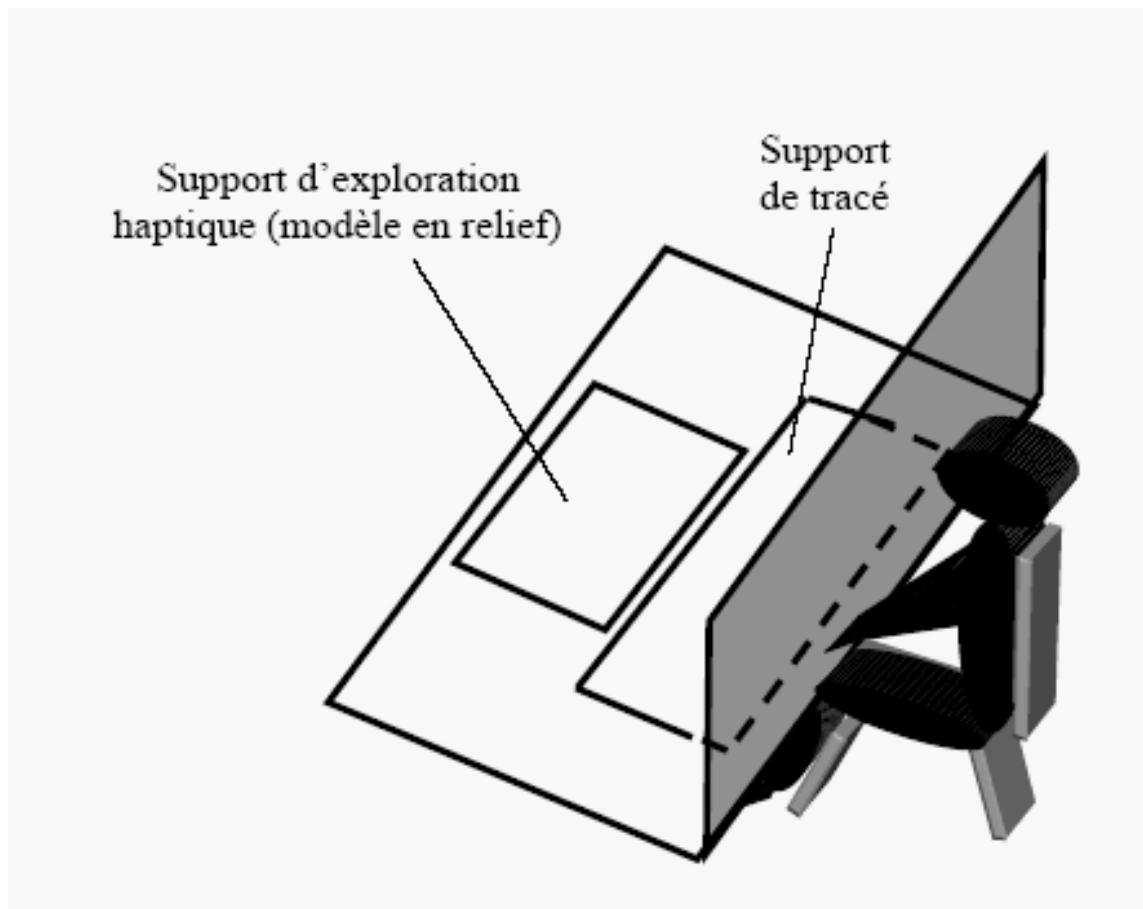


Figure 11 : Dispositif expérimental utilisé dans les situations d'exploration et/ou d'exécution sous occlusion visuelle.

Pour la condition d'exploration visuelle, il était précisément dit à l'enfant : « Je vais te montrer un dessin : ce sera le modèle. Tu pourras regarder ce modèle autant de fois que tu le veux ». En situation d'exploration haptique, la consigne était la suivante : « Derrière le rideau, il y a, sur une feuille, un dessin que tu pourras toucher : c'est le modèle. Tu pourras toucher ce modèle autant de fois que tu le veux ». Pour une meilleure compréhension du déroulement de l'épreuve, l'expérimentateur montrait à l'enfant le compartiment prévu au logement du modèle en relief. Ce dernier était aisément accessible (le centre du dessin se situait à une distance d'environ 30 cm à partir du bord du socle).

Par ailleurs, chacun des enfants traçaient ses dessins dans l'une des conditions d'exécution. Nous avons défini quatre niveaux relatifs aux contraintes visuo-motrices de tracé, s'échelonnant suivant la quantité d'informations visuelles et/ou d'indices de repérage spatial disponibles : exécutions visuelle, visuo-manuelle, haptique et en aveugle.

En situation d'exécution visuelle, les enfants bénéficiaient d'un feedback visuel « total », permettant un contrôle à la fois sur les mouvements générés et sur la trace graphique. Ils réalisaient leurs productions au moyen d'un crayon (HB), sur une feuille de papier blanc (21×29,7 cm). L'usage de la règle et de la gomme était interdit. Il était alors dit à l'enfant : « Je vais te demander de copier le modèle du mieux que tu peux sur la feuille qui est à côté de toi, avec le crayon. Attention de ne rien oublier en copiant le modèle ». Pour les modèles suivants, les instructions étaient : « C'est bien. Je vais maintenant changer le modèle, et tu devras là encore refaire le dessin aussi

bien que possible. Tu peux à nouveau regarder le modèle aussi souvent que tu veux. Attention de ne rien oublier cette fois encore ».

- En situation d'exécution visuo-manuelle, les sujets exécutaient leurs dessins sur la base d'un feedback visuel « partiel » : ils bénéficiaient d'un contrôle visuel sur les mouvements produits (boucle visuo-manuelle opérante), mais pas sur la trace graphique. Ils effectuaient leurs dessins sur une feuille blanche (de même format que précédemment) située devant eux, mais employaient un stylo sans encre. Ils réalisaient donc des dessins invisibles. Nous nous sommes ici inspiré du paradigme de « reproduction sans trace » mis en place par Baldy, Chatillon, Cadopi et Chanquoy (1996), que ces auteurs utilisent également dans le cadre d'une tâche de copie d'une figure complexe (figure de Rey) suite à une exploration visuelle. Les productions étaient alors enregistrées à l'aide d'un papier carbone. Les instructions alors données étaient celles-ci : « Je vais te demander de copier le modèle du mieux que tu peux sur la feuille qui est à côté de toi, avec ce stylo. Le stylo que tu vas utiliser n'écrit pas. Tu ne verras donc pas ton dessin. Tu devras te débrouiller pour faire le dessin le plus ressemblant possible par rapport au modèle, sans pouvoir voir ton dessin. Attention de ne rien oublier en copiant le modèle ». Pour les modèles suivants, la formule restait inchangée par rapport à la condition précédente.
- En situation d'exécution haptique, le sujet ne percevait pas visuellement sa production, mais pouvait la contrôler haptiquement. L'enfant était artificiellement aveuglé grâce au dispositif expérimental présenté auparavant (cf. figure 11). Le tracé était alors réalisé au moyen d'un kit à dessin pour aveugles permettant l'exécution haptique. Ce kit se composait d'une feuille plastifiée possédant une texture granuleuse (papier dycème) adhérent à une mince couche de mousse de forme rectangulaire (36 × 26 cm), sur laquelle la pression d'un stylo à bille creuse un sillon, créant un relief haptiquement perceptible. Le sujet pouvait ainsi suivre tactilement, en passant la (les) main(s) sous le rideau (la feuille sur laquelle était enregistrée la production était aisément accessible), la progression de l'exécution de ses dessins. Il était alors en mesure de connaître l'état d'avancement de sa production et de localiser spatialement les éléments du modèle déjà reproduits. L'expérimentateur expliquait à l'enfant : « Je vais te demander de copier le modèle du mieux que tu peux sur la feuille qui est derrière le rideau [l'expérimentateur montrait à l'enfant la position de la feuille], avec ce stylo. La feuille sur laquelle tu vas dessiner permet de savoir où tu en es parce qu'elle laisse des marques que tu pourras sentir et suivre avec ton doigt □ démonstration □. Tu pourras regarder le modèle autant de fois que tu veux. Fais bien attention de ne rien oublier ».
- Dans la condition d'exécution en aveugle, Les enfants ne pouvaient voir ni les mouvements de leur main, ni le tracé réalisé. Ils ne disposaient d'aucun contrôle perceptif leur permettant de s'informer de l'état de leurs productions. Le dispositif alors utilisé était similaire à celui de la condition précédente (cf. figure 2), la feuille plastifiée étant remplacée par une feuille blanche (21 × 29,7 cm) sur laquelle l'enfant traçait au crayon (type HB) le dessin. Les instructions concernant le tracé étaient alors : « Je vais te demander de copier le modèle du mieux que tu peux sur la feuille qui est derrière le rideau [l'expérimentateur montrait là encore à l'enfant la position de la feuille], avec ce crayon. Pour dessiner, tu passeras la main sous le rideau. Tu ne verras donc pas le dessin que tu seras en train de faire. Attention de ne rien oublier ». Pour les modèles qui suivaient, la formule employée demeurait la même par rapport aux autres conditions de tracé.

Dans tous les cas, l'expérimentateur relevait durant la tâche le procédé d'exécution, c'est-à-dire l'ordre de tracé des différentes figures géométriques élémentaires.

1.1.2. Résultats

Dans la mesure où dans le cadre de cette recherche nous nous centrons sur l'émergence du PEC, nous avons distingué deux cas concernant le type de stratégie d'exécution utilisé par les enfants dans chacune des conditions expérimentales : le recours au PEC ou l'adoption d'un autre procédé d'exécution. Les résultats sont indiqués dans le tableau de fréquences qui suit. Il est apparu que, quelle que soit la condition expérimentale, le PEC est la stratégie d'exécution à laquelle ont recours de manière privilégiée les enfants. En effet, ce mode d'organisation est adopté par au minimum 53% des enfants, et s'avère même exclusif dans certaines situations expérimentales. Les procédés d'exécution non centripètes adoptés par les enfants figurent en annexe 1.

Tableau 4 : Répartition des enfants suivant la stratégie d'exécution adoptée, pour chaque groupe d'âge, modèle-test et condition de tracé (V=visuelle ; VM=visuo-manuelle ; H=haptique ; A=en aveugle).

		Exploration visuelle				Exploration haptique			
		6 ans		8 ans		6 ans		8 ans	
		PEC	Autre	PEC	Autre	PEC	Autre	PEC	Autre
Exéc. V	M1	14	1	15	0	11	4	13	2
	M2	15	0	14	1	10	5	12	3
Exéc. VM	M1	14	1	14	1	11	4	13	2
	M2	13	2	13	2	12	3	11	4
Exéc. H	M1	11	4	11	4	9	6	11	4
	M2	10	5	11	4	8	7	10	6
Exéc. A	M1	10	5	11	4	9	6	9	6
	M2	10	5	12	3	9	6	10	5

Afin de déterminer si la stratégie d'exécution (S : PEC/autre) est liée à la modalité perceptive d'exploration (E), aux contraintes visuo-motrices de tracé (T), au modèle-test (M) ou/et à l'âge (A), nous avons procédé à l'analyse log-linéaire des données (pour un descriptif détaillé de cette technique, cf. Howell, 1998). Cette analyse permet l'examen de mesures de fréquences (effectifs), portant donc sur une échelle non continue (discrète). Tout comme l'analyse de la variance, elle permet également de tester les effets des interactions entre les différents facteurs expérimentaux (le principe général de cette technique résidant dans la transformation d'un modèle mathématique multiplicatif en un modèle additif s'apparentant au modèle de l'analyse de la variance, par le biais de la fonction logarithmique). Elle requiert néanmoins l'indépendance des données (raison supplémentaire pour laquelle les modèles M1 et M2 n'ont pu être reproduits par les mêmes sujets).

Les tests d'interactions simultanément nulles ont d'abord permis de montrer que les seuls effets principaux étaient insuffisants pour expliquer le schéma de fréquences observées, le modèle le mieux ajusté au tableau de fréquences comportant une ou plusieurs interactions à deux dimensions ($\chi^2(18)=29,07$; $p<.05$).

Ensuite, les tests d'association marginale et partielle (nous nous limiterons ici aux tests d'association partielle, plus précis) ont indiqué que, outre la fait que le facteur principal S contribue significativement à l'explication du schéma de fréquences ($\chi^2(1)=129,60$; $p<.00001$), témoignant de la dominance du PEC (le rapport de chances en faveur de

l'utilisation de cette stratégie d'exécution comparativement au recours à un autre procédé d'exécution est de 376/104=3,62), les interactions SE ($\chi^2(1)=9,78$; $p<.01$) et ST ($\chi^2(3)=21,03$; $p<.001$) participent également à l'explication du tableau des effectifs. Le modèle le mieux ajusté au schéma de fréquences comporte donc les termes S, SE et ST. Par conséquent, le meilleur modèle est SE, ST ($\chi^2(54)=11,45$; $p=1$, avec $\Delta=0,5$ en raison des faibles effectifs observés dans certaines conditions expérimentales). Nous pouvons en déduire qu'à la fois la modalité perceptive d'exploration des stimuli et les contraintes visuo-motrices de tracé ont un effet significatif sur le PEC. Ce dernier s'avère plus prégnant en exploration visuelle qu'en exploration haptique (le rapport de chances est de 198/168=1,18). De plus, la fréquence d'usage du PEC est significativement plus élevée en conditions d'exécutions visuelle et visuo-manuelle qu'en conditions de tracé haptique (on relève respectivement $\chi^2(1)=12,48$; $p<.001$ et $\chi^2(1)=9,09$; $p<.01$) et d'exécution en aveugle ($\chi^2(1)=13,42$; $p<.001$ et $\chi^2(1)=9,91$; $p<.01$). Ainsi, les contraintes visuo-motrices de tracé conditionnent également l'émergence du PEC. En revanche, l'effet de l'âge n'est pas significatif, le PEC s'avérant stable entre 6 et 8 ans. De même, le modèle ne semble aucunement déterminer l'émergence du PEC. Les positions relatives des différentes formes élémentaires ne conditionnent donc pas l'organisation du tracé des dessins, l'ordre d'exécution des figures géométriques simples privilégié par les enfants suivant une progression centripète. Ainsi, la stratégie d'exécution préférentiellement adoptée par les enfants n'est pas liée à la difficulté de tracé des formes élémentaires constituant chacun des dessins-tests. La position au sein du dessin du cercle, du rectangle, du triangle et du losange, que l'enfant est capable de tracer respectivement à partir de trois, quatre, cinq et sept ans (Henry, 2001 ; Broderick & Laszlo, 1987) ne constitue pas un élément intervenant dans le choix de l'ordre d'exécution des formes élémentaires (aucun enfant n'a eu recours au mode d'organisation de l'exécution correspondant à l'ordre d'acquisition génétique des figures géométriques élémentaires).

1.1.3. Discussion

Nous reviendrons successivement sur les deux effets significatifs relevés quant à l'émergence du PEC : celui de la modalité perceptive d'exploration des stimuli et celui des contraintes visuo-motrices de tracé des dessins.

Les résultats ici obtenus ont d'abord permis de mettre en évidence l'effet de la modalité perceptive d'exploration, visuelle ou haptique, sur l'émergence du PEC. Ce dernier s'avère plus prégnant en exploration visuelle. Aussi, nous pouvons nous interroger sur les processus à l'œuvre dans chacune de ces conditions d'exploration. En effet, l'effet de la modalité perceptive d'exploration pourrait être imputé à des mécanismes purement sensoriels, relatifs à l'appréhension perceptive des dessins, ou/et attribué à des processus représentationnels liés à l'intégration en mémoire des informations visuo-spatiales. Dans le premier cas, les différences relevées entre les deux conditions d'exploration seraient liées à l'appréhension perceptive morcelée et séquentielle des stimuli caractérisant l'exploration manuelle, l'exploration visuelle permettant au contraire une perception globale des dessins. Dans le deuxième cas, l'exploration visuelle serait davantage propice que l'exploration haptique à l'émergence du PEC parce qu'elle favoriserait le maintien en mémoire des informations visuo-spatiales, facilitant ainsi l'intégration cohésive des propriétés d'ensemble des dessins, et donc la construction de représentations unifiées. Ainsi, les mécanismes sous-jacents au PEC dans la reproduction des dessins pourraient avoir trait essentiellement

au système perceptif, ou principalement au système représentationnel (ou mnésique), ou conjointement à ces deux systèmes.

En dépit du fait que nous ne sommes pas en mesure de déterminer les processus à l'origine de l'effet de la modalité perceptive d'exploration, les résultats que nous avons présentés suggèrent que ceux-ci seraient de même nature si nous nous référons au principe de « fractionnement développemental » (Hitch, 1990), qui « repose sur l'évaluation du taux de développement, en fonction de l'âge, de fonctions cognitives ostensiblement différentes. Si la performance observée à un type de tâche cognitive se développe à un taux différent de celui trouvé à une tâche contrastante, cela suggère que la résolution de ces tâches implique des systèmes cognitifs différents (autrement dit, que les processus cognitifs qui sous-tendent la réalisation des tâches peuvent être considérées comme des composantes séparées de l'architecture cognitive) » (Pearson & Logie, 1998, pp. 149-150). Or on note ici une évolution similaire dans les deux modalités concernant l'adoption du PEC au cours du développement (l'absence d'interaction stratégie d'exécution \times âge \times modalité perceptive d'exploration en témoigne). Comme l'illustre la figure 12, le taux d'augmentation de la fréquence d'apparition du PEC entre 6 et 8 ans varie peu entre les deux conditions d'exploration (il atteint respectivement 4,1% et 12,7% en explorations visuelle et haptique, si l'on englobe les quatre conditions d'exécution et les deux modèles-tests), ce qui conforte l'idée que la tâche est de même nature, quelle que soit la modalité perceptive d'exploration mobilisée, visuelle ou haptique. Dans les deux conditions, il s'agit pour l'enfant d'une tâche de copie, pour laquelle l'émergence du PEC reposerait sur des processus communs ou qui ne seraient pour le moins pas fondamentalement différents. Ces processus n'opèreraient néanmoins pas avec la même efficacité dans chacune des deux modalités sensorielles d'exploration.

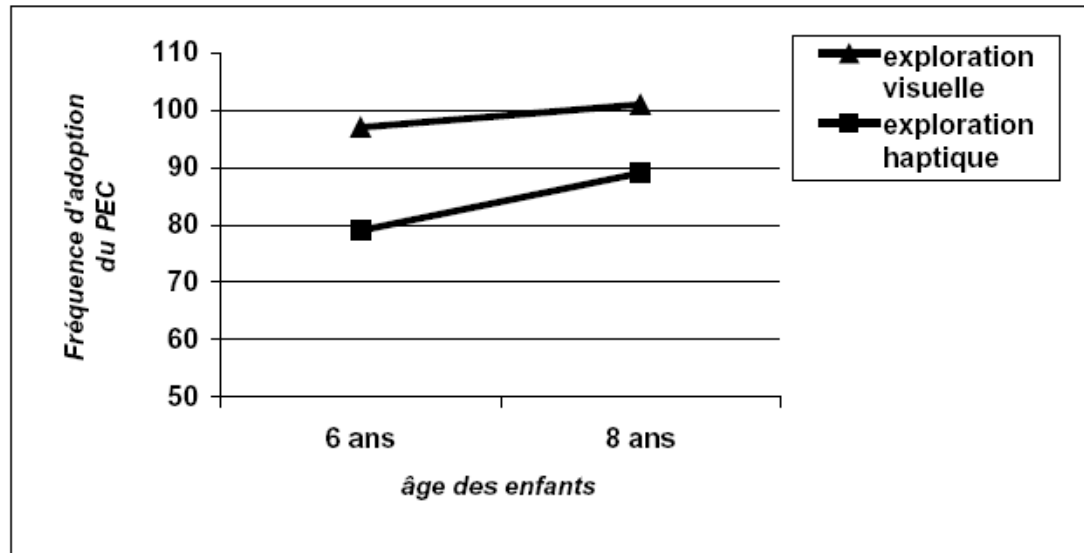


Figure 12 : Fréquence d'adoption du PEC en fonction de l'âge des enfants, dans chacune des deux conditions d'exploration (max.=120).

La stabilité du PEC entre 6 et 8 ans dans chacune des deux conditions d'exploration nous laisse à penser que les mécanismes sous-jacents au PEC dans la copie des dessins seraient de nature perceptive (déjà opérationnels à 6 ans et n'évoluant guère par la suite), plutôt que des processus ayant trait au système représentationnel ou mnésique (pour

lesquels les deux groupes d'âge seraient davantage susceptibles de se distinguer). La tâche ferait essentiellement appel à des opérations ou fonctions sensori-motrices (traitements de bas niveau) relatives à l'exploration perceptive des dessins, disponibles précocement au cours du développement (Case, 1985 ; Piaget, 1967 ; Thibaut & Gelaes, 2002).

Les résultats de l'expérience ont également mis en évidence l'effet significatif des contraintes visuo-motrices de tracé sur l'émergence du PEC. Plus précisément, nous avons constaté que le PEC s'avère plus prégnant lorsque les enfants disposent d'informations visuelles (conditions d'exécutions avec feedbacks visuel total et partiel) que lorsqu'aucun indice visuel ne peut être exploité (conditions d'exécution haptique et d'exécution en aveugle). Ces données confirment celles obtenues par Baldy et al. (1996), qui ont montré l'incidence néfaste de la suppression des informations visuelles dans la reproduction de la figure complexe de Rey (FCR). Si, comme ces auteurs, nous constatons l'effet perturbateur de l'élimination des indices visuels sur l'organisation du tracé des dessins, la simple suppression de la trace graphique n'a néanmoins pas d'incidence sur l'organisation du tracé de dessins composés de formes géométriques élémentaires emboîtées (émergence du PEC), contrairement à l'exécution de la FCR. Cette différence peut s'expliquer par la plus grande complexité de la FCR, en raison, d'une part, de la plus grande quantité et variété ou richesse des éléments qui la composent (celle-ci incluant des formes géométriques simples ayant une valeur sémantique, mais également des patterns abstraits) et d'autre part, de ses propriétés spatiales. En particulier, la présence de points de tangence rend moins aisée l'extraction des éléments et donc la structuration perceptive du modèle, mais aussi le tracé, la présence d'éléments contigus constituant une contrainte importante lorsque les indices visuels sont supprimés, l'exécution de la FCR demandant une plus grande justesse ou précision graphique (or l'information visuelle joue un rôle capital dans le contrôle moteur). C'est pourquoi, la présence d'un contrôle visuel sur la trace graphique pourrait jouer un rôle beaucoup plus important dans l'exécution de la FCR que dans la reproduction de dessins composés de figures géométriques élémentaires emboîtées non tangentes. Il n'en reste pas moins que la présence d'indices visuels favorise l'émergence du PEC. Mais pourquoi la suppression des informations visuelles est-elle à l'origine de modifications dans l'organisation du tracé des dessins ? L'hypothèse que nous émettons en réponse à cette question est que la suppression du feedback visuel induirait un traitement séquentiel des stimuli. Elle affecterait la stabilité des représentations perceptives (composées d'informations sensorielles) construites par les enfants (Case, 1985), en créant une surcharge mnésique qui perturberait l'organisation de l'exécution des dessins. Lorsque les enfants peuvent contrôler visuellement la trace graphique de leurs productions, il ne leur est alors aucunement nécessaire de maintenir en mémoire les éléments tracés. De même, lorsqu'ils disposent d'un feedback haptique, les enfants peuvent contrôler perceptivement l'état de leurs productions. Toutefois, le travail d'exploration manuel requis mobilise fortement l'attention de l'enfant, qui tente de se représenter mentalement ce qui a déjà été tracé (le sujet pouvant d'ailleurs avoir recours au processus de médiation visuelle (Klatzky & Lederman, 1987) consistant à convertir les informations haptiquement perçues en image mentale visuelle), ce qui est susceptible de rendre instables les représentations des stimuli ou des informations encodées lors de l'exploration. Les représentations contenant les informations se rapportant aux productions tracées interféreraient avec celles contenant les données relatives aux stimuli explorés. De la même façon, la condition de tracé en aveugle serait également peu propice à l'émergence du PEC, parce qu'elle exige un maintien en mémoire des éléments tracés (ceux-ci ne pouvant être contrôlés perceptivement) qui, là encore, serait enclin à rendre instables les représentations construites relativement aux informations visuo-spatiales encodées. Mais alors, pourquoi le PEC est-il plus prégnant

dans la condition d'exécution « sans trace » que dans la condition d'exécution en aveugle, alors que dans ces deux modalités, l'enfant ne dispose pas d'un feedback perceptif efficace (contrôle visuel) lui permettant de contrôler l'état de sa production, l'obligeant alors à maintenir en mémoire les informations relatives à cette dernière ? Nous formulons l'hypothèse selon laquelle la présence d'indices visuels partiels au moment du tracé favoriserait le stockage en mémoire des informations relatives aux productions graphiques des enfants (éléments déjà exécutés). Alors que le tracé en aveugle fait l'objet d'un simple codage, proprioceptif, quant au tracé des dessins, l'exécution visuo-manuelle sans feedback perceptif sur la trace graphique s'appuie sur un double codage, à la fois proprioceptif et visuel. Ce double codage, incluant des indices visuels relatifs aux mouvements du membre effecteur, constituerait une base ou source d'informations plus fiable et solide que le simple codage proprioceptif (les indices visuels étant du reste plus prégnants que les indices proprioceptifs), ce qui faciliterait la mémorisation des éléments exécutés et rendrait plus stables les représentations contenant les propriétés visuo-spatiales des stimuli explorés.

Comme nous l'avons vu, il existe un effet de la modalité perceptive d'exploration, visuelle ou haptique sur l'émergence du PEC. Toutefois, nous ne disposons d'aucun élément probant susceptible de nous renseigner sur la nature, perceptive et/ou représentationnelle, des processus liés à cet effet. Dans l'expérience suivante, nous revenons plus précisément sur la question des mécanismes sous-jacents à l'émergence du PEC dans deux tâches, dont celle de la copie de dessins semblables à ceux utilisés dans l'expérience 1. Celle-ci vise à déterminer si le recours plus rare du PEC en modalité haptique par rapport à la modalité visuelle est dû à l'appréhension perceptive des stimuli explorés ou bien à l'intégration en mémoire des données visuo-spatiales (construction de représentations unifiées des dessins).

1.2. Représentation et organisation de l'exécution de dessins géométriques complexes suite à la présentation imagée d'informations locales et globales (expérience 2)

L'expérience 1 a notamment permis de mettre en évidence l'incidence de la modalité perceptive d'exploration des stimuli dans l'émergence du PEC. Ce dernier s'est avéré plus prégnant en modalité visuelle qu'en modalité haptique. Nous avons également pu observer une certaine stabilité du PEC entre 6 et 8 ans, dans les deux conditions d'exploration, suggérant l'intervention de processus semblables (de même nature) chez les deux groupes d'âge et dans les deux situations expérimentales. Toutefois, nous n'avons pas été véritablement en mesure de déterminer les processus susceptibles d'expliquer de tels résultats. En effet, les mécanismes à l'origine de l'usage plus important du PEC en exploration visuelle peuvent être de nature 1) perceptive : l'effet de la modalité sensorielle d'exploration résulterait d'une appréhension perceptive globale des stimuli rendue possible uniquement en modalité visuelle, ou/et 2) représentationnelle/mnésique : l'effet de la modalité perceptive d'exploration serait lié à des processus relatifs à l'intégration en mémoire des propriétés visuo-spatiales encodées, c'est-à-dire à la construction de représentations unifiées des dessins intégrant de manière cohésive l'ensemble des informations contenues dans les stimuli explorés. Dans le premier cas, la plus forte prégnance du PEC en exploration visuelle serait due à la plus grande sensibilité de cette modalité aux propriétés configurationnelles (l'usage privilégié du PEC reflétant alors l'existence d'une propriété émergente). Dans le deuxième cas, l'adoption moins fréquente du PEC en exploration haptique résulterait de la plus grande difficulté de rétention des informations encodées dans cette modalité sensorielle.

Dans l'expérience qui suit, nous soumettons deux types de tâches à des enfants de 6, 8 et 10 ans, l'une de copie² de dessins (mettant donc en jeu les mêmes mécanismes que ceux mobilisés dans la tâche de l'expérience 1), l'autre de résolution d'un problème basée sur la coordination d'informations locales. Nous formulons l'hypothèse selon laquelle la mise en œuvre du PEC est sous-tendue par des mécanismes distincts dans chacune de ces deux tâches : l'émergence de cette stratégie d'exécution relèverait de processus de bas niveau relatifs à l'appréhension perceptive des modèles présentés dans la tâche de copie, alors que dans la tâche requérant la coordination d'informations locales, elle s'appuierait sur des processus de haut niveau ayant trait à la construction de représentations globales intégrant de manière cohésive les données du problème. Afin de tester cette hypothèse, nous nous appuyons sur le principe du « fractionnement développemental » exposé dans l'expérience précédente. Ainsi, si l'interaction âge \times tâche s'avère significative, nous pourrions conclure que les deux tâches que nous soumettons aux enfants font appel à des processus de nature différente.

1.2.1. Méthode

1.2.1.1. Population

90 enfants issus d'écoles publiques de la région lyonnaise ont participé à l'expérience. Ils étaient répartis équitablement en trois groupes d'âge (ou trois niveaux scolaires : CP, CE2 et CM2, respectivement) : 6 ans (âge moyen : 6 ; 5 ans ; s=4 mois), 8 ans (âge moyen : 8 ; 6 ans ; s=4 mois) et 10 ans (âge moyen : 10 ; 5 ans ; s=4 mois).

1.2.1.2. Tâches

Les participants étaient invités à effectuer individuellement une tâche résidant dans l'exécution successive de trois dessins complexes comportant quatre formes géométriques simples emboîtées.

La moitié des enfants copiait trois items composés de quatre figures géométriques simples emboîtées (cf. figure 13 : tâche A). Chacun des stimuli figurait au centre d'une « carte » (feuille de papier rectangulaire de 9 \times 12 cm), le sujet tirant au sort tour à tour l'une des cartes au cours de la tâche.

L'autre moitié devait résoudre un problème consistant à exécuter une série de trois dessins à partir d'informations locales (cf. figure 13 : tâche B). Il disposait alors de deux images issues de la décomposition des stimuli présentés dans la tâche A. Chacune des paires de dessins figurait sur une carte, les deux dessins d'une même paire étant l'un en dessous de l'autre et décalés sur l'axe vertical (comme indiqué sur la figure 13). Chaque dessin renseignait le sujet sur les positions relatives de trois des quatre formes élémentaires, à partir desquelles devait être reconstitués les dessins complets attendus (dessins-cibles), en respectant les caractéristiques visuo-spatiales de ce dernier. Les items proposés dans cette deuxième condition étaient tels que la mise en œuvre du PEC nécessitait une coordination (construction de représentations globales) des informations visuo-spatiales

² Nous admettrons une acception du terme « copie » (ou plus largement du dessin) moins stricte que celle classiquement admise de la simple reproduction de modèles graphiques par le tracé (Baldy, 2002), dont la réussite ou la qualité dépend notamment du niveau de contrôle ou de précision gestuel nécessaire dans le maniement (tenue et déplacements) de l'instrument utilisé (le plus souvent le crayon) sur le support graphique (en général la feuille de papier). Nous appellerons ici également « copie » la reproduction de dessins par superposition de transparents (assemblage de formes élémentaires), qui requiert peu de maîtrise motrice.

issues des deux dessins présentés (la prise en compte séquentielle de l'un des dessins puis de l'autre pour exécuter les productions ne pouvait conduire à l'adoption du PEC).

Les formes élémentaires de chacun des dessins exécutés ainsi que leurs positions relatives étaient identiques à celles des stimuli utilisés par Magnan et al. (1999, 2000). Cependant, afin d'éviter que dans la situation de présentation morcelée des informations les enfants n'infèrent intuitivement (sans réelle déduction) la position de la figure élémentaire manquante dans chacun des dessins contenus dans une même paire, uniquement sur la base d'indices de régularités perceptives relatives à la présence ou à l'absence de points de tangence (cas où toutes les figures élémentaires voisines seraient tangentes, les formes non voisines ne l'étant pas) ou à la distance entre les différentes formes simples (dans le cas où celles-ci seraient régulièrement espacées), certaines formes voisines étaient tangentes alors que d'autres ne l'étaient pas.

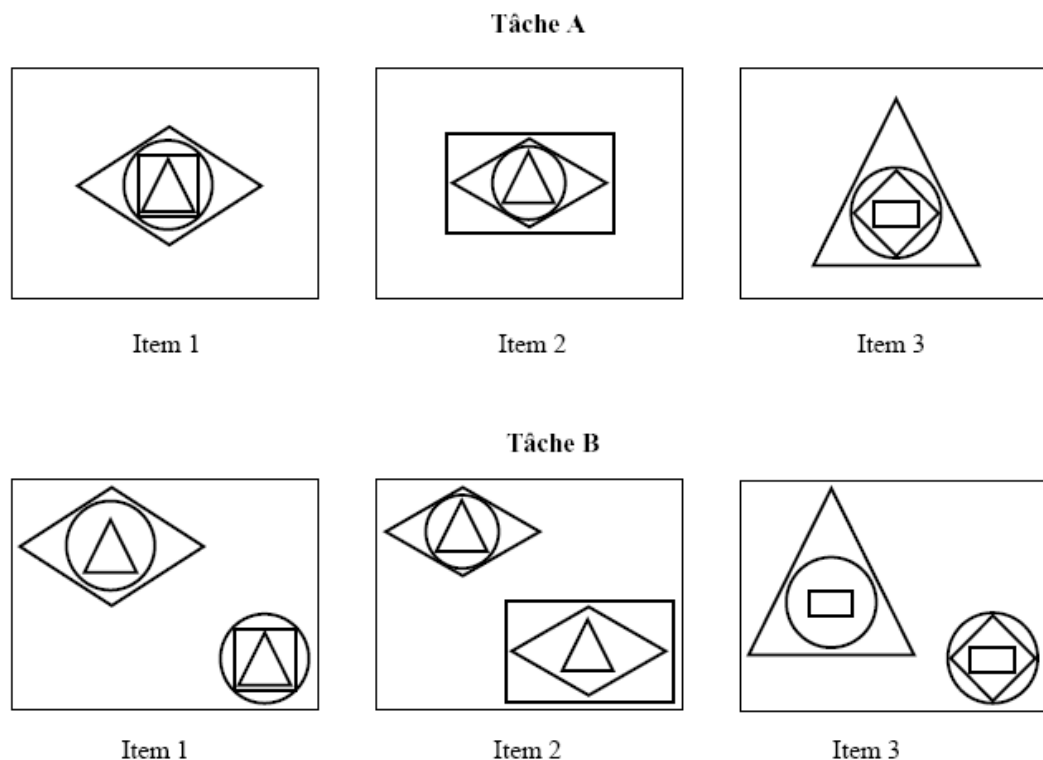


Figure 13 : Items (cartes) présentés aux enfants (échelle : 2/5). Tâche A : présentation globale des dessins à exécuter ; Tâche B : présentation morcelée des dessins à exécuter.

Par ailleurs, notre travail portant non pas sur les habiletés grapho-motrices des enfants mais exclusivement sur la manière dont ces derniers encodent et se représentent les données du problème posé, nous avons ici repris la méthode de production des dessins par superposition de transparents utilisée par Magnan et al. (1999). Pour chacun des modèles, l'enfant disposait d'une série de transparents (12×9 cm). Au centre de chacun d'eux figurait une forme géométrique élémentaire. Le sujet était alors invité à reconstituer chacun des modèles successivement explorés par superposition des transparents. Suite à la présentation d'un item, l'expérimentateur disposait (dans un ordre aléatoire) devant le sujet les différents transparents. Ces derniers étaient éparpillés sur une planche rectangulaire (30×42 cm) cartonnée blanche (afin de rendre nettement visibles les formes élémentaires) posée sur le plan de travail horizontal, en conservant l'orientation dans laquelle les formes avaient été explorées (le coin inférieur droit de chacun des transparents était coupé afin que l'expérimentateur oriente correctement et rapidement ces derniers). L'enfant exécutait les dessins en déposant tour à tour les transparents dans une boîte rectangulaire à bords bas (1 cm de haut) et fond blanc (de mêmes dimensions que les transparents). Il lui était précisé qu'une fois un transparent déposé, ce dernier ne pouvait être repris ou déplacé, ceci afin de l'inciter à planifier son action.

La consigne donnée aux enfants en situation de présentation globale des dessins était la suivante : « Je vais te montrer un dessin. Ce sera le modèle. Il faudra que tu refasses le dessin en mettant dans la boîte les unes sur les autres des petites feuilles en plastique qui seront éparpillées sur le papier blanc. Tu choisiras dans quel ordre tu déposeras les feuilles dans la boîte, mais à chaque fois que tu mettras une feuille dans la boîte tu ne pourras plus la récupérer pour te corriger. Attention de ne rien oublier ».

En situation de présentation morcelée, les instructions étaient celles-ci : « On a pris deux photographies d'un même dessin complet. On a donc obtenu deux images identiques. Mais, par la suite, on a enlevé une partie du dessin complet dans chacune des photographies. Les deux images incomplètes n'étaient alors plus pareilles. En te servant des deux images incomplètes qui seront sur la feuille que je vais placer juste à côté de toi, tu devras retrouver et faire le dessin complet qui avait été photographié au départ, en mettant dans la boîte les unes sur les autres des petites feuilles en plastique qui seront éparpillées sur le papier blanc. Tu choisiras dans quel ordre tu déposeras les feuilles dans la boîte, mais à chaque fois que tu mettras une feuille dans la boîte tu ne pourras plus la récupérer pour te corriger. Attention de ne rien oublier ».

Pour les trois items présentés dans chacune des deux conditions, l'expérimentateur relevait l'ordre de superposition des transparents.

1.2.2. Résultats

Nous avons procédé à l'analyse de la variance selon le plan $S < A2 \times T2 >$ où A désigne le groupe d'âge et T la tâche effectuée, en considérant comme variable dépendante le nombre d'observations du PEC (valeur comprise entre 0 et 3, chacun des sujets produisant trois dessins ; les procédés d'exécution non centripètes adoptés par les enfants figurent en annexe 2). Celle-ci a révélé l'effet significatif de la tâche ($F(1,84)=31,96$; $p<.0001$). Comme attendu, les enfants ont davantage recours au PEC dans la tâche de copie que dans celle de la coordination d'informations locales (cf. figure 14). Cet effet résulte vraisemblablement de la plus grande difficulté de construction de représentations unifiées des stimuli lorsque les sujets disposent d'une présentation morcelée des dessins que lorsqu'ils bénéficient d'une présentation globale offrant une perception directe des dessins à exécuter. L'élaboration de représentations cohésives intégrant les propriétés d'ensemble des dessins s'avère donc

nécessaire dans la mise en œuvre du PEC uniquement dans la tâche de coordination d'informations locales.

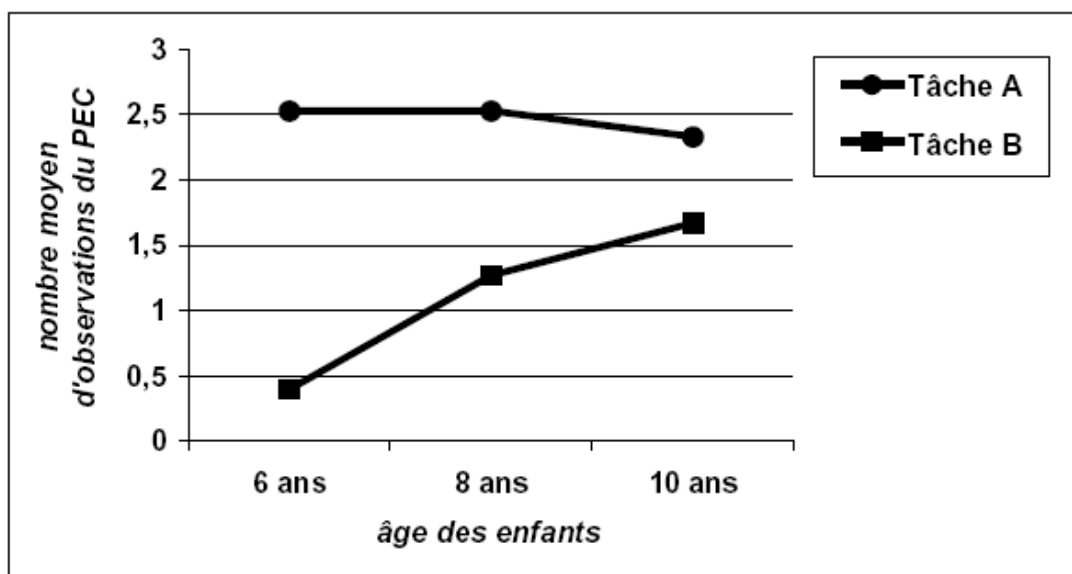


Figure 14 : Fréquence moyenne d'observations du PEC en fonction de l'âge des enfants, pour chacune des tâches.

Par ailleurs, l'ANOVA a permis de mettre en évidence l'interaction significative âge \times tâche ($F(1,84)=4,08$; $p<.05$). Comme l'illustre la figure 14, l'évolution du PEC au cours du développement varie selon la tâche effectuée, la différence entre les deux tâches quant à la fréquence d'apparition du PEC se réduisant considérablement entre 6 et 10 ans. On remarque nettement la différence d'évolution au cours du développement entre les deux tâches quant à l'émergence du PEC : alors que ce principe s'avère stable entre 6 et 10 ans dans la situation de simple copie des dessins (tâche A), il devient de plus en plus prégnant lorsqu'un travail de coordination des informations locales est requis (tâche B), rendant plus difficile la construction de représentations unifiées. L'analyse des contrastes (tests de comparaisons planifiées) a montré que les fréquences moyennes d'adoption du PEC dans les trois groupes d'âge ne se distinguent pas significativement dans la situation de présentation globale (tâche A), celles-ci atteignant 2,53 chez les enfants de 6 et 8 ans ($s=0,92$ et $s=1,06$, respectivement) et 2,33 ($s=1,23$) chez les enfants de 10 ans, tandis que dans le cas de la présentation morcelée des dessins (tâche B), le nombre moyen d'enfants adoptant cette stratégie d'exécution augmente significativement au cours du développement : les fréquences moyennes d'observations de celle-ci chez les enfants de 6, 8 et 10 ans sont respectivement de 0,40 ($s=0,91$), 1,27 ($s=1,16$) et 1,67 ($s=1,45$). L'analyse des contrastes montre que les enfants de 6 ans ont significativement moins souvent recours au procédé de l'exécution centripète que les enfants de 8 ans ($F(1,84)=4,35$; $p<.05$) et que ceux de 10 ans ($F(1,84)=9,30$; $p<.01$).

1.2.3. Discussion

Les données issues de cette deuxième expérience rendent compte de la mise en jeu de mécanismes différents dans chacune des deux tâches proposées. En effet, l'évolution relative à l'usage du PEC au cours du développement varie sensiblement entre les deux épreuves, ce qui conforte l'idée selon laquelle les processus à l'œuvre dans la copie des

dessins ne sont pas de même nature que ceux qui sous-tendent l'émergence du PEC dans la situation de la présentation d'informations locales devant être coordonnées.

On relève que, dans la condition de simple copie, le PEC est déjà très prégnant chez les enfants les plus jeunes, et s'avère stable entre 6 et 10 ans. Ces résultats nous amènent à penser que les mécanismes qui opèrent dans cette tâche seraient basiques et présents précocement au cours du développement. L'émergence du PEC reflèterait alors le mode d'appréhension visuelle des stimuli explorés. Les enfants percevraient ces derniers de la périphérie vers le centre. On peut supposer que ce mode d'appréhension perceptive régissant l'organisation de l'exécution des dessins s'installerait bien avant six ans, dans la mesure où, à cet âge, le PEC s'avère déjà très prégnant et n'évolue guère dans les années qui suivent. Cette stabilité précoce du PEC dans la situation de copie suggère donc que les processus sous-tendant l'émergence de ce procédé d'exécution (dont il semblerait qu'ils soient complètement établis à six ans) seraient de nature sensorielle.

En revanche, dans la situation de la présentation d'informations locales, le PEC évolue de façon croissante au cours du développement. Nous avons observé une augmentation considérable de la fréquence d'apparition du PEC entre 6 et 8 ans (celle-ci triplant dans cette période). De plus, cette évolution se poursuit après l'âge de 8 ans (même si nous n'avons pas relevé de différence significative entre les enfants de 8 et 10 ans quant à l'usage du PEC), et pourrait bien perdurer après l'âge de 10 ans, étant donnée la marge de progression encore possible (à dix ans, les enfants ont en moyenne recours au PEC dans à peine plus de la moitié des dessins exécutés). La tâche alors effectuée requiert des aptitudes qui feraient défaut chez les enfants les plus jeunes, mais qui se développeraient rapidement entre 6 et 10 ans. Ces capacités pourraient avoir trait à l'activité inférentielle ainsi qu'au maintien et à l'intégration des informations en mémoire.

La tâche fait en effet appel à une activité inférentielle dans la mesure où la mise en œuvre du PEC dans la résolution du problème posé suppose la déduction des positions relatives des figures géométriques élémentaires constitutives des dessins-cibles, par la coordination des informations locales. On note d'ailleurs que la grande majorité des enfants n'ayant pas recours au PEC adoptent un procédé d'exécution consistant à superposer successivement les trois formes simples contenues dans l'une des deux images (du reste le plus souvent dans un ordre centripète) puis à ajouter la figure élémentaire manquante contenue dans la deuxième image. Au cours du développement, cette démarche séquentielle, essentiellement perceptive (l'enfant copie une première image, puis considère la seconde, ce qui le conduit à reconstituer le dessin-cible), laisserait progressivement place au PEC, dont l'adoption reflèterait la capacité de construction de représentations non plus seulement composées d'informations sensorielles mais comprenant des images internes (Case, 1985) et celle de coordination des informations locales de l'enfant (Case & Okamoto, 1996). Ce dernier se représenterait alors de manière globale le dessin-cible, en inférant la position de la forme élémentaire absente dans l'une des deux images. L'enfant planifierait alors son action (ordre de superposition des formes élémentaires) à partir de la construction d'une représentation unifiée du dessin-cible (intégrant les quatre formes élémentaires contenues dans ce dernier).

Aussi, l'activité inférentielle sur laquelle repose le PEC (opération de planification de l'action à partir de la coordination d'informations locales) impliquerait la capacité de mémoire des enfants. Cette hypothèse est en accord avec les théories de traitement de l'information défendant l'idée que les capacités de résolution de problèmes sont notamment liées aux développements neurologiques, qui accroissent la mémoire de travail (Baddeley, 1996 ; Case & Okamoto, 1996). Les jeunes enfants utiliseraient plus rarement le PEC que

les sujets plus âgés parce qu'ils ne pourraient maintenir en mémoire de travail plusieurs bribes d'information. L'opération de planification de l'action intervenant dans la résolution du problème ici posé pourrait en particulier être conditionnée par les capacités attentionnelles ou de stockage de l'information, permettant la rétention de cette dernière d'une étape à la suivante et constituant pour l'enfant un moyen de se concentrer (Case, 1985, 1988, 1992 ; Costermans, 1998 ; De Ribeaupierre, 1997).

Ainsi, l'évolution ascendante relative à l'émergence du PEC dans la tâche de coordination d'informations locales pourrait s'expliquer à la fois par l'accroissement au cours du développement des compétences inférentielles en jeu dans l'opération de planification de l'action sur laquelle s'appuie la mise en œuvre du PEC et des capacités attentionnelles ou de maintien des informations en mémoire, cette dernière assurant la cohésion des données dans le processus d'intégration (construction de représentations unifiées des dessins-cibles). L'activité inférentielle reposerait du reste sur la rétention des informations partielles encodées puis coordonnées, autrement dit sur la capacité de maintien des informations traitées dans les différentes étapes successives (sous-buts) de la résolution du problème. A travers la comparaison d'enfants présentant un THADA (trouble hyperactif avec déficit attentionnel) et d'enfants normaux (sans trouble attentionnel), l'expérience qui suit a pour but d'établir si la mise en œuvre du PEC dans la résolution du problème de coordination d'informations locales (présentation morcelée des dessins) est conditionnée ou non par la capacité de maintien des données en mémoire.

1.3. L'incidence des troubles attentionnels sur l'émergence du PEC (expérience 3)

Cette troisième expérience vise à rendre compte du rôle de l'attention dans l'émergence du PEC, dans la copie de dessins complexes composés de formes géométriques élémentaires emboîtées et dans la résolution d'un problème d'exécution de ces mêmes dessins requérant l'intégration en mémoire d'informations visuo-spatiales locales (réplication de l'expérience 2). Nous avons vu qu'en situation de copie, l'émergence du PEC serait essentiellement liée au mode d'appréhension ou de structuration perceptive des stimuli, et mobiliserait alors peu les capacités mnésiques de l'enfant. En revanche, en situation de présentation morcelée ou partielle des stimuli, la mise en œuvre du PEC repose nécessairement sur la coordination des informations locales (prise en compte des deux images fournies), permettant une intégration cohésive des données du problème. Aussi, cette opération sollicite les ressources attentionnelles de l'enfant. Un déficit ou trouble attentionnel perturbant le maintien en mémoire des informations encodées ainsi que leur sélection (attention « discontinue »), et par conséquent l'intégration cohésive de celles-ci au sein d'une représentation globale, rendrait donc difficile le travail de planification de l'action sous-tendant l'élaboration de la stratégie de l'exécution centripète.

C'est pourquoi nous formulons l'hypothèse selon laquelle des enfants atteints de THADA (trouble hyperactif avec déficit attentionnel), présentant un tel déficit (groupe test), seraient moins enclins à adopter le PEC que des enfants normaux (groupe contrôle d'enfants ne présentant pas de déficit attentionnel) dans la tâche de coordination des informations locales, alors que dans la tâche de copie, l'émergence du PEC ne serait pas conditionnée par les capacités attentionnelles des enfants, celui-ci étant alors déterminé par le mode d'appréhension perceptive des stimuli explorés (interaction groupe \square tâche).

1.3.1. Méthode

1.3.1.1. Population

18 enfants répartis équitablement en deux groupes, appareillés en âge, ont participé à l'expérience : un groupe d'enfants « normaux » (âge moyen : 10 ; 5 ans, $s=15$ mois) et un groupe d'enfants présentant un THADA (âge moyen : 10 ; 1 ans, $s=11$ mois). Les premiers provenaient d'écoles primaires publiques de la région lyonnaise (issus de classes de CE1, CE2, CM1 et CM2), les seconds étaient vus à l'occasion de consultations neuropsychologiques dans un centre hospitalier de cette même région³. Les enfants présentant un THADA étaient scolarisés dans des établissements classiques et avaient une intelligence normale ($QI>80$). On relève notamment dans l'étiologie du THADA une agitation motrice, une impulsivité dans les comportements et une difficulté de concentration (dispersion de la pensée), dont l'ampleur est variable (American Psychiatric Association, 2004). Les principales caractéristiques des deux groupes d'enfants figurent en annexe 3a.

1.3.1.2. Tâches

Les tâches étaient celles utilisées dans l'expérience 2. Les deux conditions relatives à la tâche étaient cette fois appariées : chacun des enfants effectuait d'abord la tâche de coordination d'informations locales (tâche B), puis la tâche de copie (tâche A), dans cet ordre afin que la tâche de coordination ne soit pas facilitée par l'exposition préalable de l'enfant aux dessins-cibles correspondant aux différents stimuli présentés dans la tâche de copie. De plus, cette dernière ne requérant pas le maintien en mémoire des informations visuo-spatiales et ne nécessitant pas d'opération mentale de transformation, mais reflétant le mode d'appréhension perceptive des stimuli explorés (manière dont l'enfant perçoit spontanément les différents modèles), les informations provenant de la tâche de coordination effectuée auparavant s'avéraient inutiles, sans intérêt (la réalisation de la tâche de coordination ne constituerait en aucune façon une aide ou une source d'information à l'origine de l'émergence du PEC dans la tâche de copie, cette deuxième tâche étant avant tout perceptive et par conséquent beaucoup moins complexe que la première) et donc sans incidence sur la copie des dessins.

1.3.2. Résultats

L'analyse de la variance selon le plan $S < T2 > * G2$ (où T désigne la tâche et G le groupe) a révélé un effet significatif de la tâche ($F(1,16)=15,06$; $p<.01$). Comme l'illustre la figure 15, les enfants recourent plus souvent au PEC dans la tâche de copie que dans celle de coordination d'informations locales (pour les procédés d'exécution non centripètes adoptés par les enfants dans cette expérience, se reporter à l'annexe 3b). En revanche, l'effet du facteur « groupe » n'est pas significatif, de même que l'interaction âge \square groupe ($F<1$).

³ Nous remercions Vania Herbillon, neuropsychologue au Centre Hospitalier Lyon Sud, pour nous avoir permis de tester les enfants THADA.

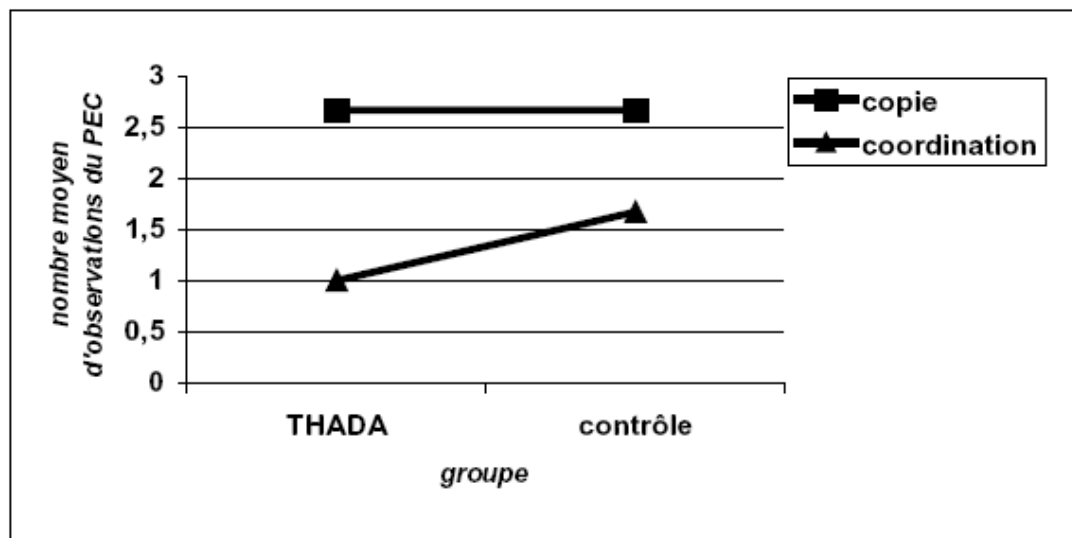


Figure 15 : Nombre moyen d'observations du PEC dans chacune des tâches, en fonction du groupe.

Ainsi, les résultats font état d'un recours aussi massif du PEC chez les enfants présentant un THADA que chez ceux sans trouble attentionnel dans la tâche de copie, et d'un usage relativement stable entre les deux groupes mais beaucoup moins systématique de cette même stratégie d'exécution dans la résolution du problème de coordination d'informations locales.

1.3.3. Discussion

Les interprétations que nous proposons doivent être considérées avec prudence et relativité, en raison des faibles effectifs constituant nos deux groupes expérimentaux (neuf enfants dans chacun d'eux).

Néanmoins, les résultats de cette expérience ont, comme attendu, montré l'effet de la tâche sur l'émergence du PEC. Si l'adoption de la stratégie de l'exécution centripète est dans chacune des deux épreuves, sous-tendue par un traitement holistique des données, la tâche de copie s'avère plus propice à ce dernier, dans la mesure où, contrairement à la tâche de coordination d'informations locales, elle ne nécessite pas une quelconque opération mentale visant à établir les relations spatiales existant entre les différentes figures géométriques simples constitutives des dessins.

Toutefois, les résultats suggèrent également que la présence d'un déficit attentionnel n'a pas d'incidence sur le PEC, quelle que soit la tâche (interaction groupe \times tâche non significative). Il semblerait donc que, dans la résolution du problème de coordination d'informations locales, la mise en œuvre du PEC ne soit pas déterminée par la capacité de maintien en mémoire des informations visuo-spatiales intervenant dans la construction de représentations unifiées ou globales des dessins-cibles. L'adoption de cette stratégie d'exécution serait donc plus vraisemblablement liée à une activité inférentielle ayant pour objet la définition des positions relatives des différentes formes élémentaires composant les dessins-cibles, et ne requérant pas d'importantes capacités mnésiques. D'ailleurs, l'enfant disposant des deux images tout au long de la tâche de coordination, celui-ci n'est pas contraint d'élaborer une représentation globale des dessins-cibles (travail d'intégration en mémoire des informations visuo-spatiales), mais peut simplement procéder

méthodiquement par comparaison perceptive des éléments contenus dans chacune des deux images afin d'inférer les positions relatives des formes élémentaires. Les inférences spatiales ainsi réalisées ne feraient donc pas appel à la capacité de maintien en mémoire des données encodées, nécessaire dans l'élaboration de représentations globales des dessins-cibles. Il semblerait que les enfants présentant un THADA soient en mesure de procéder à de telles inférences et ainsi de planifier leur action lorsque la situation mobilise peu de ressources mnésiques.

1.4. Discussion générale

Ces trois premières expériences ont permis de mettre en évidence la nature des processus sous-jacents à l'émergence du PEC dans la copie et la résolution du problème de coordination d'informations locales, ainsi que l'évolution de ces mécanismes au cours du développement.

Dans la tâche de copie, l'adoption du PEC serait liée à l'appréhension perceptive des stimuli. Les mécanismes sous-jacents à l'émergence du PEC seraient donc essentiellement sensoriels, ce qui expliquerait l'usage massif de cette stratégie d'exécution dès 6 ans et sa stabilité au cours du développement (expériences 1 et 2) et sa prégnance en dépit de capacités attentionnelles réduites (expérience 3).

La mise en œuvre du PEC dans la résolution du problème de coordination d'informations locales mettrait quant à elle en jeu une activité inférentielle, visant à établir les positions relatives des formes élémentaires constitutives des dessins-cibles. Alors que nous avons émis l'hypothèse selon laquelle la coordination des données issues des deux images présentées implique une capacité de maintien en mémoire des informations visuo-spatiales, les résultats de l'expérience 3 suggèrent que l'activité inférentielle sur laquelle se fonde la tâche n'implique pas la construction de représentations unifiées ou globales des dessins-cibles. En effet, l'absence de différence significative quant à la mise en œuvre du PEC entre les enfants présentant un THADA et ceux sans trouble attentionnel est en faveur de l'idée selon laquelle l'adoption de la stratégie de l'exécution centripète dans la résolution du problème de coordination d'informations locales n'est pas liée à la capacité de rétention des informations encodées. Aussi, l'augmentation de la fréquence d'usage du PEC entre 6 et 10 ans (expérience 2) dans cette même tâche s'expliquerait ici non pas par l'accroissement de la capacité de maintien en mémoire des informations (Case, 1985 ; Gallina, 1998 ; Pascual-Leone, 2000 ; Siegler, 2001), mais avant tout par une évolution relative à la planification de l'action, définie sur la base d'inférences spatiales.

Cependant, si la résolution du problème de coordination d'informations locales n'apparaît pas dépendre de la capacité de construction de représentations globales ou de « modèles spatiaux » (Blanc & Tapiero, 2000 ; Johnson-Laird, 1983 ; Kulhavy, Stock, Verdi, Rittschoff & Savenye, 1993 ; Perrig & Kintsch, 1985 ; Van Dijk & Kintsch, 1983) des dessins-cibles, c'est sans doute parce que la tâche contient un nombre restreint de données et d'inférences. Une seule inférence est ici suffisante, puisque chacune des deux images d'un même item contient trois des quatre formes géométriques élémentaires du dessin-cible, la forme géométrique manquante figurant sur l'autre image, ce qui permet à l'enfant de déduire sans difficulté les positions relatives des figures géométriques simples, et n'incite donc pas la construction de représentations globales des dessins-cibles. L'augmentation de la quantité d'informations à encoder (nombres de formes élémentaires constitutives des dessins-cibles) et/ou du nombre d'inférences (augmentation du nombre de formes élémentaires manquantes dans chacune des images devant être coordonnées et/ou du nombre de ces dernières), autrement dit de la charge de travail en mémoire, pourrait

permettre de mettre en évidence une relation (corrélation) entre le nombre d'observations du PEC et la capacité de maintien en mémoire des informations (nombre d'items correctement rappelés). Dès lors, la mise en œuvre du PEC ne pourrait s'appuyer sur la déduction des positions relatives des formes élémentaires sur la base d'indices perceptifs (par simple comparaison des images), mais requièrerait l'élaboration de représentations unifiées des dessins-cibles, englobant l'ensemble des propriétés de ces derniers.

2. L'influence des propriétés visuelles dans la reproduction de dessins géométriques complexes (expériences 4 et 5)

Les résultats issus des expériences précédentes suggèrent qu'en situation de copie, l'émergence du PEC serait liée essentiellement au mode d'appréhension perceptive des informations visuo-spatiales. D'une part, l'expérience 1 a révélé une plus grande fréquence d'usage du PEC en exploration visuelle comparativement à l'exploration haptique qui peut s'expliquer par le fait que la modalité visuelle, contrairement à la modalité haptique, permet un traitement holistique ou une appréhension globale des stimuli rendant ce système perceptif particulièrement sensible aux propriétés configurationnelles. Or l'adoption massive du PEC pourrait précisément découler de l'existence d'une propriété émergente liée aux caractéristiques visuo-spatiales des dessins (un emboîtement de formes élémentaires). De plus, l'expérience 2 a conforté l'hypothèse selon laquelle, en situation de copie, l'émergence du PEC est avant tout liée à des mécanismes perceptifs de bas niveau plutôt qu'à des processus centraux ayant trait au système représentationnel, relatifs à l'intégration en mémoire des informations visuo-spatiales encodées. Ainsi, il semble que, dans la reproduction de dessins complexes composés de formes géométriques élémentaires emboîtées, l'émergence du PEC soit conditionnée par le mode d'appréhension perceptive des stimuli.

Les deux expériences qui suivent ont pour but d'évaluer, au cours du développement, l'impact de propriétés visuelles sur l'organisation de l'exécution de dessins composés de formes géométriques élémentaires emboîtées. Nous testons l'effet de la saillance visuelle (expérience 4) puis celui des irrégularités de forme et de couleur (expérience 5) sur l'émergence du PEC.

2.1. L'effet de la saillance visuelle sur l'émergence du PEC (expérience 4)

Dans cette expérience, nous testons l'effet de la saillance visuelle sur l'émergence du PEC, chez des enfants de 5 à 8 ans auxquels nous soumettons une tâche de copie de dessins complexes composés de figures géométriques simples emboîtées. Afin d'étudier l'effet de la saillance visuelle sur le PEC, nous présentons deux types de modèles aux enfants : 1) des modèles constitués de formes élémentaires uniformes ou homogènes du point de vue de leur typographie, et 2) des modèles comprenant une forme élémentaire rendue visuellement plus prégnante que les autres par une augmentation de l'épaisseur de ses contours.

Nous formulons l'hypothèse que la saillance visuelle est susceptible de conditionner l'émergence du PEC, en modifiant l'appréhension perceptive des dessins présentés aux enfants. Ces derniers pourraient alors focaliser leur attention localement sur les informations les plus saillantes (qui constitueraient donc des distracteurs), ce qui perturberait l'organisation de l'exécution des dessins (émergence du PEC). Toutefois, nous prédisons une diminution progressive de l'effet de la saillance visuelle au cours du développement (interaction âge × type de dessins), traduisant un accroissement de la capacité de désengagement de l'attention ou d'inhibition des informations non pertinentes

(Ward & Scott, 1987), donnant lieu à l'adoption plus massive d'un mode de traitement global chez les enfants les plus âgés (Thibaut & Gelaes, 2002), favorisant ainsi l'émergence du PEC.

2.1.1. Méthode

2.1.1.1. Population

120 enfants issus d'écoles maternelles (provenant de classes de GSM) et primaires (appartenant à des classes de CP, CE1 et CE2) de la région lyonnaise ont participé à l'expérience. Ceux-ci étaient répartis équitablement en quatre groupes d'âge constitués d'enfants de 5 ans (âge moyen : 5 ; 4 ans, s=4 mois), 6 ans (âge moyen : 6 ; 5 ans, s=4 mois), 7 ans (âge moyen : 7 ; 5 ans, s=3 mois) et 8 ans (âge moyen : 8 ; 6 ans, s=4 mois).

2.1.1.2. Tâche

Chacun des participants devait reproduire une série de quatre dessins complexes composés de quatre formes géométriques simples emboîtées, présentées visuellement et dans un ordre aléatoire (la procédure se déroulant comme dans l'expérience 2, par tirage au sort de cartes de dimensions 9×12 cm, au centre desquelles figurait l'un des modèles). Les stimuli utilisés sont présentés sur la figure 16.

La moitié des enfants de chaque groupe d'âge reproduisait des modèles pour lesquels la saillance de l'une des formes élémentaires intermédiaires (c'est-à-dire une des deux figures situées entre la figure la plus extérieure et celle la plus intérieure) apparaissait plus saillante (celles-ci figuraient en caractère gras) que les autres formes élémentaires, alors que l'autre moitié des enfants reproduisait des modèles dans lesquels toutes les formes simples avaient la même saillance visuelle (typographie identique). Si les enfants focalisent leur attention sur l'élément le plus saillant et débutent leur exécution par celui-ci, alors le PEC devrait être moins prégnant dans la reproduction des modèles pour lesquels le caractère saillant de l'une des formes élémentaires a été intensifié (ces dernières ne se situant pas en périphérie, l'organisation de l'exécution privilégiée ne correspondra donc pas à l'ordre centripète).

Comme pour l'expérience précédente, l'exécution des dessins était réalisée par superposition de transparents (non seulement parce que nous nous intéressons dans le cadre de cette recherche uniquement à l'encodage des données visuo-spatiales et non aux habiletés grapho-motrices, mais également en raison de la difficulté de reproduction graphique de certaines formes constitutives des dessins, en particulier pour les enfants les plus jeunes ayant participé à l'expérience, dont certains n'avaient pas encore cinq ans).

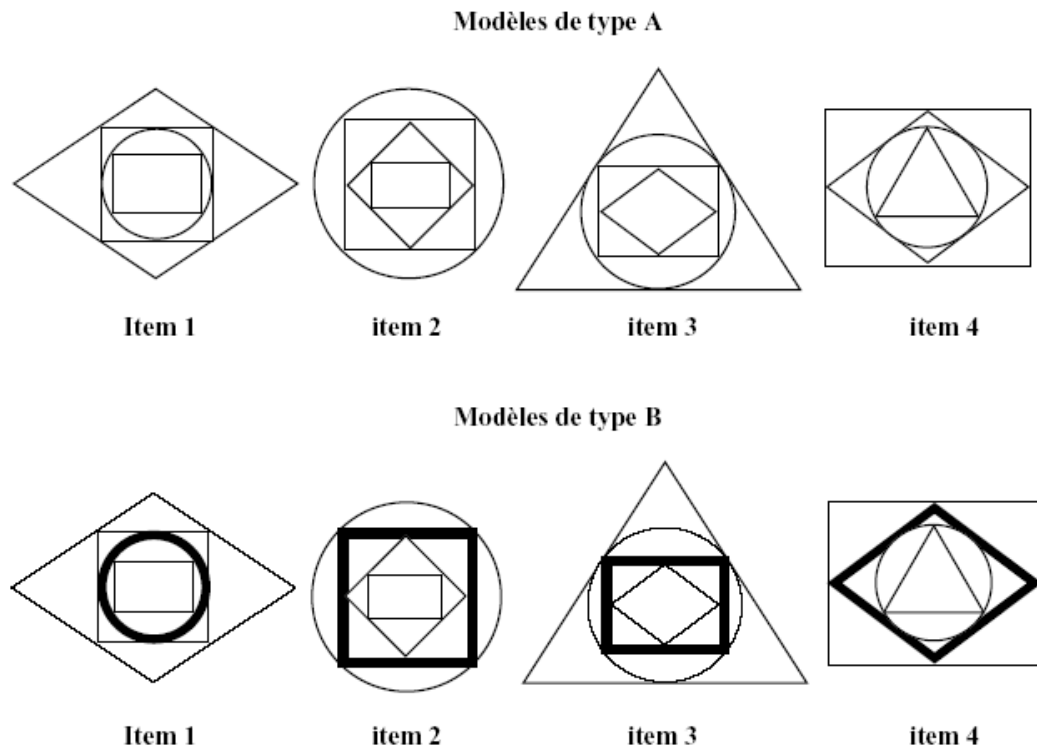


Figure 16 : Modèles présentés aux enfants (échelle : $\frac{1}{2}$). Type A : dessins composés de formes élémentaires ayant la même saillance visuelle ; Type B : dessins dont l'une des formes élémentaires intermédiaires apparaît plus saillante.

La consigne donnée aux enfants était similaire à celle utilisée dans la condition de présentation globale des dessins de l'expérience 2.

2.1.2. Résultats

L'ANOVA selon le plan $S \times A4 \times M2$ (où A désigne le groupe d'âge et M le type de modèles), portant sur le nombre d'occurrences du PEC (nombre compris entre 0 et 4, chacun des sujets reproduisant quatre dessins), a révélé un effet significatif du type de modèle ($F(1,112)=14,21$; $p<.001$) et de l'âge ($F(3,112)=2,76$; $p<.05$). Comme l'illustre la figure 17, les enfants ont plus souvent recours au PEC pour les dessins dont les formes simples présentent une uniformité typographique (type A) que pour ceux comportant une figure élémentaire visuellement plus saillante que les autres (type B).

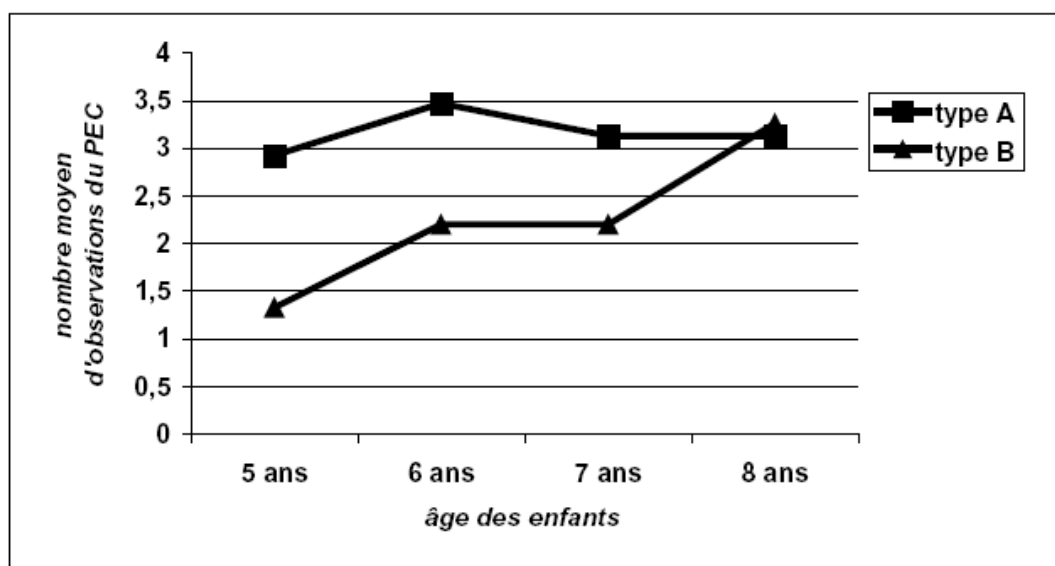


Figure 17 : Nombre moyen d'observations du PEC en fonction de l'âge des enfants, pour chacun des deux types de dessins.

L'analyse des contrastes (comparaisons planifiées) montre que seuls deux groupes d'âge se distinguent significativement quant à la fréquence moyenne d'usage du PEC, les enfants de 5 ans adoptant plus rarement ce procédé d'exécution que ceux de 8 ans ($F(1,112)=8,08$; $p<.01$). L'interaction âge \times modèle n'est quant à elle pas significative.

2.1.3. Discussion

Les résultats obtenus dans cette expérience font état, d'une part, de la plus grande prégnance du PEC chez les enfants les plus âgés (8 ans) par rapport aux sujets les plus jeunes (5 ans), et d'autre part, de l'effet perturbateur de la saillance visuelle sur le PEC.

L'effet de l'âge pourrait s'expliquer par une évolution progressive relative au mode d'appréhension ou d'analyse perceptive des stimuli. Au cours du développement, le PEC devient un attracteur de plus en plus puissant. Ce phénomène pourrait traduire un changement dans la structuration perceptive des stimuli : les enfants les plus jeunes seraient davantage enclins à opérer un traitement analytique reposant sur la prise en compte des parties (informations locales) des dessins de façon isolée (sans considérer la totalité de l'information), alors que les enfants plus âgés percevraient de manière holistique les stimuli. Ce résultat serait en contradiction avec une conception du développement des capacités d'analyse perceptive selon une évolution croissante des traitements dimensionnels plutôt qu'holistiques, et donc avec l'idée que les enfants les plus jeunes « percevraient des dimensions séparables pour l'adulte [...] comme des tous analogues aux dimensions intégrales de l'adulte » (Thibaut & Gelaes, 2002, p. 487). Le développement de la perception de stimuli se caractériserait donc par une progression des traitements analytiques (Cook & Odom, 1992 ; Odom & Cook, 1996). Une raison liée à cette évolution serait qu'« au cours du développement, le système perceptif découvre un nombre croissant de dimensions mais devient également différenciellement sensible à celles déjà découvertes suite aux expériences perceptives » (Thibaut & Gelaes, 2002, p. 495). Mais nous constatons ici que les enfants les plus jeunes recourent moins souvent au PEC que les enfants les plus âgés. Or l'émergence de la stratégie de l'exécution centripète reflèterait une appréhension

globale des stimuli. Toutefois, il nous semble que les capacités d'analyse perceptive de stimuli renvoient à des traitements qui revêtent un caractère explicite, liés à des opérations réfléchies de discrimination, de classification ou de catégorisation. Dans la tâche de copie ici proposée, les stimuli pourraient faire l'objet d'un traitement global qui serait plus implicite, le PEC pouvant être considéré comme une propriété émergente. Aussi, cette dernière s'établirait progressivement au cours du développement (le PEC devenant un attracteur de plus en plus puissant) avec notamment l'acquisition de connaissances conceptuelles relatives aux formes géométriques (Satlow & Newcombe, 1998), qui automatiserait le processus de reconnaissance. Les connaissances conceptuelles plus réduites des enfants les plus jeunes (certaines figures géométriques, telles que le losange ou le triangle, ne sont généralement pas connues ou familières des enfants de 5 ans) induiraient une mobilisation de leurs ressources attentionnelles pour l'extraction des formes élémentaires, empêchant l'appréhension holistique (encodage simultané des différentes parties) des stimuli. L'incidence de la saillance visuelle sur ce principe pourrait d'ailleurs s'expliquer par l'existence de cette propriété émergente. Nous revenons plus précisément sur ce point dans ce qui suit.

L'effet perturbateur de la saillance visuelle sur le PEC pourrait être interprété comme la conséquence d'un traitement des stimuli sur un mode séquentiel. L'enfant focaliserait son attention sur l'élément le plus saillant, sans prendre en compte les propriétés d'ensemble des dessins. Le traitement opéré porterait donc dans un premier temps sur une information locale. Il en résulterait une représentation « morcelée » des stimuli. Toutefois, dans l'hypothèse où lors de l'exploration des stimuli les sujets engageraient leur attention sur l'élément le plus saillant en faisant abstraction des autres parties des dessins présentés, on peut supposer qu'ils débuteraient leur exécution par celui-ci. Or ce n'est pas le cas. Nous nous sommes intéressés aux stratégies d'exécution qu'utilisaient les enfants lorsqu'ils n'adoptaient pas le PEC pour reproduire les dessins comportant une figure élémentaire plus saillante que les autres, et plus précisément à la position de cette dernière dans l'ordre de superposition des formes géométriques simples. Les procédés d'exécution non centripètes adoptés par les enfants dans cette expérience figurent en annexe 4. Dans la figure 18, est indiquée pour chaque groupe d'âge, chez les enfants recourant à une stratégie d'exécution non centipète, la fréquence d'usage de chacun des quatre procédés d'exécution suivant la position de la figure saillante : initiale (PI), secondaire (PS), tertiaire (PT) ou finale (PF).

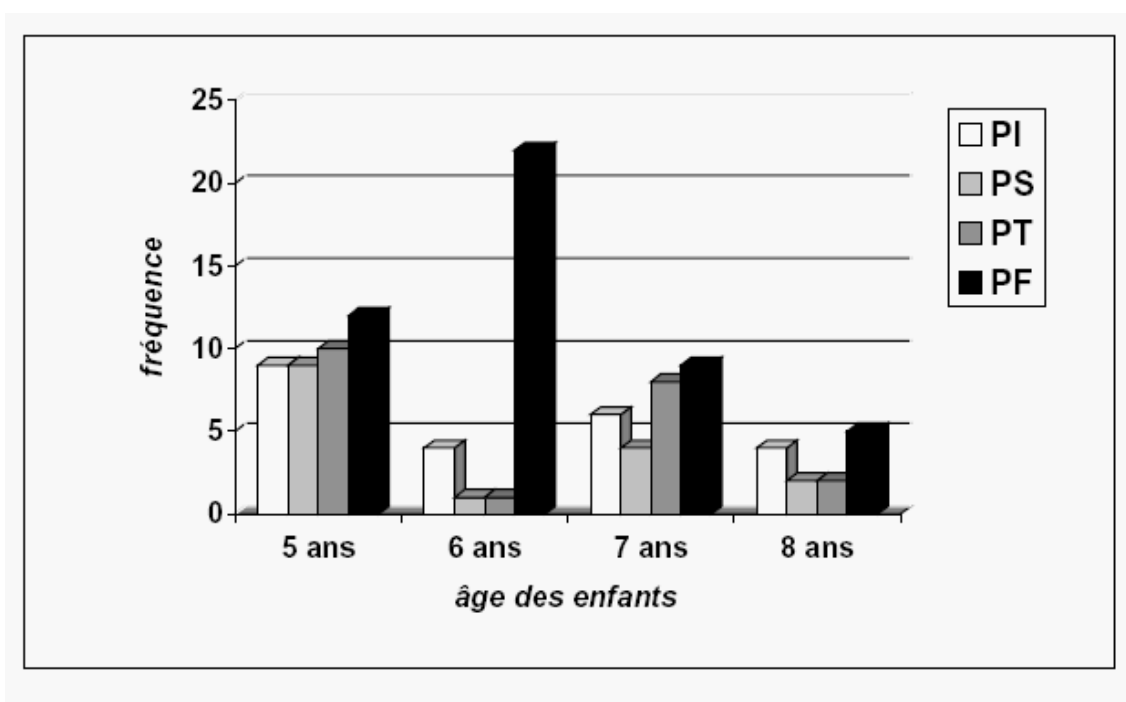


Figure 18 : Fréquence d'usage des stratégies d'exécution non centripètes suivant la position de la forme la plus saillante (dessins de type B) dans l'ordre de superposition des figures géométriques élémentaires, en fonction de l'âge des enfants.

Il ressort que, parmi les quatre stratégies d'exécution non centripètes selon la position de la forme la plus saillante dans l'ordre de superposition des figures géométriques élémentaires, la plus récurrente n'est pas la stratégie PI (qui est la deuxième stratégie la plus utilisée, celle-ci correspondant à environ 21% des procédés d'exécution non centripètes), mais la stratégie PF (cette stratégie représente à elle seule plus de 44% de ces mêmes procédés). Pourquoi la plupart des enfants commencent ou finissent l'exécution des dessins par la forme la plus saillante ? Nous formulons l'hypothèse que l'adoption d'un tel mode d'organisation serait lié à la présence de différences perceptives entre les formes élémentaires constitutives des stimuli explorés, la forme la plus saillante faisant l'objet d'une discrimination perceptive. Tout se passe comme si l'enfant procédait à une opération de catégorisation des formes géométriques simples composant chacun des dessins, organisant son exécution en fonction de critères de ressemblance entre les différentes figures élémentaires. Les formes les moins saillantes seraient réunies en raison de leur similarité et exécutées les unes après les autres, la figure la plus saillante, qui se distingue donc des autres formes, serait isolée.

Une raison pouvant expliquer pourquoi la saillance visuelle est susceptible d'être à l'origine de la catégorisation perceptive des informations locales (formes géométriques élémentaires) effectuée par les enfants résiderait à un niveau préattentif dans les conséquences de la difficulté d'inhibition des informations les plus saillantes. Cette dernière influencerait à un niveau postperceptif sur l'analyse et la mise en œuvre d'une stratégie d'exécution. Le mode de traitement analytique des dessins explorés perturberait le PEC. Le traitement des stimuli comprendrait donc deux étapes distinctes, la première conditionnant la deuxième (Cook & Odom, 1992 ; Kemler Nelson, 1989 ; Smith, 1989). On peut en effet penser que le mode d'appréhension centripète constituerait une propriété émergente, configurale (Garner, 1974), caractéristique des propriétés visuo-spatiales des

stimuli explorés (un emboîtement de formes élémentaires), et que la modification locale de la saillance visuelle au sein des dessins rendrait moins prégnante cette propriété émergente. La combinaison des dimensions ou traits des stimuli donnerait naissance à une propriété émergente perçue par le sujet comme qualitativement différente des propriétés constitutives ; la totalité ne serait alors pas égale à la somme des parties (Kemler Nelson, 1984 ; Lautrey, Bonthoux & Pacteau, 1996). Autrement dit, la perception holistique (à un niveau pouvant être préattentionnel) des dessins résulterait de l'utilisation d'une propriété émergente, qui disparaîtrait ou à laquelle les enfants deviendraient moins sensibles lorsque l'un des éléments serait plus saillant que les autres. L'annulation ou la diminution de cette propriété émergente conduirait les enfants à procéder (à un niveau postperceptif) à un traitement analytique des stimuli, pouvant se traduire par une opération de catégorisation perceptive des informations locales lorsque les différents éléments composant le dessin peuvent faire l'objet d'une classification sur au moins une dimension (ici la saillance visuelle). Ainsi, dans une première étape de traitement, préattentive (non consciente), seul l'élément le plus saillant du stimulus exploré serait encodé (celui-ci inhibant le traitement des parties moins saillantes ; ces dernières pourraient du reste être détectées, mais auraient un poids moindre en termes d'activation neurale), ce qui entraverait l'appréhension globale de ce dernier. Dans une deuxième étape, postperceptive (consciente, guidée par une activité de contrôle), tous les éléments du dessin seraient extraits et pris en compte, mais le stimulus serait traité de manière analytique, celui-ci étant décomposé en fonction des similitudes et différences entre les parties selon leur valeur sur la dimension de saillance visuelle. Les traitements perceptifs les plus précoces, pré-attentifs, auraient donc une incidence directe sur les traitements ultérieurs (analyse des stimuli et planification de l'action).

L'expérience qui suit vise précisément à déterminer si l'effet perturbateur de la saillance visuelle sur le PEC peut être ou non attribué à la sensibilité des enfants à des irrégularités perceptives qui les inciteraient à structurer les stimuli sur la base de similarités (ou de différences) perceptives entre les différentes parties (formes géométriques élémentaires) constitutives des dessins explorés.

2.2. L'incidence d'irrégularités visuelles de forme et de couleur sur l'émergence du PEC (expérience 5)

L'expérience précédente nous a amené à nous interroger sur l'origine de l'effet de la saillance visuelle sur l'émergence du PEC. Aussi, dans la condition de reproduction de dessins comportant une forme élémentaire plus saillante que les autres, nous avons constaté une utilisation massive de stratégies d'exécution initialisées ou finalisées par la figure la plus saillante, les autres formes moins saillantes étant restituées successivement. Nous avons émis l'hypothèse que ce type de stratégies relèverait d'une discrimination perceptive des formes élémentaires en fonction de leurs similarités ou de leurs différences concernant leur saillance visuelle.

Dans l'expérience qui suit, nous cherchons à vérifier, chez des enfants de 5 et 8 ans, l'incidence de différences perceptives visuelles entre les formes élémentaires constitutives des stimuli explorés sur l'émergence du PEC. Nous examinons les différences perceptives relatives à deux propriétés ou dimensions visuelles : la forme et la couleur. Les enfants réalisent une tâche de copie de dessins complexes composés de figures géométriques simples toutes différentes du point de vue de leur forme et de leur couleur, ou dont l'une se distingue des autres par sa couleur ou par sa forme. Si la présence de différences visuelles entre les formes élémentaires des dessins engendre une discrimination de ces dernières affectant le mode d'organisation de l'exécution, alors le PEC devrait

être plus prégnant pour les dessins sans trait dimensionnel distinctif de couleur ou de forme que pour ceux comportant une dimension visuelle pouvant faire l'objet d'une catégorisation perceptive. Par ailleurs, en raison de leurs connaissances conceptuelles (géométriques) plus réduites, les enfants de 5 ans sont davantage susceptibles que les enfants de 8 ans d'opérer un traitement analytique des stimuli entravant l'émergence du PEC (les connaissances conceptuelles favorisant l'appréhension globale des stimuli, et donc l'émergence du PEC, en automatisant le processus d'extraction des formes élémentaires, pouvant alors être encodées simultanément).

2.2.1. Méthode

2.2.1.1. Population

36 enfants issus d'écoles maternelles et primaires publiques de la région lyonnaise ont participé à l'expérience. Ils étaient répartis équitablement en deux groupes d'âge (correspondant respectivement aux niveaux de GSM et CE2) : 5 ans (âge moyen : 5 ; 6 ans, $s=4$ mois) et 8 ans (âge moyen : 8 ; 5 ans, $s=3$ mois).

2.2.1.2. Tâche

Chacun des enfants était invité à explorer librement (pas de limite concernant le temps d'exploration ni le nombre de consultations des modèles) une série de douze dessins complexes composés de quatre figures géométriques simples emboîtées. La tâche consistait à reproduire chacun des stimuli exposés successivement. Comme illustré sur la figure 19, trois types de stimuli (SIV, IF et IC) étaient présentés, ces derniers se distinguant par les propriétés visuelles de forme et de couleur des figures élémentaires (présence ou non de similarités perceptives entre trois des formes élémentaires, la quatrième se distinguant des autres sur la dimension de forme et/ou de couleur).

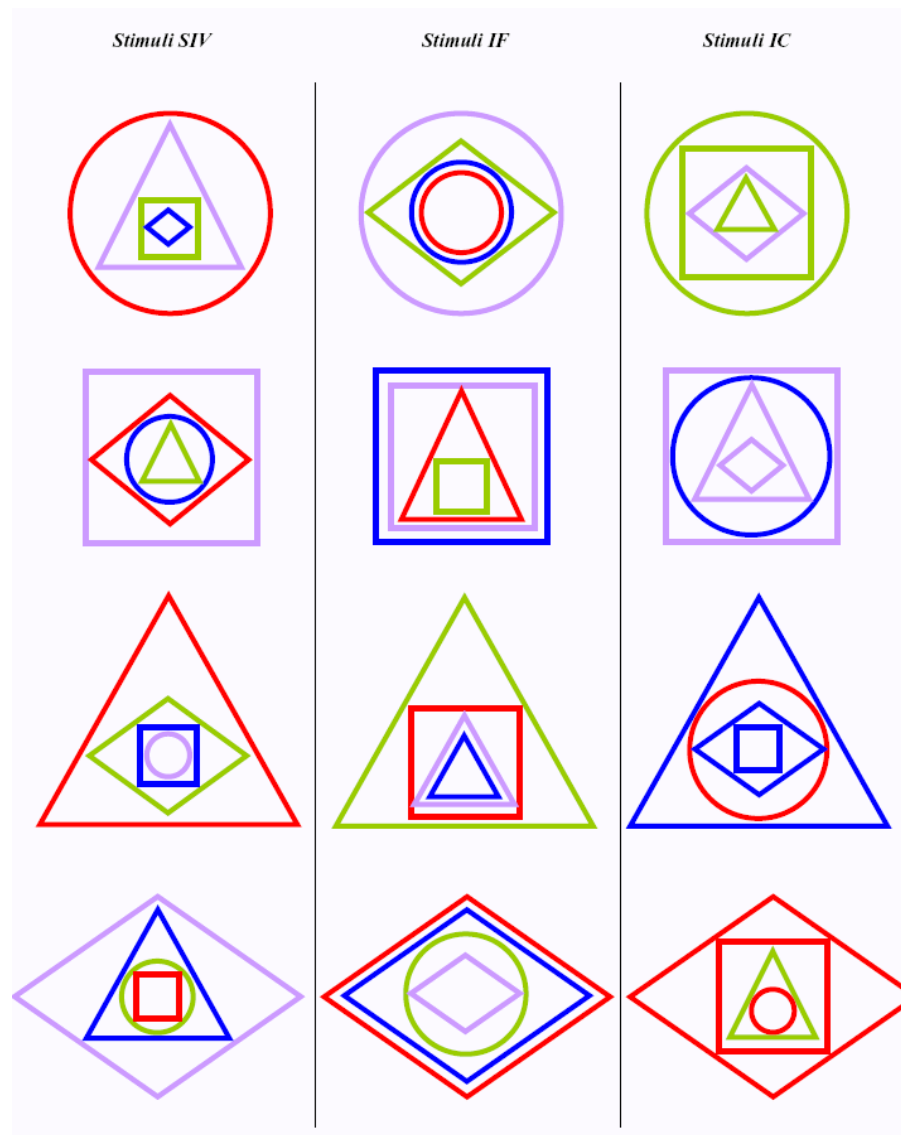


Figure 19 : Les trois types de stimuli utilisés dans la tâche de reproduction (échelle : $\frac{1}{2}$).

Les caractéristiques visuelles de chacun des trois types de stimuli étaient les suivantes :

1. SIV (stimuli sans irrégularité visuelle distinctive de couleur ni de forme) : dessins composés de figures élémentaires totalement différentes sur les dimensions de forme et de couleur (condition contrôle).
2. IF (stimuli avec irrégularité distinctive de forme) : dessins comprenant une figure élémentaire différente des autres sur la dimension « forme » (toutes les figures étant de couleur différente).
3. IC (stimuli avec irrégularité distinctive de couleur) : dessins comportant une figure élémentaire se distinguant des autres par sa couleur (toutes les figures étant de forme différente).

Les irrégularités ou singularités de forme (items IF) et de couleur (items IC) portaient sur l'une des deux formes intermédiaires, cette configuration impliquant l'utilisation d'une stratégie d'exécution non centripète dans le cas où les variations visuelles introduites

conditionneraient le mode de structuration perceptive des stimuli, perturbant par conséquent le PEC. Pour chacun des deux types de stimuli, le changement de couleur se situait pour deux des quatre items sur la forme intermédiaire la plus proche de la figure extérieure (périphérique), et pour les deux autres items sur la forme voisine de la figure la plus à l'intérieur.

Par ailleurs, afin d'éviter d'éventuels effets de répétition, les douze items présentés étaient différents du point de vue de leur composition et/ou de leur structure. Néanmoins, en vue d'obtenir une certaine homogénéité (ou équivalence) entre les différents types de stimuli, ces derniers partageaient des caractéristiques communes. Tous les items comportaient quatre figures géométriques élémentaires non tangentes, et étaient symétriques sur l'axe vertical. De plus, les items constituant chacun des types de stimuli (SIV, IF et IC) contenaient les mêmes formes géométriques simples (rond, carré, triangle et losange) et les mêmes couleurs (rouge, bleu, vert et violet). La fréquence de chacune des couleurs des différentes formes élémentaires était également contrôlée (quatre formes élémentaires de même couleur à l'intérieur de chacun des types de stimuli). De plus, pour tous les types de stimuli, une même forme n'avait jamais la même couleur d'un item à l'autre. Pour les dessins de types IF et IC, seules les positions relatives des figures élémentaires étaient modifiées (celles-ci étaient inversées), leur composition étant similaire.

La procédure était strictement identique à celle suivie dans l'expérience 5 : les stimuli étaient présentés tour à tour dans un ordre aléatoire, chacun d'eux figurant sur une carte, en alternant entre les trois types de dessins (trois dessins successifs correspondant donc à des stimuli de différents types). De même, la consigne était similaire à celle de l'expérience 5. L'exécution des dessins était à nouveau réalisée au moyen de transparents disposés aléatoirement sur une feuille cartonnée de papier blanc, que l'enfant devait superposer dans une boîte rectangulaire afin de reconstituer les divers modèles successivement présentés (pour une description plus précise du matériel, se reporter à l'expérience 2). Les formes semblables incluses dans les items de type IF étaient aisément identifiables lors de l'exécution, dans la mesure où les différentes figures élémentaires de ces stimuli étaient de couleur différente, ce qui ne nécessitait pas une discrimination de ces dernières sur la base d'un jugement précis de la taille des éléments possédant les mêmes propriétés figuratives, évitant ainsi d'éventuelles erreurs dans le choix des transparents (erreurs qui auraient été uniquement dues à une mauvaise estimation de leur taille et qui auraient donc pu conduire à l'utilisation d'un ordre de superposition ne correspondant pas à celui planifié par le sujet). Comme pour les expériences précédentes, l'expérimentateur relevait l'ordre d'exécution des différentes formes simples.

2.2.2. Résultats

Comme l'illustre la figure 20, les enfants recourent massivement au PEC, quels que soient leur âge et le type de dessins reproduits (les procédés d'exécution non centripètes adoptés par les enfants de chaque groupe d'âge figurent en annexe 5).

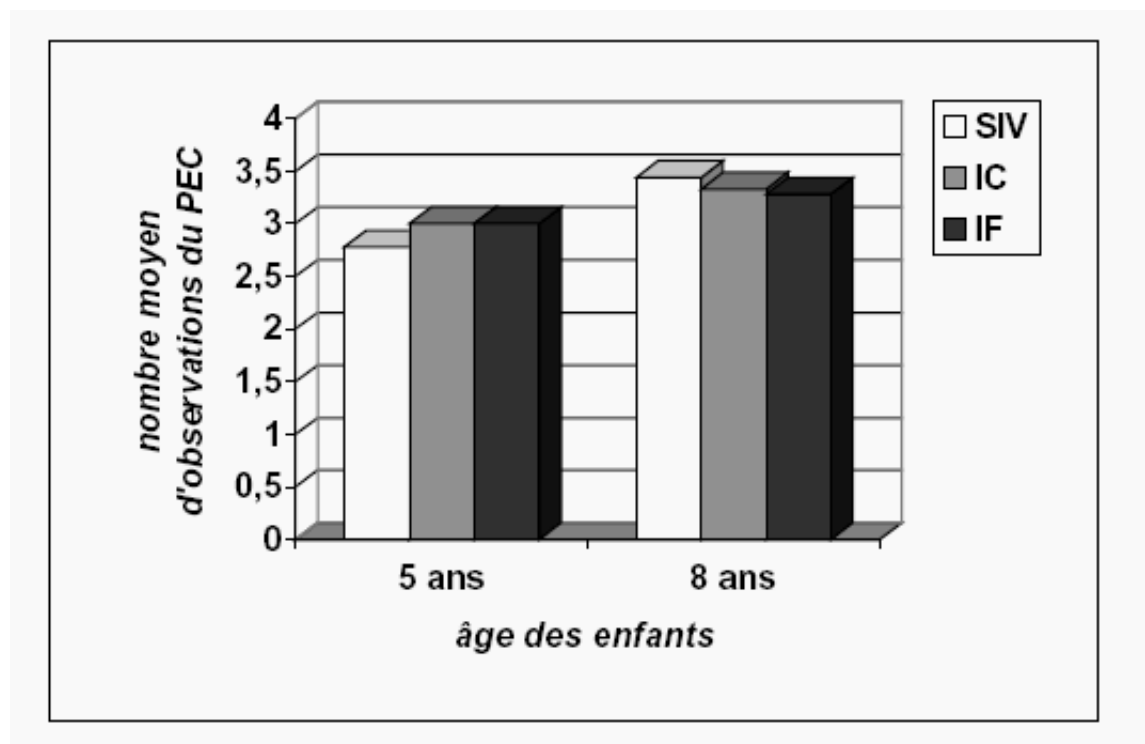


Figure 20 : Nombre moyen d'observations du PEC en fonction de l'âge des enfants, pour chacun des trois types de modèles.

Nous avons procédé à l'analyse de la variance suivant le plan $S < A2 * M3 >$ (où A désigne l'âge et M le type de modèle). Celle-ci a révélé que ni l'effet de l'âge, ni celui du modèle ne sont significatifs ($F < 1$; n.s.). De même, l'interaction entre ces deux facteurs n'est pas significative.

2.2.3. Discussion

Nous avons ici constaté qu'aussi bien les enfants de 5 ans que ceux de 8 ans privilégient la stratégie de l'exécution centripète, quel que soit le type de dessins. Ainsi, l'usage du PEC ne paraît pas conditionné par les propriétés visuelles de forme et de couleur des stimuli. Il ressort que les enfants ne sont pas sensibles aux irrégularités de forme et de couleur. Ces dernières n'affectent pas le PEC. Aussi, si l'on postule que le PEC constitue un procédé d'exécution reflétant une propriété émergente dans le mode d'appréhension perceptive des stimuli, on peut alors considérer que la présence d'irrégularités visuelles de forme ou de couleur n'affecte pas le traitement des propriétés des stimuli. Dans ces conditions, l'hypothèse selon laquelle, en présence d'irrégularités visuelles, les enfants (en particulier les plus jeunes) opéreraient un traitement analytique des stimuli, en procédant à une catégorisation des informations, serait invalidée. Pourtant, selon nous, cette hypothèse n'est pas à écarter, mais doit être précisée, reformulée. En effet, les résultats des expériences 4 et 5 suggèrent que le traitement analytique des stimuli serait bien dû à la présence d'irrégularités visuelles, mais que celui-ci serait conditionné par des différences relatives à la saillance des éléments formant les dessins explorés. Ce sont les irrégularités de saillance visuelle qui initialement perturberaient le mode d'appréhension holistique des stimuli (et donc l'émergence du PEC), et induiraient ensuite un traitement analytique résidant dans une opération de catégorisation basée sur la discrimination des parties selon leurs similitudes et leurs différences. A la différence des simples irrégularités visuelles de forme et de couleur

(expérience 5), la saillance visuelle (expérience 4) fait intervenir deux facteurs étroitement liés (fusionnés): d'une part, la prégnance des informations locales les plus saillantes, qui est susceptible de modifier l'appréhension perceptive des stimuli, et d'autre part la discriminabilité des éléments constitutifs des stimuli (la saillance visuelle étant elle-même, par définition, une irrégularité visuelle), pouvant donner lieu à une catégorisation des parties.

Dans ce qui suit, nous discutons les effets de la saillance visuelle et des irrégularités de forme et de couleur sur le PEC. Nous tentons d'expliquer pourquoi seule la saillance visuelle perturbe le PEC, en entravant le traitement holistique des stimuli sur lequel repose la propriété émergente déterminant l'adoption privilégiée de la stratégie de l'exécution centripète. Nous revenons également sur l'effet différencié de l'âge dans les deux expériences.

2.3. Discussion générale

Les résultats des expériences 4 et 5 suggèrent que les enfants seraient sensibles aux irrégularités visuelles des formes géométriques simples constitutives des dessins explorés, lorsque ces dernières sont associées à des variations relatives à la saillance perceptive des différentes parties des stimuli. En effet, seules les irrégularités visuelles induites par la plus forte prégnance visuelle (accentuation de la saillance) de l'une des formes simples à l'intérieur d'un stimulus (expérience 4) s'avère avoir un effet sur l'organisation de l'exécution des dessins (émergence du PEC), alors que lorsque la saillance visuelle des figures élémentaires est maintenue constante, les irrégularités visuelles distinctives de forme et de couleur (expérience 5) ne conditionnent pas le procédé d'exécution des dessins. Une première interprétation pouvant expliquer l'effet perturbateur de la saillance visuelle sur le PEC serait que celle-ci détermine le mode d'appréhension perceptive des stimuli (et l'organisation de l'exécution qui en découle), le sujet étant susceptible de focaliser son attention sur l'information locale la plus prégnante visuellement. Or l'usage du PEC serait lié à un traitement holistique des stimuli découlant de l'association ou de la combinaison des caractéristiques d'ensemble des dessins explorés, qui donnerait naissance à une propriété émergente conduisant les sujets à appréhender les stimuli de façon cohésive (comme des tous indivisibles). L'apparition de cette propriété émergente dépendrait du caractère homogène des différentes parties constitutives des stimuli. Celle-ci résisterait à des irrégularités visuelles de faible intensité, c'est-à-dire à des variations dimensionnelles (telles que la forme et la couleur) n'induisant pas une différenciation ou une gradation de la valeur perceptive des informations locales. En revanche, elle serait sensible à des irrégularités dimensionnelles de plus forte amplitude telle que la saillance visuelle, à l'origine d'une discrimination des éléments constitutifs des stimuli en fonction de leur prégnance, les parties les plus saillantes ayant un « poids perceptif » plus élevé que les parties moins saillantes, qui pourrait alors entraîner une hiérarchisation dans le traitement des informations. Ainsi, les variations de saillance visuelle seraient enclines à induire un traitement analytique (séquentiel) des informations. L'adoption privilégiée du PEC reflèterait donc l'existence d'une propriété émergente déterminée à la fois par les propriétés spatiales, configurationnelles (un emboîtement de formes élémentaires) et visuelles (caractéristiques perceptives des formes élémentaires) des stimuli.

En outre, la disparition dans l'expérience 5 de l'effet de l'âge observé dans l'expérience 4 pourrait être due à une reconnaissance ou une discrimination perceptive plus aisée des formes géométriques élémentaires dans l'expérience 4, en raison de la mise en couleur de ces formes simples et de la suppression de points de tangence entre certaines d'entre elles. Dès lors, l'extraction perceptive des différentes parties des dessins mobiliserait de façon

moindre les capacités attentionnelles des enfants (les formes élémentaires pouvant être encodées de manière automatique), qui pourraient ainsi appréhender les stimuli dans leur globalité (traitement holistique) au lieu de devoir se concentrer sur les différentes parties de chacun d'eux afin de recomposer une totalité (traitement analytique).

3. Le rôle du contenu des représentations dans l'émergence du PEC : conclusion

Cette première série d'expériences a permis d'établir le lien entre l'usage du PEC et le contenu des représentations. L'adoption de la stratégie de l'exécution centripète reposerait sur la construction de représentations unifiées ou globales des dessins, intégrant les propriétés d'ensemble de ces derniers. Nous avons vu que les contraintes d'élaboration de telles représentations ou d'appréhension perceptive globale des stimuli ont une incidence sur le PEC. En outre, les résultats des différentes expériences suggèrent que les processus sous-jacents au PEC diffèrent dans chacun des deux types de tâches d'exécution des dessins examinés ici : la copie et la résolution du problème de coordination d'informations locales. On note en effet une certaine stabilité du PEC au cours du développement dans la situation de copie, l'usage de ce procédé d'exécution s'avérant massif dès l'âge de cinq ans (excepté dans le cas où l'une des formes élémentaires est plus saillante visuellement que les autres, pour les raisons que nous évoquerons par la suite), alors que la mise en œuvre du PEC évolue nettement au cours du développement dans la résolution du problème de coordination d'informations locales (cf. expérience 2).

En situation de copie, le recours privilégié au PEC refléterait l'existence d'une propriété perceptive émergente, configurationnelle, agissant comme un « attracteur » s'appuyant sur un traitement holistique des dessins explorés. C'est pourquoi l'exploration visuelle s'est avérée plus propice que l'exploration haptique des stimuli à l'émergence du PEC (expérience 1), la modalité visuelle permettant un traitement quasi simultané des informations visuo-spatiales alors que la modalité haptique se caractérise par un traitement séquentiel de ces dernières induisant une appréhension morcelée de l'information spatiale (Gentaz & Rossetti, 1999 ; Loomis & al., 1991 ; Hatwell, 2000). La modalité haptique s'avère notamment beaucoup moins sensible aux lois configurationnelles et aux illusions perceptives que la modalité visuelle (Ballasteros & al., 1997 ; Hatwell & al., 1990 ; Heller, 2000 ; Hopkins, 2000 ; Lopes, 1997 ; Taylor, 2001 ; Locher & Wagemans, 1993 ; Wagemans, 1995). Nous avons également mis en évidence l'incidence des contraintes visuo-motrices de tracé sur le PEC, la suppression des indices visuels dans l'exécution des dessins étant elle aussi susceptible d'entraîner un traitement séquentiel des stimuli, en mobilisant les ressources mnésiques des enfants nécessaires à la rétention des informations relatives à l'état de la production en cours d'exécution et aux modèles à reproduire. L'expérience 4 a en outre permis de mettre en évidence l'effet perturbateur de la variation de la saillance visuelle sur le PEC, cette dernière pouvant constituer une irrégularité perceptive à laquelle le système visuel serait particulièrement sensible, à l'origine de la modification de l'appréhension perceptive des stimuli. Ces derniers font alors l'objet d'un traitement non plus holistique, mais analytique, en raison de la séparation ou de la discrimination des éléments en fonction de leur valeur de prégnance visuelle (les dessins ne sont alors plus appréhendés comme des totalités cohésives, les parties les constituant présentant un caractère hétérogène). Ainsi, l'émergence du PEC reposerait sur des mécanismes de nature perceptive (plutôt que représentationnelle ou mnésique) dans la tâche de copie, ce qui expliquerait notamment l'absence d'effet de l'âge (expériences 1, 2, 4 et 5) et des capacités attentionnelles (expérience 3) des enfants.

L'adoption du PEC dans la résolution du problème de coordination d'informations locales (expériences 2 et 3) serait avant tout sous-tendue par une activité inférentielle visant à établir les positions relatives des figures géométriques simples contenues dans les dessins-cibles. En raison du nombre restreint d'opérations mentales ici requises (une unique inférence est suffisante pour être en mesure de connaître la localisation de toutes les formes élémentaires d'un dessin-cible), la logique déductive mise en jeu dans la tâche ici proposée ne semble cependant pas mobiliser (ou faiblement) les ressources mnésiques du sujet, dans la mesure où, comme les enfants sans trouble attentionnel, les enfants présentant un THADA parviennent à déterminer les relations spatiales entre les différentes formes élémentaires constitutives des dessins-cibles.

Cette première série d'expériences semble indiquer que ce n'est pas tant l'intégration en mémoire des informations visuo-spatiales (capacité de construction de représentations unifiées des stimuli) que le mode de traitement des données qui détermine la manière dont les enfants structurent et se représentent les dessins, et par conséquent l'usage du PEC. Dans la situation de copie, l'émergence du PEC serait liée au mode d'appréhension perceptive des stimuli. L'adoption de la stratégie de l'exécution centripète reflèterait le traitement holistique opéré sur les stimuli explorés. Ces derniers seraient perçus comme des totalités (l'adoption privilégiée du PEC découlant d'une propriété émergente). Dans la résolution du problème de coordination d'informations locales, le recours à la stratégie de l'exécution centripète témoignerait d'une capacité de planification de l'action, mettant en jeu une activité inférentielle ne s'appuyant pas nécessairement sur la capacité de maintien des données en mémoire permettant la construction de représentations globales des dessins-cibles (cette dernière étant liée au niveau de complexité de la tâche, défini par la quantité d'information à encoder et/ou au nombre d'inférences requises par la tâche). Cette activité inférentielle réside dans la mise en relation (comparaison) des informations contenues dans les deux images présentées, la prise en compte séquentielle de ces dernières se traduisant par l'adoption d'un procédé d'exécution non centripète.

Dans la série d'expériences qui suit, nous nous intéressons aux processus sous-jacents au PEC dans des tâches de copie, de rappel et de coordination d'informations locales, en examinant plus spécifiquement le rôle du format des représentations dans l'émergence de ce principe d'exécution. Nous observons en particulier dans quelle mesure les enfants sont susceptibles de recourir à des représentations imagées et/ou verbales au cours du développement, et l'incidence de l'exploitation de telles représentations sur la mise en œuvre du PEC dans les différentes tâches à accomplir.

Chapitre 6. Rôle du format des représentations dans l'émergence du PEC

Dans cette deuxième série d'expériences, nous étudions le rôle du format des représentations dans l'émergence du PEC. Nous introduisons cette fois des variables susceptibles d'influer sur le type de représentations (imagées, verbales, haptiques...) sur lesquels peuvent s'appuyer les enfants pour exécuter leurs dessins. L'analyse des procédés ou stratégies d'exécution adoptés par les enfants au cours du développement constituera alors notamment un moyen d'étude de l'évolution des modes d'encodage ou d'intégration en mémoire des informations visuo-spatiales.

1. Rôle des représentations visuelles dans l'émergence du PEC (expérience 6)

Concernant la question du format des représentations en mémoire, quelques travaux conduits auprès de différentes populations de sujets (le plus souvent d'adultes) se distinguant par leur statut visuel (sujets voyants, aveugles, et présentant une faible vision) ont tenté de déterminer si l'imagerie visuelle constitue un pré-requis au traitement des informations visuo-spatiales. Certaines de ces recherches font état de performances plus faibles des sujets aveugles par rapport aux sujets voyants aveuglés dans des tâches spatiales, suggérant l'importance ou la nécessité des représentations visuelles dans l'analyse des propriétés spatiales (Bartolomeo, 2002 ; Heller & al., 1995, 1996 ; Mellet, 2002). D'autres montrent au contraire que les sujets présentant une déficience visuelle sont en mesure de réaliser efficacement (les performances des sujets déficients visuels s'avérant en général proches de celles des sujets voyants) des épreuves de même nature (Golledge & al., 2000 ; Heller, 2002 ; Heller & al., 2001, 2002 ; Kennedy, 1997 ; Kennedy & Markas, 2000).

L'expérience qui suit, conduite auprès d'enfants voyants, amblyopes précoces et aveugles précoces, porte précisément sur cette problématique. Elle vise à rendre compte du rôle de l'expérience visuelle dans la reproduction haptique de dessins complexes composés de formes géométriques simples emboîtées. Nous examinons ici les relations entre le statut visuel des enfants et l'émergence du PEC. Si l'imagerie visuelle facilite le traitement des informations visuo-spatiales, alors les enfants voyants devraient utiliser plus massivement le PEC que les enfants amblyopes précoces et aveugles précoces, dans la mesure où ce principe repose sur l'analyse des propriétés d'ensemble des stimuli explorés.

1.1. Méthode

1.1.1. Population

27 enfants ont participé à l'expérience⁴. Ils étaient répartis équitablement en trois groupes appariés en âge, en fonction de leur statut visuel :

1. voyants (âge moyen : 9 ; 4 ans, s=19 mois),
2. amblyopes précoces "La définition française de l'amblyopie, sur le plan réglementaire, est d'avoir une acuité visuelle du meilleur œil après correction, comprise entre 4/10ème et 1/20ème, ou un champ visuel réduit à 20° pour chaque œil. Sont considérés comme atteints de cécité, les sujets dont l'acuité visuelle, dans les mêmes conditions que précédemment, est inférieure ou égale à 1/20ème, ou dont le champ visuel est réduit à 10° pour chaque œil" (Griffon, 1995, p.17). (âge moyen : 9 ; 2 ans, s=22 mois),
3. aveugles précoces (âge moyen : 9 ; 9 ans, s=20 mois).

Les caractéristiques des enfants présentant une déficience visuelle sont précisées dans l'annexe 6a.

1.1.2. Tâche

⁴ Nous remercions Sandrine Russier et Stéphane Lorenzi pour leur contribution dans la constitution des échantillons d'enfants amblyopes et aveugles précoces ainsi que dans la passation expérimentale de ces derniers et l'élaboration du matériel.

La tâche était similaire à celle décrite pour l'expérience 1, en situation de reproduction haptique (exploration et exécution haptiques). Le dispositif expérimental utilisé était identique à celui présenté pour l'expérience 1 pour les enfants voyants et amblyopes (le rideau n'était pas nécessaire pour les sujets aveugles). Les mêmes modèles ont été utilisés. Toutefois, comme la plupart des enfants présentant une déficience visuelle étaient familiarisés à l'exploration haptique et que le groupe des enfants voyants était constitué de sujets appartenant à des classes de CE2 au minimum (sujets que nous avons déjà eu l'occasion de tester dans l'expérience 1, et qui n'ont pas montré de grandes difficultés à comprendre et à réaliser la tâche reprise ici), nous n'avons pas jugé indispensable de devoir réserver l'un des dessins en guise d'essai. Nous avons ainsi pu effectuer une analyse de la variance à partir des observations réalisées sur les différents modèles-tests (ceux-ci ne constituant plus les modalités d'un facteur, l'effet de ce dernier ayant déjà été testé dans l'expérience 1 et s'étant révélé non significatif ; de plus, la prise en compte de cette variable nous apparaît sans grand intérêt en regard de l'objectif de cette expérience). Etant donné les faibles effectifs de nos groupes, nous avons préféré présenter les stimuli dans un ordre aléatoire (tirage au sort).

1.2. Résultats

Pour chacun des enfants, nous avons relevé le nombre d'observations du PEC (ce nombre était compris entre 0 et 3, puisque chaque sujet reproduisait trois modèles-tests). Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 21. Alors que la stratégie de l'exécution centripète est largement prévalente chez les enfants voyants aveuglés et aveugles précoces, elle s'avère beaucoup moins prégnante chez les enfants amblyopes précoces. Les procédés d'exécution non centripètes adoptés par les enfants figurent en annexe 6b.

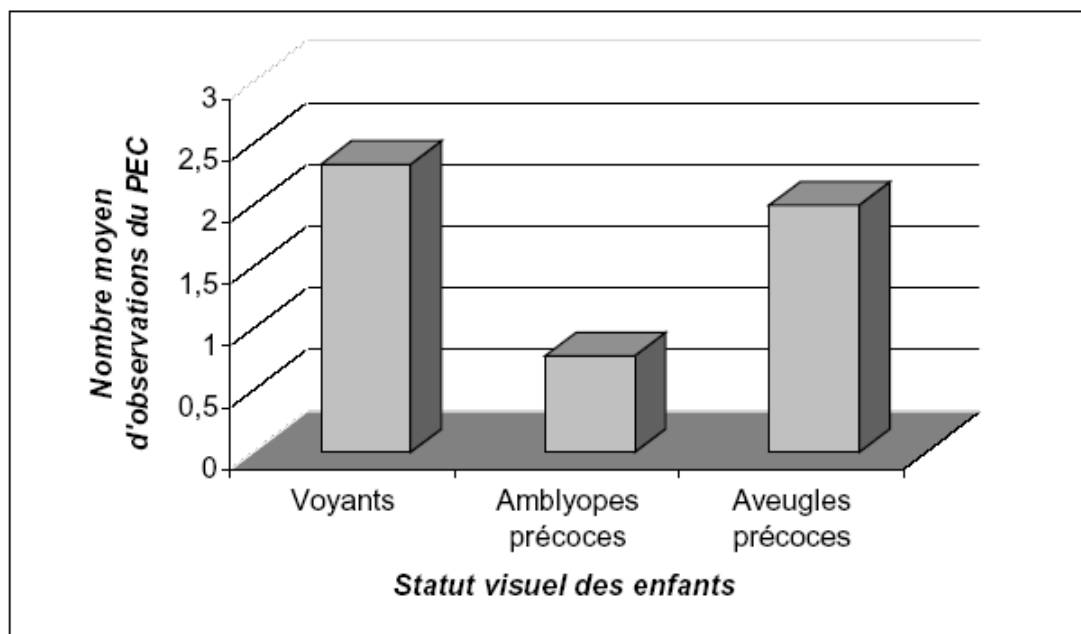


Figure 21: Nombre moyen d'observations du PEC en fonction du statut visuel des enfants.

L'ANOVA à un facteur inter-groupe a permis de mettre en évidence l'effet significatif du statut visuel ($F(2,24)=4,59$; $p=.02$) sur l'émergence du PEC. L'analyse des contrastes (comparaisons planifiées) a révélé que les enfants amblyopes précoces ont plus rarement recours au PEC que les enfants voyants ($F(1,24)=8,28$; $p<.01$) et aveugles précoces ($F(1,24)=5,11$; $p<.05$). En revanche, il n'existe pas de différence significative quant à l'usage du PEC entre les enfants voyants et aveugles précoces ($F<1$; n.s.).

1.3. Discussion

Les résultats enregistrés dans cette expérience confirment l'idée mise en avant dans d'autres recherches (Heller, 2002 ; Heller & al., 2002 ; Kennedy, 1993 ; Kennedy & Markas, 2000) selon laquelle l'expérience (ou l'imagerie) visuelle n'est pas un pré-requis dans le traitement d'informations spatiales. En effet, tout comme chez les enfants voyants, le PEC constitue la stratégie d'exécution dominante chez les enfants aveugles précoces, témoignant d'un mode d'analyse ou d'appréhension perceptive semblable chez ces deux groupes. Aussi, le processus de médiation visuelle (Klatzky et Lederman, 1987) pouvant être exploité par les enfants voyants, consistant à convertir les informations encodées haptiquement sous forme de représentations visuelles, ne semble pas conditionner le PEC. D'autres formats de stockage en mémoire pourraient s'avérer efficaces dans le traitement des informations figuratives et spatiales.

Toutefois, nous privilégions l'hypothèse selon laquelle le processus de médiation visuelle serait susceptible de favoriser le traitement haptique des stimuli explorés chez les enfants voyants, et pourrait donc contribuer à l'émergence du PEC. L'exploitation de représentations visuelles faciliterait la construction de représentations intégrant les propriétés visuo-spatiales des dessins. Les formes géométriques élémentaires pouvant de plus être connues des enfants, leur reconnaissance induirait une activation de traces mnésiques (correspondant aux représentations des formes stockées au sein de la MLT), qui rendrait plus aisée l'intégration en mémoire des informations encodées lors de l'exploration des stimuli. L'activation de représentations imagées stockées en MLT pourrait en outre s'associer à la récupération de connaissances lexicales (relativement au nom des différentes formes géométriques élémentaires), les informations encodées pouvant alors faire l'objet d'un codage verbal. Ce dernier serait enclin à faciliter l'intégration en mémoire des données visuo-spatiales (Baddeley, 1986, 1992 ; Paivio, 1986). Il serait à cet égard intéressant d'observer, dans une tâche semblable de reproduction haptique de dessins bi-dimensionnels, si le PEC serait aussi prégnant chez les enfants voyants par rapport aux enfants aveugles précoces dans la situation où les stimuli explorés seraient constitués de formes élémentaires emboîtées non familières (ce que nous ferons par la suite auprès d'enfants voyants).

Chez les enfants aveugles précoces, l'adoption du PEC serait davantage liée à la présence d'habiletés perceptives relatives à l'exploration manuelle de dessins bi-dimensionnels. Les compétences d'analyse haptique dont disposent les enfants aveugles précoces en raison de leur expérience concernant l'exercice de cette modalité leur permettraient une appréhension globale des stimuli, cette dernière favorisant l'émergence du PEC. Ainsi, alors que chez les enfants voyants aveuglés la mise en œuvre du PEC s'appuierait sur des mécanismes représentationnels ayant trait à l'intégration et au maintien des informations visuo-spatiales en mémoire, chez les enfants aveugles précoces, l'émergence de cette stratégie d'exécution reposerait plutôt sur des processus perceptifs relevant du mode d'appréhension des stimuli explorés. En outre, les habiletés haptiques des enfants aveugles précoces faciliteraient non seulement l'exploration des stimuli explorés,

mais également celle des dessins exécutés. Or nous avons vu, dans l'expérience 1, que chez les enfants voyants, l'exécution des dessins sous contrôle haptique était susceptible de perturber l'émergence du PEC en raison d'une mobilisation accrue des ressources mnésiques du sujet. Aussi, les capacités mnésiques des enfants seraient d'autant plus mobilisées que leurs habiletés d'exploration haptique seraient limitées. La tâche mobiliserait donc beaucoup plus de capacités mnésiques chez les enfants voyants que chez les enfants aveugles précoces. Cependant, le processus de médiation visuelle pouvant être exploité par les enfants voyants aveuglés permettrait une économie substantielle des ressources cognitives du sujet, évitant une éventuelle surcharge mnésique. Ainsi, l'émergence du PEC serait sous-tendue par le processus de médiation visuelle chez les enfants voyants, favorisant l'intégration en mémoire des informations visuo-spatiales, alors qu'elle résiderait avant tout dans la capacité d'analyse haptique des stimuli chez les enfants aveugles précoces. En outre, tout comme les enfants voyants aveuglés, les enfants aveugles congénitaux pourraient recourir à un codage verbal des informations visuo-spatiales, la récupération des connaissances lexicales relatives aux différentes figures géométriques élémentaires dérivant cette fois de l'activation de représentations non pas visuelles, mais tactilo-kinesthésiques.

Les enfants amblyopes précoces disposeraient quant à eux d'habiletés d'exploration manuelle beaucoup moins importantes que celles des aveugles précoces (relevons à cet égard que seuls deux des neuf enfants amblyopes précoces pratiquent le braille, alors que huit des neuf enfants aveugles précoces sont brailleuses). Ainsi, au même titre que les enfants voyants, ils présenteraient des capacités d'analyse haptique des stimuli beaucoup plus faibles que celles des enfants aveugles précoces. Par ailleurs, en raison de leur déficience visuelle, les représentations visuelles que pourraient exploiter ces sujets seraient altérées. Ils ne seraient pas en mesure de recourir aussi efficacement que les enfants voyants à la médiation visuelle. L'expérience visuelle des enfants voyants constituerait du reste une base de connaissances beaucoup plus fiable et opérationnelle que celle des enfants amblyopes précoces (du fait de la qualité supérieure des représentations visuelles des enfants voyants). Aussi, les représentations visuelles et tactilo-kinesthésiques des enfants amblyopes précoces seraient à leur âge encore trop imprécises (sous-spécifiées) pour permettre le recours efficace à un codage verbal des informations visuo-spatiales. Ces différences pourraient expliquer pourquoi le PEC s'avère moins prégnant chez les enfants amblyopes que chez les enfants voyants aveuglés et aveugles précoces.

Dans les deux expériences qui suivent, nous revenons sur le rôle du codage verbal ou propositionnel dans l'émergence du PEC. Nous nous intéressons aux représentations, imagées et/ou verbales, exploitées par les enfants au cours du développement, dans des tâches requérant ou non l'intégration et le maintien en mémoire des informations visuo-spatiales.

2. Rôle des représentations imagées et verbales dans l'émergence du PEC (expériences 7 et 8)

Dans l'expérience précédente, nous posons la question du rôle de l'imagerie visuelle dans le traitement des informations visuo-spatiales, et plus particulièrement dans l'émergence du PEC. Les résultats obtenus ont suggéré que la mise en œuvre du PEC n'implique pas nécessairement l'exploitation de représentations visuelles, mais que, chez les enfants voyants, l'activation en MLT de représentations visuelles liée à la reconnaissance de formes familières et la récupération des connaissances lexicales relatives à ces formes

favoriseraient l'intégration en mémoire des stimuli (construction de représentations unifiées des dessins), et par conséquent l'usage du PEC. Nous avons alors émis l'hypothèse que le recours à des représentations dans un format verbal ou propositionnel peut s'avérer pertinent pour encoder et intégrer en mémoire les informations visuo-spatiales. Dans les deux expériences qui suivent, nous nous intéressons précisément au rôle de ces représentations au cours du développement dans l'émergence du PEC.

2.1. Rôle du codage verbal dans la reproduction de dessins complexes (expérience 7)

Cette expérience, conduite auprès d'enfants de 7, 9 et 10 ans invités à effectuer une tâche de copie ou de rappel d'une série de dessins complexes composés de formes élémentaires emboîtées, vise à répondre aux questions suivantes :

1. Le codage verbal facilite-t-il le maintien en mémoire (MDT) des informations visuo-spatiales, et de quelle façon au cours du développement ?
2. Les processus en jeu dans l'adoption d'une organisation de l'exécution des dessins suivant un mode centripète sont-ils de même nature dans les tâches de copie et de rappel ? Quelle est l'impact de la mobilisation du système mnésique ou représentationnel sur l'organisation de l'exécution des dessins ? Quelle est en outre l'influence, au cours du développement, du recours possible au codage verbal sur l'utilisation d'un procédé d'exécution selon une organisation centripète, dans chacune de ces deux épreuves ?

Les hypothèses que nous émettons en lien avec chacune de ces questions sont :

1. Le recours à un « double codage » (Paivio, 1986), imagé et verbal, est susceptible de faciliter le rappel des informations visuo-spatiales. En particulier, le processus d'autorépétition de la boucle phonologique (Baddeley, 1986, 1992 ; Baddeley & Hitch, 1974) permettrait d'améliorer ou de renforcer le maintien en MDT des données encodées. Toutefois, nous prédisons que l'effet facilitateur du double codage sur le rappel des dessins sera variable suivant l'âge des enfants (interaction âge \times codage), dans la mesure où la stratégie de codage verbal des informations visuo-spatiales s'accroît au cours du développement, les jeunes enfants (avant 7-8 ans) privilégiant le codage visuel, tandis que les enfants plus âgés et les adultes recourent préférentiellement au codage verbal (Bailleux & al., 2000 ; De Ribeaupierre & al., 2000 ; Fenner & al., 2000 ; Hitch & al., 1988, 1989 ; Miles & al., 1996 ; Pelizzon & al., 1999).
2. L'utilisation d'un mode d'organisation centripète de l'exécution pourrait être sous-tendue par des mécanismes différents selon la tâche effectuée : elle reflèterait avant tout le mode d'appréhension perceptive des stimuli explorés en situation de copie, alors qu'en situation de rappel, elle assurerait une fonction de maintien en mémoire des informations encodées et d'élaboration de représentations unifiées des dessins intégrant l'ensemble des données relatives aux stimuli explorés. Seule la reproduction de mémoire nécessiterait donc un travail d'intégration en mémoire des propriétés visuo-spatiales, en vue de l'élaboration d'une stratégie d'exécution organisée (et donc efficace) favorisant le rappel des dessins. L'utilisation d'une organisation de l'exécution suivant un mode centripète résulterait alors de mécanismes ayant trait au système représentationnel, relatifs à l'intégration en mémoire des informations visuo-spatiales et à l'opération de planification de l'action résidant dans l'établissement de règles d'exécution, définies à partir des caractéristiques des dessins. Nous nous

appuierons sur la méthode du fractionnement développemental déjà exposée (cf. expérience 2) afin de déterminer si les deux tâches mettent en jeu des mécanismes de nature différente. Si tel est le cas, alors nous devrions constater une évolution différente au cours du développement selon la tâche (interaction âge \times tâche significative) quant à la fréquence d'usage d'un procédé d'exécution suivant un mode d'organisation centripète. De plus, nous formulons l'hypothèse que le recours au double codage, verbal et imagé, serait propice à la mise en œuvre d'une stratégie d'exécution selon une organisation centripète dans le rappel des dessins. En favorisant le maintien en mémoire des informations visuo-spatiales, le double codage renforcerait la stabilité des représentations élaborées, et faciliterait ainsi le travail de planification de l'action, ce dernier s'appuyant sur les propriétés d'ensemble des dessins stockées en mémoire, qui déterminent la stratégie d'exécution adoptée. Le recours à un double codage étant par ailleurs conditionné par l'âge des enfants, nous prédisons par conséquent une triple interaction âge \times tâche \times codage significative.

2.1.1. Méthode

2.1.1.1. Population

90 enfants issus de classes primaires de CE1 (7 ans), CM1 (9 ans) et CM2 (10 ans) d'écoles publiques de la région lyonnaise ont participé à l'expérience. Ils étaient répartis équitablement entre ces trois groupes d'âge (les âges moyens et écarts-types étaient respectivement de 7 ; 4 ans avec $s=4$ mois, 9 ; 5 ans avec $s=4$ mois et 10 ; 7 ans avec $s=3$ mois).

2.1.1.2. Tâches

Les enfants effectuaient individuellement soit une tâche de copie de dessins complexes composés de formes élémentaires emboîtées, soit une tâche de rappel de ces mêmes dessins. Chacun des huit dessins présentés successivement étaient composés de quatre formes simples emboîtées. Quatre d'entre eux étaient constitués de formes élémentaires que les enfants pouvaient dénommer. Un double codage (DC), imagé et verbal, pouvait alors être exploité (cf. figure 22 : items A à D, de type DC). Les quatre autres comprenaient des formes abstraites, sans signification. Pour ce deuxième type de stimuli, le simple codage (SC) imagé était donc possible (cf. figure 22 : items E à H, de type SC).

La moitié des enfants de chaque groupe d'âge effectuait la tâche de copie, alors que l'autre moitié réalisait la tâche de rappel. Pour cette dernière, le temps d'exploration de chacun des stimuli était de dix secondes (ce temps ayant été fixé à l'issue d'un pré-test réalisé sur quelques enfants de 7 et 9 ans) et le rappel immédiat. Dans les deux conditions, les dessins étaient reproduits dans un ordre aléatoire (par tirage au sort, chacun des stimuli figurant au centre d'une carte, comme pour les expériences 2, 3 et 4), en alternant néanmoins les deux types de stimuli.

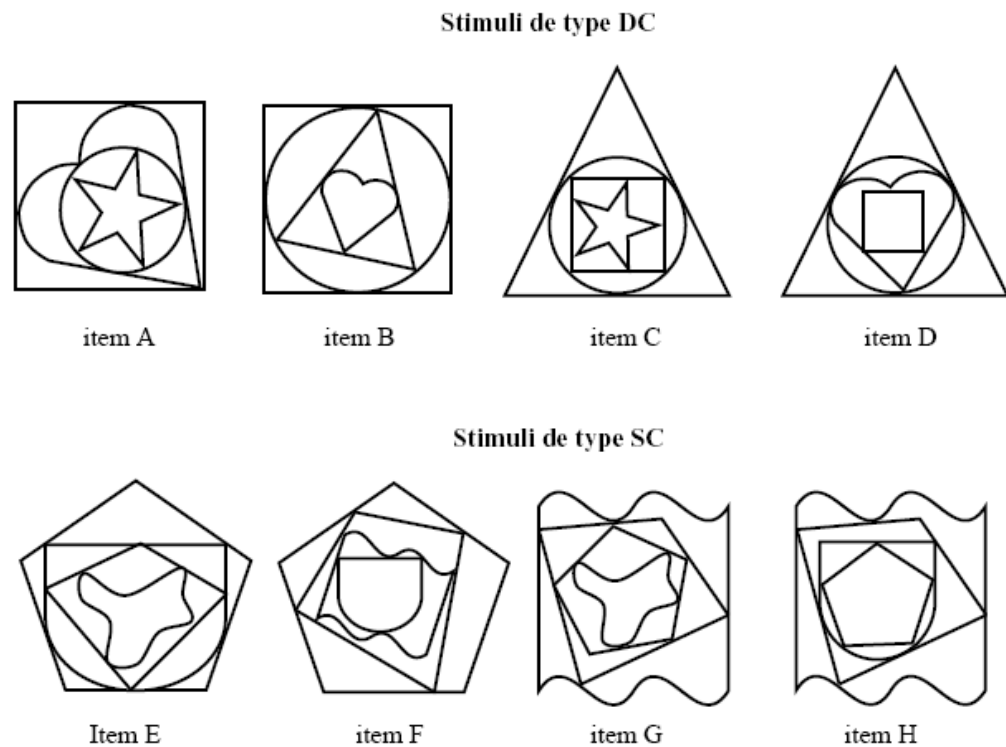


Figure 22 : Stimuli explorés par les enfants (échelle : $\frac{1}{2}$). Type DC : dessins composés de formes élémentaires familières (double codage possible) ; Type SC : dessins constitués de formes simples abstraites (simple codage imagé possible).

En situation de copie, la consigne était la suivante : « Je vais te montrer un dessin. Ce sera le modèle. Il faudra que tu refasses le modèle en mettant dans la boîte les unes sur les autres des petites feuilles en plastique qui seront éparpillées sur le papier blanc. Tu choisiras dans quel ordre tu déposeras les feuilles dans la boîte, mais à chaque fois que tu mettras une feuille dans la boîte tu ne pourras plus la récupérer pour te corriger. De plus, tu ne devras utiliser que les feuilles de plastique dont tu as besoin car il se peut que certaines ne fassent pas partie du dessin à copier. Attention de ne rien oublier ».

Dans la condition de rappel, les instructions données aux enfants au début de la tâche étaient celles-ci : « Dans un instant, je vais te montrer un dessin. Tu le regarderas bien car tu ne pourras le voir que pendant dix secondes et il faudra t'en souvenir. Dès que je l'aurai retiré, tu devras le refaire dans la boîte qui est à côté de toi, en y mettant les unes sur les autres des petites feuilles de plastique qui seront éparpillées sur le papier blanc. Tu choisiras dans quel ordre tu déposeras les feuilles dans la boîte, mais à chaque fois

que tu mettras une feuille dans la boîte tu ne pourras pas la récupérer pour te corriger. De plus, tu ne devras utiliser que les feuilles de plastique dont tu as besoin car il se peut que certaines ne fassent pas partie du dessin à copier. Attention de ne rien oublier ». Afin que le rappel soit immédiat, pour chacun des items, l'expérimentateur commençait par disposer rapidement les transparents destinés à l'exécution sur le papier blanc, puis présentait aussitôt le stimulus en même temps qu'il déclenchait le chronomètre. Au bout de dix secondes, il retirait le dessin, l'enfant étant alors invité à le rappeler.

Dans les deux conditions (copie et rappel), l'exécution était réalisée par superposition de transparents (pour les raisons déjà mentionnées dans les autres expériences pour lesquelles nous avons utilisé cette technique). En outre, afin d'évaluer les performances de rappel des enfants, pour chacun des items, deux transparents sur lesquels figuraient deux formes-intruses, l'une pouvant faire l'objet d'un double codage, imagé et verbal, l'autre étant une forme abstraite, non verbalisable, étaient utilisés (cf. figure 23). La dimension des formes-intruses de chaque paire utilisée pour chacun des items était contrôlée : la taille de la première forme-intruse était proche de celle de l'une des deux formes intermédiaires d'un item, la taille de la seconde correspondant approximativement à celle de l'autre forme intermédiaire. Celles-ci étaient du reste également proposées dans la tâche de copie, les dessins étant donc exécutés dans les mêmes conditions dans les deux tâches.

Pour chacun des items reproduits, l'expérimentateur relevait l'ordre de superposition des transparents (c'est-à-dire des formes élémentaires). Une fois la tâche accomplie, il s'assurait également que l'enfant disposait bien des connaissances sémantiques ou conceptuelles nécessaires pour l'encodage verbal. Pour cela, il présentait (dans un ordre aléatoire) à nouveau l'ensemble des stimuli utilisés dans l'expérience et demandait au sujet de dire s'il connaissait ou non le nom de chacune des formes qui composaient les dessins (en lui précisant initialement que certaines formes « portent un nom » alors que d'autres « n'en portent pas ») et, dans l'affirmative, d'énoncer à haute voix le nom de chacune des formes simples en les pointant du doigt.

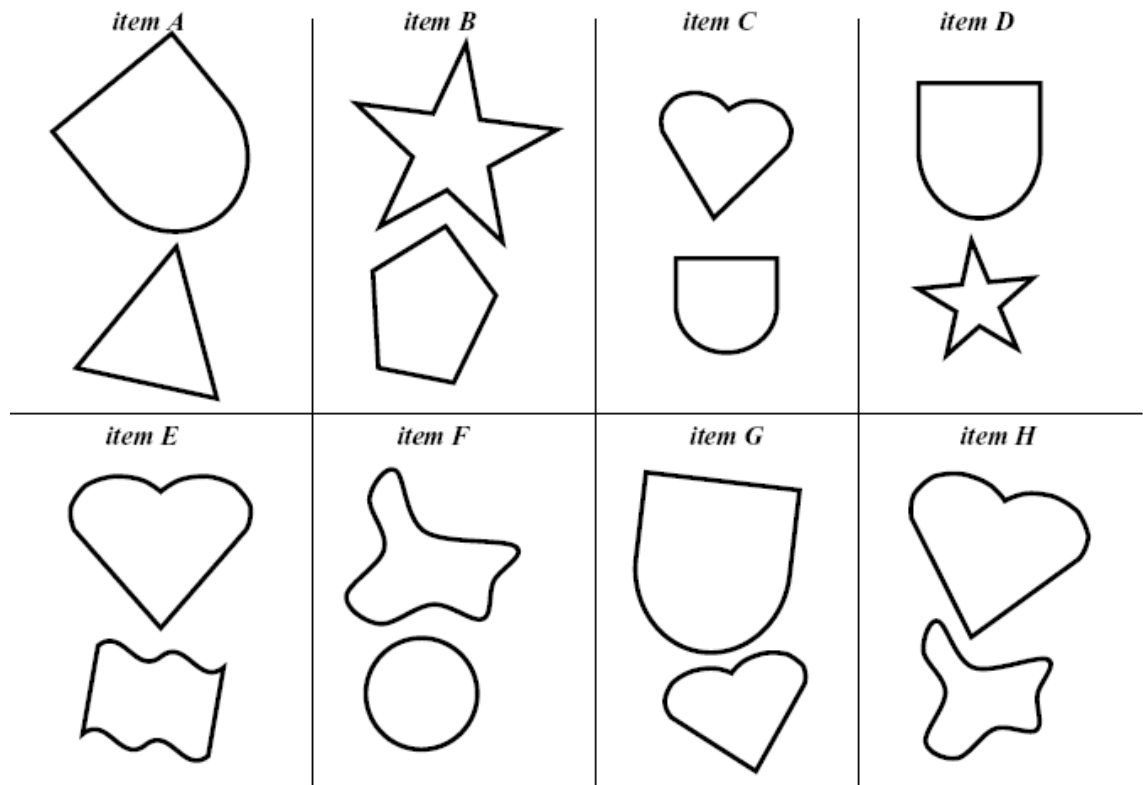


Figure 23 : Paire de formes-intruses disponibles pour l'exécution des dessins, pour chacun des items (échelle : ½).

Tous les enfants ont reconnu et dénommé spontanément l'ensemble des formes familières contenues dans les dessins de type DC, alors que seuls quelques enfants ont attribué un label verbal (comme un « drapeau », ou un « hexagone », ou « une tête de loup ») à une ou deux des formes constitutives des dessins de type SC.

2.1.2. Résultats

Nous aborderons successivement le rôle du codage verbal dans le maintien en mémoire des informations visuo-spatiales et l'incidence de la tâche et du format d'encodage des informations visuo-spatiales au cours du développement sur l'organisation de l'exécution des dessins.

2.1.2.1. Le rôle du codage verbal dans le maintien en mémoire des informations visuo-spatiales

La première analyse que nous avons réalisée concernait les performances des enfants dans la tâche de rappel des dessins. Celles-ci sont rapportées dans la figure 24.

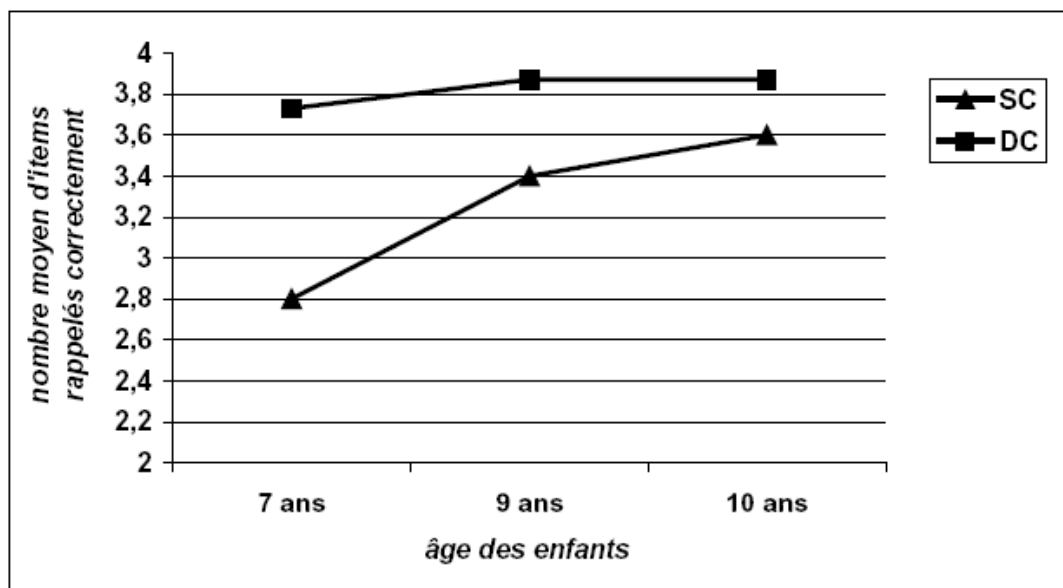


Figure 24: Nombre moyen d'items rappelés correctement dans chacune des conditions de codage (SC : simple codage, imagé ; DC : double codage, imagé et verbal), en fonction de l'âge des enfants.

L'ANOVA selon le plan $S < A^3 > \times C^2$ (où A désigne l'âge, C le type de codage possible), a révélé l'effet significatif du codage ($F(1,42)=24,72$; $p < .0001$). Le nombre moyen d'items correctement rappelés lorsqu'un double codage (imagé et verbal) est possible s'est avéré supérieur à celui relevé pour la condition de simple codage imagé (les moyennes relevées atteignent 3,27 pour la condition de simple codage, contre 3,82 pour la condition de double codage, les écarts-types étant respectivement de 0,96 et 0,49). Les erreurs commises (cf. annexe 7b) par les enfants étaient de trois types : 1) oubli de l'une des formes élémentaires, ou 2) ajout de l'une des deux formes-intruses, ou encore 3) oubli de l'une des formes élémentaires et ajout de l'une des deux formes-intruses. Ainsi, au moins trois des quatre formes élémentaires étaient systématiquement rappelées.

Par ailleurs, si l'effet de l'âge n'est pas significatif, l'interaction âge \times codage l'est en revanche ($F(2,42)=3,12$; $p=.05$), témoignant d'un accroissement différent au cours du développement de la capacité de maintien des informations visuo-spatiales, selon qu'un codage verbal peut être ou non exploité (la figure 24 illustre cette interaction). L'analyse des contrastes (comparaisons planifiées) montre qu'alors que les performances moyennes de rappel des trois groupes d'âge ne se distinguent pas significativement lorsque le double codage, verbal et imagé, est possible, celles-ci diffèrent au cours du développement lorsque seul le codage imagé peut être utilisé : les performances des enfants de 7 ans sont alors significativement inférieures à celles des enfants de 10 ans ($F(1,42)=5,66$; $p=.02$), et tendent à être plus faibles que celles des enfants de 9 ans ($F(1,42)=3,19$; $p=.08$).

L'interaction âge \times codage témoigne également d'un impact différent du type de codage pouvant être exploité sur le maintien des informations visuo-spatiales selon l'âge des enfants. Les performances de rappel sont significativement supérieures en condition de double codage verbal et imagé par rapport à la condition de simple codage imagé à 7 ans

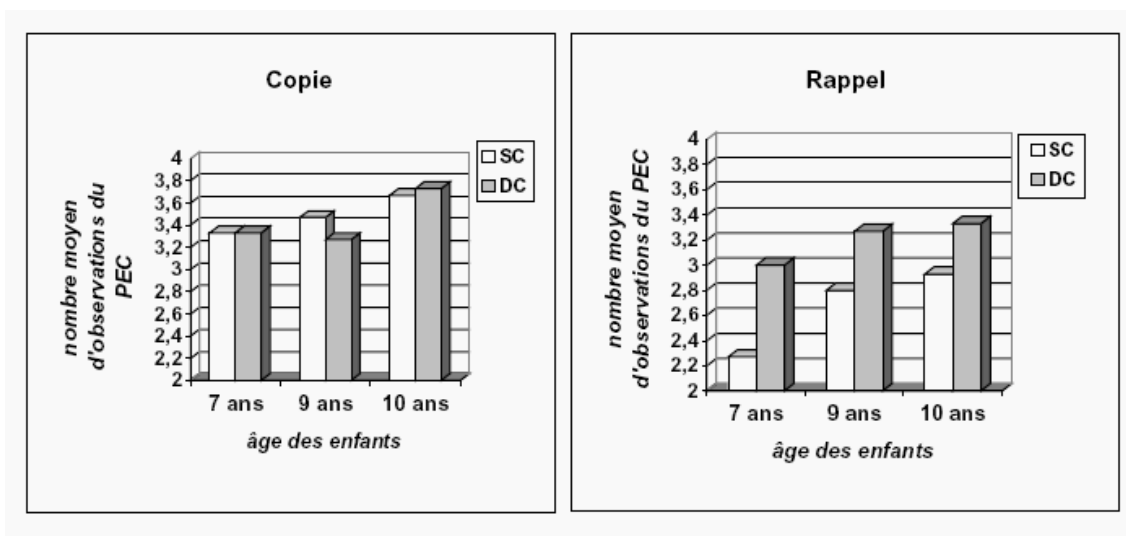
($F(1,42)=23,25$; $p<.001$) et à 9 ans ($F(1,42)=5,81$; $p=.02$). A 10 ans, les performances moyennes de rappel ne se distinguent pas significativement dans les conditions de simple et de double codage. Nous discuterons ultérieurement ces résultats.

2.1.2.2. L'incidence de la tâche et du format d'encodage des informations visuo-spatiales au cours du développement sur l'organisation de l'exécution des dessins

Nous venons de voir que l'exploitation d'un codage verbal des informations visuo-spatiales est susceptible de faciliter le rappel des dessins explorés, en particulier chez les enfants de 7 ans, qui disposent de capacités mnésiques moins importantes que les enfants de 9 et 10 ans, celles-ci augmentant ou devenant plus efficaces au cours du développement (Case, 1985 ; Gallina, 1998 ; Pascual-Leone, 2000 ; Siegler, 2001). Qu'en est-il de l'organisation de l'exécution : le codage verbal favorise-t-il la mise en œuvre d'une stratégie d'exécution suivant une organisation centripète (PEC) dans le rappel des dessins ? Par ailleurs, son incidence est-elle la même en situation de copie ? Joue-t-il un rôle similaire dans ces deux tâches ?

Pour tenter de répondre à ces questions, nous nous sommes intéressés au mode d'organisation de l'exécution, centripète ou non, adopté par les enfants, en ignorant les erreurs qu'ils avaient pu commettre, c'est-à-dire en considérant uniquement l'ordre d'exécution des formes élémentaires contenues dans les stimuli qui leur ont été présentés. Etant donné les types d'erreurs rencontrés dans le rappel des dessins (aucune erreur n'ayant été commise dans la tâche de copie), nous avons pu prendre en compte chez tous les enfants au moins trois des quatre formes constituant chacun des items. Les procédés d'exécution dans la copie et le rappel des dessins figurent en annexes 7a et 7b, respectivement.

L'ANOVA à deux facteurs inter-groupes (tâche et âge) et un facteur intra-groupe (codage) a révélé un effet significatif du codage ($F(1,84)=9,11$; $p<.01$) sur le PEC. Cependant, cet effet est fonction de la tâche effectuée (les enfants ayant du reste tendance à recourir plus souvent au PEC dans la tâche de copie que dans celle du rappel : $F(1,84)=3,69$; $p<.06$), comme en atteste l'interaction significative tâche \times codage ($F(1,84)=12,72$; $p<.001$). Les figures 25a et 25b illustrent la différence entre les deux tâches concernant l'effet du codage verbal sur l'adoption d'une stratégie d'exécution selon une organisation centripète.



Figures 25a et 25b : Nombre moyen d'observations du PEC en fonction de l'âge des enfants, selon le codage possible (SC : simple codage imagé ; DC : double codage, imagé et verbal), pour chacune des deux tâches.

L'analyse des contrastes a permis de mettre en évidence le recours plus fréquent d'un procédé d'exécution suivant un mode d'organisation centripète lorsqu'un codage verbal peut être exploité ($F(1,84)=21,68$; $p<.0001$), alors que pour la tâche de copie, ce type d'organisation de l'exécution n'est pas plus souvent adopté pour la condition de double codage, imagé et verbal, que pour la condition de simple codage imagé ($F<1$; n.s.), ceci quel que soit le groupe d'âge. L'effet de l'âge n'est quant à lui pas significatif.

Ainsi, l'émergence du PEC est dépendante du codage verbal en situation de rappel, mais pas en situation de copie. Dans ce qui suit, nous interprétons ce résultat, en le mettant en relation avec ceux relatifs à l'incidence du codage verbal sur le maintien en mémoire des informations visuo-spatiales au cours du développement.

2.1.3. Discussion

Les résultats de cette expérience ont montré un effet différencié du codage verbal sur l'organisation de l'exécution des dessins selon la tâche effectuée. En situation de copie, l'usage du PEC n'est pas conditionné par l'exploitation du codage verbal. En revanche, en situation de reproduction de mémoire, le recours à ce même codage favorise l'émergence du PEC ainsi que le rappel des dessins explorés. Ces données suggèrent que les mécanismes en jeu dans la mise en œuvre du PEC divergent dans chacune des deux situations.

Dans la condition de copie, l'adoption de la stratégie de l'exécution centripète serait sous-tendue principalement par des mécanismes perceptifs, relatifs au mode d'appréhension ou de structuration des stimuli explorés. L'émergence du PEC serait alors indépendante de l'exploitation de représentations verbales.

Dans la condition de rappel, le PEC jouerait un rôle facilitateur dans le maintien des informations visuo-spatiales. L'analyse de la liaison (calcul du coefficient de corrélation linéaire de Pearson) entre les performances de maintien des informations visuo-spatiales (nombre de dessins correctement rappelés) et la fréquence d'usage du PEC (nombre de dessins exécutés suivant une organisation centripète, indépendamment des erreurs commises) conforte cette idée. En effet, les enfants utilisant le plus souvent le PEC dans la tâche de rappel sont ceux témoignant d'une capacité importante de maintien en mémoire

des stimuli, les enfants commettant un nombre plus élevé d'erreurs ayant plus rarement recours à ce mode d'organisation de l'exécution ($r=0,39$; $p<.01$). De plus, cette corrélation n'est significative que chez les enfants de 10 ans ($r=0,51$; $p=.05$) et tend à l'être chez ceux de 9 ans ($r=0,50$; $p<.06$), mais pas chez les enfants de 7 ans ($r=0,15$; n.s.). Ce résultat pourrait témoigner de la plus grande utilité du PEC chez les enfants de 9 et 10 ans, qui présentent des capacités de rétention des propriétés visuo-spatiales plus élevées que les enfants les plus jeunes. Aussi, le PEC optimiserait les performances de rappel chez les enfants les plus âgés. Lorsque les enfants disposeraient de capacités de maintien plus réduites, l'usage du PEC s'avèrerait moins bénéfique ou utile dans le rappel des dessins. Aussi, l'absence de lien entre les performances de rappel et l'usage du PEC chez les enfants les plus jeunes pourrait provenir d'un manque de capacités de maintien en mémoire des informations visuo-spatiales. L'adoption d'un mode d'organisation de l'exécution centripète favoriserait le rappel des dessins uniquement quand les enfants disposeraient de capacités de maintien suffisantes. Il existerait un seuil « critique » quant aux capacités de maintien des données visuo-spatiales en mémoire en-dessous duquel le recours au PEC ne pourrait jouer un rôle facilitateur dans le rappel des dessins.

L'absence de lien entre les performances de rappel des dessins et l'usage du PEC chez les enfants les plus jeunes pourrait non seulement s'expliquer par la nécessité de capacités mnésiques suffisantes, mais également par le fait que le recours au PEC serait utile dans le rappel des dessins seulement pour les items composés de formes élémentaires abstraites, les items constitués de formes élémentaires familières (verbalisables) étant mémorisés sans difficulté (effet plafond), quel que soit l'âge des enfants (comme nous l'avons vu, dans cette condition, les scores de rappel sont élevés et l'effet de l'âge n'est pas significatif). Ce serait d'ailleurs la raison pour laquelle, dans la condition de reproduction de mémoire, le codage verbal a un effet à la fois sur l'émergence du PEC et sur la performance de rappel des dessins. Pour vérifier cette hypothèse, nous avons à nouveau calculé, pour chacun des groupes d'âge, le coefficient de corrélation linéaire de Pearson, en distinguant cette fois les deux types d'items (le score de rappel ainsi que le nombre d'apparitions du PEC étant alors compris entre 0 et 4). Les résultats vont en faveur de notre hypothèse : alors que les capacités de maintien des enfants ne sont pas corrélées à l'usage du PEC pour les items composés de formes élémentaires familières, on relève une corrélation significative entre ces deux variables pour les items constitués de formes simples abstraites, mais uniquement chez les enfants de 9 ans ($r=0,68$; $p<.01$) et de 10 ans ($r=0,61$; $p<.05$). Chez l'enfant de 7 ans, l'augmentation des performances de rappel n'est pas associée à un usage plus important du PEC ($r=0,07$; n.s.). Ces données sont contraires à l'idée selon laquelle les enfants emploient plus fréquemment des stratégies, telles que l'organisation, pour mémoriser des groupes d'items familiers que pour mémoriser des groupes d'items moins familiers (Bjorklund, Muir-Broaddus & Schneider, 1990). Ainsi, le PEC jouerait un rôle facilitateur dans le maintien en mémoire des informations visuo-spatiales, lorsque les items mobilisent de manière accrue les ressources mnésiques du sujet, comme c'est le cas dans le rappel de dessins composés de formes non familières.

En outre, si, comme attendu, nous avons relevé un effet significatif du codage pouvant être exploité à la fois sur les performances de rappel et sur l'émergence du PEC, nous avons également pu montrer que le codage verbal jouait un rôle plus ou moins important au cours du développement. Toutefois, contrairement à nos prédictions, le codage verbal s'est avéré bénéfique dans le rappel des dessins non pas pour les enfants les plus âgés, mais surtout pour les enfants les plus jeunes. De nombreux auteurs ont pourtant mis en évidence l'évolution croissante du codage verbal dans le traitement d'informations spatiales (et notamment le rappel) au cours du développement, les enfants les plus jeunes exploitant

préférentiellement le codage imagé (Bailleux & al., 2000 ; Fenner & al., 2000 ; Logie & al., 2000 ; Pelizzon & al., 1999). Deux raisons principales pourraient expliquer les raisons du rôle facilitateur du codage verbal dans le rappel des dessins uniquement chez les enfants les plus jeunes.

La première concerne la nature des propriétés, visuelles et/ou spatiales, pouvant faire l'objet de ce codage. Le recours privilégié au codage verbal chez les enfants les plus âgés et les adultes proviendrait de la moins bonne maîtrise du langage des enfants plus jeunes, ces derniers adoptant donc préférentiellement le codage imagé. Aussi, l'utilisation du codage verbal permettrait de traiter non seulement les aspects figuratifs des stimuli explorés (lorsque cela est possible), mais aussi et surtout les propriétés spatiales (positions relatives des éléments). Or, dans le cas du rappel de dessins composés de formes élémentaires emboîtées, le codage verbal serait essentiellement dédié au traitement des propriétés figuratives des dessins. Les relations spatiales unissant les formes élémentaires (emboîtement) étant simples et aisément mémorisables, l'exploitation d'un codage verbal présenterait un intérêt limité. Comme nous l'avons vu, le recours au PEC favorise le rappel des dessins, et pourrait à lui seul remplir cette fonction de codage des relations spatiales.

La deuxième raison pouvant être mise en avant pour rendre compte du rôle facilitateur du codage verbal dans le rappel des dessins uniquement chez les enfants les plus jeunes est que le maintien en mémoire des propriétés visuelles serait avant tout conditionné par la valeur sémantique des formes élémentaires constitutives des stimuli explorés. Les performances de rappel plus élevées pour les items composés de formes élémentaires connues que pour ceux comprenant des formes élémentaires abstraites ne seraient pas tant dues au caractère verbalisable ou non de ces dernières qu'à leur degré de familiarité. Les items composés de figures élémentaires familières permettraient l'activation de connaissances sémantiques stockées en MLT. L'activation de traces mnésiques renforcerait le maintien des données encodées. La récupération de connaissances sémantiques stockées en MLT faciliterait le rappel des dessins, l'activation de représentations (traces mnésiques) relatives à la forme des différentes figures élémentaires composant les dessins explorés étant encline à renforcer le maintien en mémoire des propriétés figuratives de ces derniers, en particulier chez les enfants les plus jeunes qui disposent de capacités mnésiques ou attentionnelles moins importantes ou efficaces que les enfants plus âgés (Case 1985 ; Gallina, 1998 ; Pascual-Leone & Baillargeon, 1994). Quels que soient les stimuli, verbalisables ou non, les enfants auraient recours à des représentations imagées, qui présenteraient une stabilité plus importante pour les dessins composés de formes élémentaires familières, en raison de l'activation de traces mnésiques en MLT.

Les données issues de cette expérience ont notamment permis de montrer que le codage verbal des informations visuo-spatiales joue un rôle facilitateur dans le rappel des dessins chez les enfants les plus jeunes, mais pas chez les sujets plus âgés. Ce résultat est en contradiction avec notre prédiction selon laquelle le codage verbal favoriserait le maintien en mémoire des informations visuo-spatiales avant tout chez les enfants les plus âgés, dans la mesure où ces derniers et les adultes privilégient ce type de codage (ou du moins l'exploitent, conjointement au codage imagé) alors que les enfants les plus jeunes adoptent préférentiellement le codage imagé (Bailleux & al., 2000 ; De Ribeaupierre & al., 2000 ; Fenner & al., 2000). C'est la raison pour laquelle nous avons suggéré qu'en réalité, ce n'est pas l'exploitation de représentations verbales qui serait à l'origine des meilleures performances de rappel pour les stimuli composés de formes élémentaires verbalisables (et donc connues) que pour ceux constitués de formes simples abstraites (parfaitement inconnues), mais plutôt la familiarité de ces formes. La reconnaissance de formes familières

serait associée à une activation de traces mnésiques (représentations imagées) qui rendrait le traitement moins coûteux (plus économique en termes de ressources mnésiques) et favoriserait ainsi le maintien des données en mémoire. Le rôle facilitateur de la familiarité des formes élémentaires dans le rappel des dessins deviendrait moindre au cours du développement, en raison de l'accroissement des capacités mnésiques. Ce résultat souligne l'importance de la base de connaissances dans la mémorisation d'informations, en particulier chez les jeunes enfants (Harris, Durso, Mergler & Jones, 1990 ; Siegler, 2001). Ainsi, le rappel des dessins ne serait pas conditionnée par le format, verbal et/ou imagé, d'encodage des informations visuelles. Dans l'expérience qui suit, nous sollicitons des enfants de même âge que ceux ayant participé à la présente expérience (sujets de 7, 9 et 10 ans) dans la résolution d'un problème d'exécution de dessins géométriques complexes, en les exposant directement aux deux formats de présentation des données, imagé ou verbal (propositionnel), afin d'étudier les changements relatifs au mode d'encodage des informations visuo-spatiales au cours du développement.

2.2. Analyse des stratégies de résolution d'un problème d'exécution de dessins géométriques complexes suite à la présentation imagée et textuelle des données (expérience 8)

Les résultats de l'expérience précédente suggèrent que l'accomplissement de la tâche de rappel des dessins n'est pas conditionnée par le format d'encodage des informations, imagé et/ou verbal, auxquels peuvent avoir recours les enfants au cours du développement. En vue de rendre compte du mode d'encodage privilégié au cours du développement, nous proposons de soumettre à des enfants de 7, 9 et 10 ans une même tâche, suivant deux modes de présentation des informations visuo-spatiales, l'un imagé, l'autre textuel. La tâche ici utilisée est semblable à celle présentée dans les expériences 2 et 3. Il s'agit de la résolution d'un problème d'exécution de figures complexes composés de formes géométriques élémentaires emboîtées à partir de la présentation morcelée des dessins (cibles), la mise en œuvre du PEC s'appuyant dans cette situation sur l'intégration cohésive des informations locales (construction de représentations unifiées des dessins-cibles).

Nous formulons l'hypothèse selon laquelle les enfants les plus jeunes seront davantage enclins à adopter le PEC pour la version imagée que pour la version textuelle, et inversement pour les enfants les plus âgés (interaction âge \times version significative), conformément aux données relatives aux changements liés au mode d'encodage des informations visuo-spatiales au cours du développement (Bailleux & al., 2000 ; De Ribeaupierre & al., 2000 ; Fenner & al., 2000 ; Hitch & al., 1988, 1989 ; Miles & al., 1996 ; Pelizzon & al., 1999).

2.2.1. Méthode

2.2.1.1. Population

90 enfants issus d'écoles primaires publiques de la région lyonnaise ont participé à l'expérience. Ils étaient répartis équitablement en trois groupes de niveau ou d'âge : CE1 (âge moyen : 7 ; 6 ans, $s=4$ mois), CM1 (âge moyen : 9 ; 5 ans, $s=4$ mois) et CM2 (âge moyen : 10 ; 6 ans, $s=4$ mois). L'expérience proposée ici faisant intervenir la lecture de phrases simples, nous avons préféré n'inclure que des enfants ayant bénéficié d'un apprentissage de la lecture suffisant pour leur permettre de décoder (et comprendre) sans difficulté les mots et disposant des connaissances conceptuelles (concernant le nom des figures géométriques simples de base) requises dans l'expérience (c'est pourquoi nous avons sollicité des enfants à partir du CE1).

2.2.1.2. Tâche

La passation était individuelle. Les enfants étaient invités à produire de manière successive une série de quatre dessins complexes composés chacun de trois figures géométriques élémentaires emboîtées, à partir d'informations locales concernant les propriétés visuo-spatiales de ces derniers. Ces informations locales renseignaient le sujet sur les positions relatives de deux des trois formes élémentaires. Elles se présentaient sous deux formes : imagée ou textuelle (cf. figure 26), la moitié des enfants de chacun des groupes d'âge effectuant la tâche dans la première de ces deux versions, l'autre moitié dans la deuxième.

En outre, quelle que soit la version (imagée ou textuelle), les informations relatives à chacun des items figuraient sur une carte (feuille de papier rectangulaire de 9×12 cm). L'enfant était invité à tirer tour à tour l'une des cartes. Chacune des cartes de la version imagée comportait trois dessins décalés régulièrement suivant les axes horizontal (un dessin en dessous du précédent) et vertical (décalage latéral vers la droite d'un dessin au suivant). De même, les phrases figurant sur les cartes de la version textuelle étaient décalées de façon similaire. Ainsi, pour les deux versions, les informations locales suivaient un sens de lecture selon la diagonale haut/gauche-bas/droite. Ce sens de lecture est celui adopté culturellement par les sujets occidentaux exposés aux écrits de langues alphabétiques. Aussi, les enfants encodant les informations locales de façon séquentielle auront recours à une stratégie d'exécution autre que le PEC. En effet, les items proposés étaient constitués de telle sorte que si le sujet intégrait séparément les informations locales de la première à la dernière (sans élaborer de représentation cohésive, unifiée du dessin à exécuter), alors il serait amené à adopter un procédé d'exécution non centripète.

Toutes les propositions étaient du type « La forme A *est dans* la forme B », l'expression « est dans » permettant de traduire la relation d'emboîtement entre les formes élémentaires caractérisant les dessins (les expressions « est à l'extérieur de » ou « est en dehors de » n'impliquant pas forcément l'inclusion des formes simples).

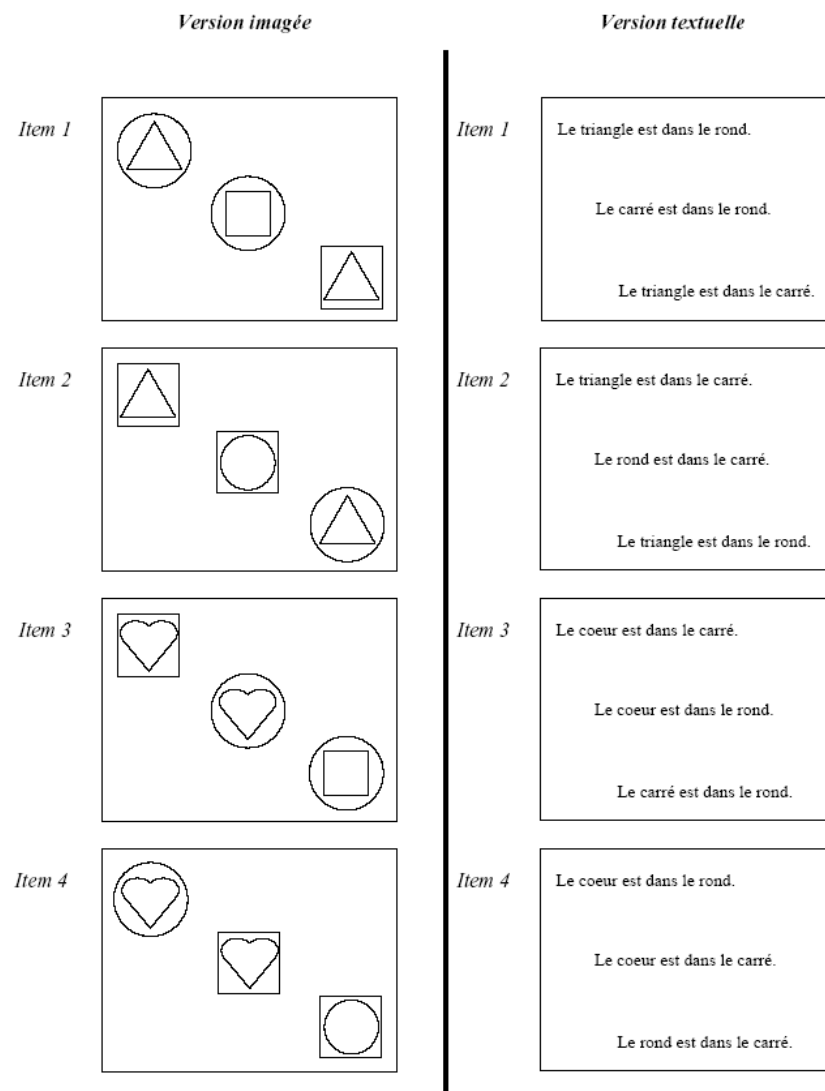


Figure 26 : Versions imagée et textuelle des informations locales présentées aux enfants concernant les propriétés visuo-spatiales des dessins à exécuter (échelle : ½).

La consigne utilisée pour la version imagée était la suivante : « On a pris trois photographies d'un même dessin complet. Par la suite, on a retiré dans chacune des photographies une partie du dessin complet, et l'on a modifié la taille de certaines des parties qui restaient sur chacune des photographies, mais en ne changeant par contre pas leur forme. En te servant des trois photographies qui seront sur la feuille que je vais placer juste à côté de toi, tu devras retrouver le dessin complet et le faire en mettant dans la boîte des feuilles de plastique les unes sur les autres qui seront éparpillées sur le papier blanc. Tu choisiras dans quel ordre tu déposeras les feuilles dans la boîte, mais à chaque fois que tu mettras une feuille dans la boîte tu ne pourras plus la récupérer pour te corriger. Attention de ne rien oublier ».

Les indications données pour la version textuelle étaient celles-ci : « Sur la feuille de papier que je vais placer juste à côté de toi seront inscrites trois phrases, que tu pourras lire autant de fois que tu le veux. Tu vas devoir faire un dessin qui correspond aux trois phrases à la fois. Tu feras le dessin en te servant de feuilles de plastique qui seront éparpillées sur

le papier blanc, que tu devras mettre les unes sur les autres. Tu choisiras dans quel ordre tu déposeras les feuilles dans la boîte, mais à chaque fois que tu mettras une feuille dans la boîte tu ne pourras plus la récupérer pour te corriger. Attention de ne rien oublier ».

L'exécution des dessins était là encore réalisée par superposition de transparents (pour la procédure, cf. expériences 2, 3 et 5). Afin que les versions imagée et textuelle apportent une quantité d'informations équivalente concernant les propriétés figuratives et spatiales des dessins à exécuter, la taille des différentes formes simples des items de la version imagée était fictive (tout comme la version propositionnelle, la version imagée ne fournissait pas d'indices sur la taille de chacune des formes élémentaires). Aussi, pour la version imagée, la taille des formes élémentaires figurant sur les transparents ne correspondait donc pas à celle des formes contenues dans les items (cf. figure 26), ce qui était précisé au sujet.

Pour chacun des items, l'expérimentateur relevait l'ordre de superposition des différentes formes élémentaires (l'ensemble des ordres de superposition choisis par les enfants sont regroupés dans l'annexe 8).

2.2.2. Résultats

Nous avons procédé à l'analyse de la variance selon le plan $S < A2 > * V2$ (où A désigne l'âge et V la version), en considérant comme variable dépendante le nombre d'items exécutés selon l'ordre centripète de superposition des formes élémentaires (valeur comprise entre 0 et 4). Si l'ANOVA a révélé que l'effet principal de l'âge est significatif ($F(2,84)=3,27$; $p<.05$), elle a également montré que cet effet est dépendant de la version présentée, l'interaction âge \times version étant elle aussi significative ($F(2,84)=3,15$; $p<.05$), comme l'illustre la figure 27. L'analyse des contrastes indique qu'alors que pour la version imagée, les trois groupes ne se distinguent pas significativement quant à l'usage du PEC, pour la version textuelle, les enfants de 7 ans adoptent moins souvent cette stratégie d'exécution que les enfants de 9 ans ($F(1,84)=5,24$; $p<.05$) et que ceux de 10 ans ($F(1,84)=12,21$; $p<.01$).

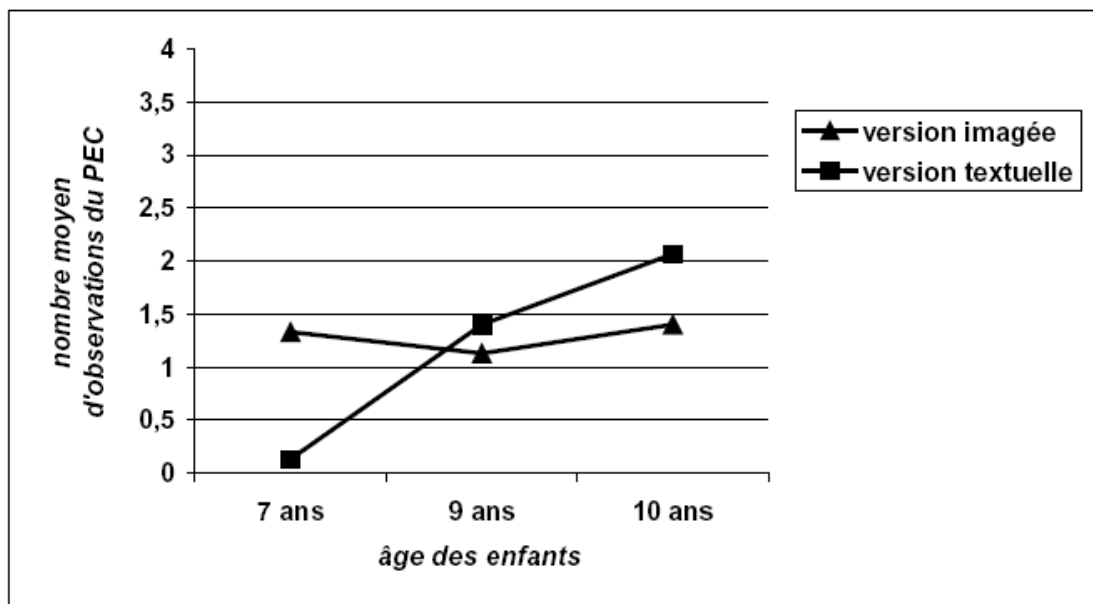


Figure 27 : Nombre moyen d'observations du PEC dans chacune des deux versions, en fonction de l'âge des enfants.

L'interaction âge × version témoigne ici également de la variabilité relative à l'effet de la version proposée sur le PEC au cours du développement : les enfants de 7 ans mettent plus souvent en œuvre le PEC lorsque les données du problème sont présentées dans un format imagé que dans un format textuel ($F(1,84)=4,70$; $p<.05$), alors que la différence entre les deux versions quant à la fréquence moyenne d'observations de la stratégie de l'exécution centripète n'est pas significative chez les enfants de 9 et 10 ans.

2.2.3. Discussion

Nous avons ici constaté que les enfants de 7 ans adoptent plus souvent le PEC dans la résolution du problème de coordination des informations locales lorsque les données sont présentées dans un format imagé que lorsqu'elles sont présentées dans un format textuel ou propositionnel, alors que la mise en œuvre de la stratégie de l'exécution centripète ne s'avère pas conditionnée par la version chez les enfants de 9 et 10 ans. Ce résultat conforte l'idée du recours privilégié au format imagé chez les enfants les plus jeunes dans le traitement d'informations visuo-spatiales (Bailleux & al., 2000 ; De Ribeaupierre & al., 2000 ; Fenner & al., 2000). L'évolution observée quant à l'usage du PEC dans la résolution du problème peut témoigner : 1/ soit d'une préférence de plus en plus marquée au cours du développement en faveur du codage propositionnel dans le processus d'intégration des informations spatiales, 2/ soit d'une plus grande difficulté des enfants les plus jeunes à construire une représentation globale ou unifiée des dessins-cibles (c'est-à-dire intégrant les propriétés d'ensemble de ces derniers).

La première interprétation pouvant être mise en avant afin d'expliquer l'effet différencié de l'âge dans les deux versions résiderait dans la mobilisation de représentations qualitativement distinctes dans chacune des conditions. La stabilité du PEC dans la version imagée et son évolution croissante pour la version textuelle entre 7 et 10 ans reflèteraient le recours efficace à des représentations différentes au cours du développement dans la résolution du problème (Case, 1985 ; Siegler, 2001). A l'âge de 7 ans, les enfants se représenteraient les données du problème et opèreraient des inférences sur celles-ci dans un format imagé. Aussi, les informations propositionnelles seraient alors converties en mémoire sous la forme d'images mentales (format analogique), ce qui rendrait le traitement des données plus coûteux dans la version textuelle que dans la version imagée (d'où la différence significative entre les deux versions quant à l'usage du PEC). Plus tard au cours du développement, par le biais des apprentissages relatifs à la lecture et à l'écriture permettant une plus grande maîtrise du langage, les enfants deviendraient progressivement capables de se représenter les informations du problème et d'effectuer mentalement des transformations sur ces dernières dans un format propositionnel (d'où l'absence de différence significative quant à l'apparition du PEC entre les deux versions à 9 et 10 ans). Dans le cas de la version textuelle, la résolution du problème s'avèrerait d'autant plus difficile pour les enfants les plus jeunes que ceux-ci disposent de capacités mnésiques plus réduites que les sujets plus âgés.

L'idée selon laquelle le codage verbal se substituerait progressivement au cours du développement au codage imagé des informations spatiales et à leur intégration en mémoire nous apparaît difficile à soutenir si l'on considère les résultats de l'étude conduite chez l'adulte par Blanc et Tapiero (2000) relative à l'effet du mode de présentation des informations dans l'apprentissage d'un environnement (virtuel) spatial (une île comprenant six éléments). En effet, il ressort clairement de leur recherche que les adultes apprennent plus facilement et rapidement l'environnement lorsque celui-ci est présentée sous la forme imagée d'une carte (mots isolés disposés dans un espace à deux dimensions) que lorsqu'il

est décrit textuellement (série de propositions dont chacune indique les positions relatives de deux des éléments qui constituent l'île). Aussi, comme d'autres auteurs, nous pensons qu'aussi bien dans le cas de la présentation d'une carte que dans celle d'un texte décrivant une configuration spatiale, les sujets s'engagent dans la construction de représentations spatiales imagées (Kulhavy, Lee & Caterino, 1985 ; Kulhavy, Stock, Verdi, Rittschoff & Savenye, 1993). Cependant, les étapes pour parvenir à l'intégration en mémoire des informations spatiales ne sont pas les mêmes dans les deux conditions. Alors que la carte offre un accès direct aux informations permettant la construction d'un « modèle spatial », le texte implique la construction d'une représentation de niveau intermédiaire : le niveau sémantique (Johnson-Laird, 1983 ; Perrig & Kintsch, 1985 ; Van Dijk & Kintsch, 1983). C'est pourquoi le modèle spatial construit à partir d'informations perceptives imagées s'avère plus précis et plus rapidement accessible que celui élaboré à partir d'informations textuelles.

Dès lors, il est possible d'envisager la raison majeure pour laquelle les enfants les plus jeunes témoignent d'une plus grande capacité de coordonner et d'intégrer en mémoire les informations visuo-spatiales locales afin de construire une représentation globale des dessins-cibles (l'émergence du PEC témoignant de cette capacité) pour la version imagée par rapport à la version textuelle de la tâche, alors que cette capacité n'est pas conditionnée par la version chez les enfants plus âgés. La capacité de conversion des informations textuelles en informations imagées serait liée à la maîtrise du langage écrit. Les enfants les plus jeunes possédant des compétences langagières supérieures à celles des enfants plus âgés, ils éprouveraient davantage de difficulté à transformer les données textuelles en images mentales. Cette opération mobiliserait une partie des ressources cognitives des enfants qui ne serait pas sollicitée pour la version imagée (cette dernière fournissant un accès direct aux informations imagées). L'absence de différence significative entre les deux versions quant à l'émergence du PEC chez les sujets de 9 et 10 ans pourrait s'expliquer par le fait qu'à cet âge, les enfants possèdent déjà une assez bonne maîtrise du langage écrit, la conversion des informations textuelles en images mentales pouvant se faire aisément (les phrases lues étant d'une grande simplicité). Au développement des compétences langagières peut en outre s'ajouter celui des capacités mnésiques. Les opérations mentales relatives à l'activité inférentielle ou déductive et à la planification de l'action mises en jeu dans la tâche s'effectueraient plus facilement et plus efficacement avec l'accroissement de la capacité de maintien des informations en mémoire (Baddeley, 1996 ; Case, 1978 ; Case & Sandlos, 1980 ; Cowan, 1997 ; Siegler, 2001) nécessaire à la coordination des informations locales et à la construction de représentations unifiées des dessins-cibles. Les enfants les plus jeunes seraient par conséquent moins enclins à recourir au PEC que les enfants plus âgés dans la condition de présentation textuelle parce que cette dernière mobiliserait de manière plus accrue les ressources cognitives du sujet, ce qui serait notamment susceptible de provoquer une surcharge mnésique.

2.3. Discussion générale

Les deux expériences venant d'être présentées nous laissent envisager deux hypothèses quant au format des représentations exploitées au cours du développement dans le rappel de dessins complexes (expérience 7) et la résolution du problème de coordinations d'informations locales (expérience 8).

La première d'entre elles est en accord avec l'idée largement soutenue que les enfants les plus jeunes utilisent préférentiellement le codage visuel ou imagé dans la réalisation d'épreuves spatiales, alors que les enfants plus âgés recourent préférentiellement au codage verbal des informations spatiales dès lors que la tâche le permet.

La deuxième consiste à penser que l'exploitation de représentations imagées serait davantage propice que celle de représentations verbales ou propositionnelles au traitement des données visuo-spatiales, quel que soit l'âge des enfants. Les représentations spatiales demeureraient des représentations imagées, mais la capacité de construction de ces dernières dans divers contextes expérimentaux évoluerait au cours du développement.

Dans ce qui suit, nous reconsidérons ces deux hypothèses au regard des résultats des expériences 7 et 8 et des données issues d'autres recherches.

Considérant à priori dans l'expérience 7 le rôle du codage verbal des informations visuo-spatiales dans le rappel des dessins, les résultats obtenus nous ont indiqué que ce type de codage serait davantage exploité par les enfants les plus jeunes que par les sujets plus âgés. Cette conclusion allant à l'encontre de nombreux travaux démontrant le recours privilégié chez les jeunes enfants au codage imagé et l'adoption préférentielle du codage verbal chez les enfants plus âgés ainsi que chez les adultes dans l'encodage d'informations spatiales (Bailleux & al., 2000 ; Fenner & al., 2000 ; Hitch & al., 1988, 1989 ; Miles & al., 1996 ; Pelizzon & al., 1999), nous avons émis l'hypothèse selon laquelle le rappel des informations visuo-spatiales serait facilité chez les sujets les plus jeunes (qui disposent de capacités de maintien des informations en mémoire plus réduites que leurs aînés) par la familiarité des formes géométriques composant les stimuli explorés, en raison de l'activation de traces mnésiques (représentations imagées) en MLT. Comme d'autres auteurs, nous pensons que vraisemblablement, la capacité de transformation d'une information dans un format visuel à un format phonologique dans une tâche mnésique est étroitement liée à l'acquisition de la langue (Conant & al., 1997 ; Fastenau & al., 1998 ; Logie & al., 2000). C'est pourquoi il nous semble peu probable que, chez les enfants les plus jeunes, le maintien des informations visuo-spatiales puisse s'expliquer par l'adoption d'un codage verbal. L'un des moyens de s'en assurer consisterait à recourir au paradigme de double tâche (De Ribeaupierre & al., 2000 ; Miles & al., 1996 ; Pickering, 2001), qui rendrait compte de l'effet de la suppression articulatoire (boucle phonologique rendue inopérante ou perturbée par la prononciation répétée d'une syllabe ou d'un mot) durant la phase d'encodage. La tâche principale de rappel pourrait également être combinée à une tâche secondaire visuo-spatiale visant à perturber le codage imagé des données en demandant à l'enfant de dessiner de façon continue au cours de l'encodage une figure géométrique simple connue. La comparaison des conditions de rappel associé à une tâche concourante verbale, à une tâche concourante visuo-spatiale, ainsi que de la condition contrôle de rappel simple (sans tâche concourante, celle-ci visant à évaluer l'impact des tâches concourantes dans le maintien en mémoire des données encodées) permettrait de déterminer le format de codage des informations visuo-spatiales adopté préférentiellement par les enfants au cours du développement.

Aussi, s'il s'avère que dans la tâche de rappel telle qu'elle est présentée ici la familiarité des informations encodées n'améliore pas la performance chez les enfants les plus âgés, il se peut que ce soit parce que ces derniers disposent de ressources mnésiques suffisamment importantes pour retenir efficacement tous les dessins, même ceux composés de formes élémentaires abstraites. Une méthode pouvant permettre de vérifier cette hypothèse consisterait à mobiliser davantage les ressources mnésiques (capacité de mémoire de travail) des enfants, en diminuant le temps d'exploration des stimuli, ou en augmentant la quantité d'informations devant être encodées (ajout d'une ou de plusieurs formes élémentaires dans chacun des items) ou le délai du rappel (intervalle de temps entre les phases d'exploration et d'exécution des dessins). Dans de telles conditions expérimentales, on pourrait s'attendre, non plus seulement chez les enfants les plus jeunes mais également chez les sujets plus âgés, à une performance de rappel supérieure pour

les items contenant des formes élémentaires familières que pour ceux constitués de formes simples abstraites. Toutefois, si tel est le cas, le rôle facilitateur de la familiarité des formes élémentaires chez les enfants plus âgés pourrait être dû à l'activation de représentations imagées ou verbales (ou au double codage, verbal et imagé, des informations visuo-spatiales).

Si l'expérience 8 a en outre permis de conforter l'idée que les enfants les plus jeunes préfèrent recourir au codage imagé qu'au codage verbal ou propositionnel dans le traitement des informations visuo-spatiales, elle n'a néanmoins pas permis de mettre en évidence clairement l'adoption privilégiée du codage verbal chez les enfants plus âgés. Si l'interaction âge × version peut être interprétée comme un argument en faveur de l'idée d'une évolution croissante de la stratégie de codage verbal des informations visuo-spatiales, la fréquence moyenne d'observations du PEC augmentant au cours du développement pour la version textuelle et demeurant stable pour la version imagée, elle pourrait également correspondre à la plus grande aptitude des enfants de 9 et 10 ans à convertir les informations textuelles en images mentales visuelles comparativement aux enfants de 7 ans (ce qui expliquerait pourquoi le PEC s'avère beaucoup plus prégnant pour la version imagée que pour la version textuelle chez les enfants les plus jeunes, alors que la différence entre ces deux versions quant à l'émergence du PEC n'est pas significative chez les enfants plus âgés). En vue de déterminer laquelle de ces deux interprétations est la plus probable, il serait intéressant d'observer l'évolution du PEC plus tardivement au cours du développement (en ajoutant, par exemple, un groupe de sujets adultes), afin de déterminer si le codage verbal des informations visuo-spatiales devient prévalent par rapport au codage imagé, ou si ces deux types de codage se stabilisent ou évoluent parallèlement.

3. Le rôle du format des représentations dans l'émergence du PEC : conclusion

Les résultats des trois expériences de ce chapitre ont permis de montrer que si l'imagerie visuelle n'est pas un pré-requis au traitement des informations visuo-spatiales et qu'elle ne constitue pas l'unique moyen de représentation de ces informations. L'expérience 6 a en effet montré que les enfants voyants et aveugles précoces recourent de façon privilégiée au même mode d'organisation de l'exécution dans la reproduction haptique des dessins (prévalence du PEC). Ainsi, comme le suggèrent de nombreux travaux (Cornoldi & al., 1991, 1993 ; D'Angiulli, Kennedy et Heller, 1998 ; Golledge et al., 2000 ; Heller, 2002 ; Heller & al., 2001, 2002 ; Kennedy, 1993, 1997 ; Kennedy & Markas, 2000), l'expérience visuelle n'est pas indispensable à l'analyse d'informations spatiales. Aussi, le format d'encodage des données spatiales pourrait dépendre de l'expérience perceptive du sujet. Alors que, depuis sa naissance, le sujet voyant utilise de manière quasi exclusive la vision pour se représenter l'environnement spatial, le sujet aveugle précoce développe des habiletés d'exploration manuelle pour acquérir des connaissances spatiales. Dans ces conditions, on peut concevoir que le format d'encodage privilégié par les enfants dans le traitement haptique des propriétés spatiales soit déterminé par leur statut visuel. Alors que chez les enfants voyants, les informations explorées manuellement seraient enclines à être converties en images mentales visuelles, par le biais du processus de médiation visuelle (Klatzky et Lederman, 1987), ces mêmes informations feraient l'objet d'un codage moteur ou haptique (basé sur des indices proprioceptifs ou tactilo-kinesthésiques) chez les enfants aveugles précoces.

En outre, comme l'a montré l'expérience 7, la familiarité des informations encodées est susceptible de favoriser l'intégration et le maintien en mémoire des données visuo-spatiales. L'activation de représentations stockées en MLT (traces mnésiques) lors de la reconnaissance de formes connues serait propice à la rétention des stimuli explorés. Ces représentations pourraient du reste revêtir une forme imagée comme motrice ou verbale. Toutefois, comme en atteste l'expérience 8, l'exploitation de représentations verbales ou propositionnelles dans le traitement d'informations visuo-spatiales est liée à l'âge des enfants, ou plus précisément à la maîtrise de la langue (Conant & al., 1997 ; Fastenau & al., 1998 ; Logie & al., 2000). Au cours du développement, les mécanismes sous-tendant la lecture (décodage des mots écrits et compréhension) s'automatiseraient, ceux-ci mobilisant alors de moins en moins les ressources cognitives de l'enfant. Dans le cas de la résolution d'un problème tel que celui proposé dans l'expérience 8, ces dernières, davantage disponibles, pourraient ainsi être mobilisées pour les autres opérations ou traitements requis en vue d'atteindre le but fixé par la tâche. En particulier, les capacités d'intégration et de maintien en mémoire des données en jeu dans la mise en œuvre du PEC seraient préservées (rendues disponibles). A cet égard, nous avons établi une relation (corrélation positive) entre la capacité de maintien des informations en mémoire et l'usage du PEC dans le rappel des stimuli (expérience 7). Dans cette tâche, l'enfant ne disposant que d'un temps limité (quelques secondes) et unique (une seule consultation) relativement à l'exploration des stimuli, il doit nécessairement construire une représentation globale ou unifiée des dessins (c'est-à-dire intégrant l'ensemble des informations contenues dans chacun des items). Aussi, nous avons vu que les enfants disposant de capacités mnésiques suffisantes pour élaborer de telles représentations sont ceux qui utilisent le plus souvent le PEC. Ce résultat peut toutefois s'expliquer de deux façons :

1. l'intégration cohésive des données visuo-spatiales en mémoire (rendue possible par la rétention des propriétés d'ensemble des stimuli) favoriserait l'émergence du PEC.
2. ou/et le recours au PEC faciliterait le maintien en mémoire des informations encodées.

La relation entre l'usage du PEC et le maintien des informations visuo-spatiales pourrait être non pas univoque, mais réciproque (les capacités mnésiques importantes d'un enfant pourraient s'avérer propices à l'adoption du PEC, et cette dernière pourrait en retour faciliter la rétention des stimuli). Dans les deux cas, le PEC constituerait un procédé d'exécution organisé (relevant de la structuration perceptive des stimuli explorés) efficace dans l'accomplissement de la tâche.

BILAN ET PERSPECTIVES

Comme nous l'avions mentionné dans l'introduction de cette recherche, l'étude de l'activité de dessin permet l'analyse de mécanismes de bas niveau ayant trait au système perceptivo-moteur et de processus de haut niveau liés au système représentationnel/mnésique, et contribue donc à la compréhension du fonctionnement et du développement cognitifs. Ce travail en apporte à nouveau la confirmation, en montrant qu'à travers l'examen des stratégies d'exécution de dessins complexes (organisation syntaxique), nous avons pu rendre compte de l'évolution d'une pluralité de processus cognitifs et du rôle de ces derniers dans le traitement d'informations visuo-spatiales.

Pour conclure, nous reviendrons dans un premier temps sur le rôle du contenu et du format des représentations dans l'émergence du PEC. Nous dresserons le bilan des résultats issus des huit expériences présentées dans cette recherche. Cette synthèse visera notamment à rendre compte des liens pouvant exister entre le contenu et le format des représentations, et des mécanismes intervenant dans les différentes tâches, ainsi que de l'évolution de ces derniers au cours du développement. Puis nous reviendrons plus spécifiquement sur le format des représentations sous l'angle du processus de redescription représentationnelle, central dans le modèle développemental de Karmiloff-Smith (1990, 1992, 1994, 1999). Enfin, nous évoquerons les perspectives de ce travail sur les plans théorique, expérimental et pédagogique.

1. Rôle du contenu et du format des représentations dans l'émergence du PEC

L'ensemble des données issues des deux séries d'expériences conduites dans le cadre de cette recherche nous amène à dégager deux conclusions principales :

1. Si l'émergence ou la mise en œuvre du PEC dépend du contenu des représentations construites, les mécanismes ou les fonctions qui sous-tendent à l'usage de ce principe diffèrent selon la tâche accomplie par les enfants. Trois épreuves résidant dans l'exécution de dessins complexes ont été proposées ici : la copie, le rappel et la résolution d'un problème de coordination d'informations locales. L'adoption du PEC dans chacune de ces tâches ne repose pas sur les mêmes processus.
2. Le contenu des représentations (processus d'intégration des informations) est conditionné par le format d'encodage des données. La capacité de construction de représentations unifiées des dessins est liée à la nature (imagée, textuelle, motrice) des représentations que les enfants peuvent élaborer ou exploiter efficacement. Il existe donc une interaction entre le contenu et le format des représentations.

Dans ce qui suit, nous revenons sur les mécanismes en jeu dans l'émergence du PEC dans les tâches de copie, de rappel et de coordination d'informations locales ainsi que sur leur développement, en montrant que ces processus peuvent être déterminés conjointement par le contenu et le format des représentations.

Les divergences relatives à l'évolution du PEC au cours du développement dans les tâches de copie, de coordination d'informations locales et de rappel suggèrent que l'usage de ce procédé d'exécution résulte de l'intervention de processus différents dans les trois épreuves :

- Dans la tâche de copie, la forte prégnance de ce principe chez les enfants les plus jeunes (à partir de cinq ans) et sa stabilité au cours du développement (expériences 1, 2 et 5) suggèrent que la mise en œuvre du PEC relève essentiellement de mécanismes sensoriels (de bas niveau), liés à l'appréhension perceptive des stimuli déterminée par les caractéristiques configurales des stimuli explorés (agencement des différentes formes élémentaires) donnant naissance à une propriété émergente. Nous avons montré que l'existence de cette dernière est conditionnée par le mode de traitement et les caractéristiques visuelles des stimuli. Le PEC s'est en effet avéré moins prégnant en exploration visuelle qu'en exploration haptique (expérience 1), la modalité visuelle permettant un traitement global des stimuli alors que le traitement séquentiel caractérisant la modalité haptique conduit à une appréhension morcelée des dessins. Nous avons également constaté l'effet perturbateur de la suppression de feedback visuel sur le PEC. Là encore, la suppression des indices visuels tout au long de la production des dessins est susceptible d'entraver le traitement holistique des stimuli explorés, qui ne peuvent dès lors plus être perçus comme des totalités, c'est-à-dire comme des ensembles d'informations unies par des liens configuraux fortement cohésifs. Ces liens cohésifs semblent notamment dépendre des propriétés visuelles des éléments constitutifs des dessins. Nous avons vu que l'introduction de variations de la saillance visuelle d'informations locales (mise en relief de l'une des formes géométriques élémentaires) est susceptible de modifier la perception des dessins et par conséquent l'organisation de l'exécution de ces derniers (expérience 4), en « désolidarisant » les éléments contenus dans les stimuli explorés. La sensibilité du système visuel à certaines irrégularités perceptives prégnantes serait alors à l'origine d'un changement dans le mode d'appréhension ou de structuration des dessins lorsque les informations encodées présentent un caractère hétérogène ou contrasté susceptible d'induire une discrimination des différentes parties des stimuli sur la base de leur valeur ou de leur « poids » perceptif.
- Dans la tâche de rappel (expérience 7), l'adoption du PEC serait avant tout conditionnée par la capacité de rétention des informations encodées, nécessaire dans la construction de représentations globales des stimuli. La capacité de maintien en mémoire des données encodées jouerait alors un rôle crucial dans l'adoption du PEC. Nous avons observé que les enfants de 7 et 9 ans obtiennent des performances supérieures dans le rappel de stimuli lorsque ces derniers comportent des informations familières que lorsqu'ils sont constitués d'éléments abstraits, inconnus. La base de connaissances constitue ainsi une aide importante dans le maintien en mémoire des informations, en particulier chez les enfants les plus jeunes, qui disposent de capacités mnésiques moindres. Aussi, le lien (corrélation significative) existant entre la performance de rappel et l'usage du PEC chez les enfants de 9 et 10 ans suggère que la manière dont les enfants se représentent les stimuli (qui détermine le procédé d'exécution auquel ils ont recours) pourrait être conditionnée par leur capacité de maintien des données en mémoire, et/ou que, inversement, le mode d'appréhension ou de structuration perceptive des stimuli (à l'origine du choix d'utiliser ou non le PEC) influe sur l'intégration et la rétention des informations. Dans la mesure où, dans la situation de copie, dès l'âge de 5

ans le PEC s'avère très prégnant et demeure stable au cours du développement (expériences 1, 2 et 5), les enfants appréhendant donc les stimuli de façon similaire quel que soit leur âge, nous privilégions la première des deux hypothèses. Le manque de capacités mnésiques nécessaires au rappel des stimuli rendrait instables et imprécises les représentations construites, qui pourraient dès lors être sujettes à des dégradations ou une destructuration aboutissant à l'usage de procédés d'exécution non organisés.

Dans la tâche de coordination d'informations locales, l'élaboration de la stratégie de l'exécution centripète s'appuierait sur une opération de planification de l'action reposant sur une activité inférentielle visant à définir les positions relatives des formes élémentaires constitutives des dessins-cibles recherchés. Dans cette situation, contrairement aux deux précédentes, la mise en œuvre du PEC se base sur des informations ou connaissances non perçues directement, mais nécessite d'opérer des transformations sur les données préalablement à l'exécution des dessins. L'exercice d'un contrôle pro-actif s'avère alors indispensable. Aussi, la capacité à effectuer des inférences spatiales évolue au cours du développement, ce qui expliquerait l'augmentation de la fréquence d'apparition du PEC entre 6 et 10 ans (expérience 2). Néanmoins, tout comme dans la tâche de copie, la résolution du problème de coordination d'informations locales mobiliserait peu les capacités attentionnelles ou mnésiques des enfants lorsque la quantité d'informations à traiter et/ou le nombre d'inférences spatiales à réaliser sont restreints, la présence de troubles attentionnels n'ayant pas d'incidence sur l'usage du PEC (expérience 3). En revanche, on peut penser que lorsque plusieurs inférences spatiales sont requises dans la tâche (ce qui aurait pour effet une augmentation de la charge de travail en mémoire), la mise en œuvre du PEC puisse, comme dans la tâche de rappel, reposer sur la construction de représentations globales ou unifiées des dessins-cibles, c'est-à-dire de représentations intégrant les données du problème de façon cohésive. L'élaboration de telles représentations ou « modèles mentaux » (Blanc & Tapiero, 2000 ; Johnson-Laird, 1983 ; Van Dijk & Kintsch, 1983 ; Kulhavy & al., 1985, 1993) mobiliserait également la capacité de maintien des propriétés visuo-spatiales.

Ainsi, dans les trois tâches, le PEC reflèterait un traitement holistique des données. Toutefois, ce dernier ne serait pas sous-tendu par les mêmes mécanismes, ce qui explique les variations relatives à l'évolution du PEC au cours du développement entre les tâches.

Les données recueillies dans cette recherche indiquent non seulement que les processus sous-jacents à l'adoption du PEC diffèrent selon la tâche réalisée, mais également que l'efficacité fonctionnelle de ces processus (caractère plus ou moins opérationnel) est dépendante du (des) format(s) des représentations pouvant être exploité(s) par les enfants. Nous avons vu que les enfants amblyopes précoces recourent moins souvent au PEC que les enfants voyants et aveugles précoces dans la reproduction haptique des dessins (expérience 6). Une explication possible à ce phénomène est que le traitement des informations visuo-spatiales peut être conditionné par l'expérience perceptive des enfants et la qualité (spécification) des représentations stockées en MLT. En raison de leur expérience perceptive, les enfants voyants et aveugles congénitaux disposeraient de représentations précises (visuelles pour les premiers et haptiques ou tactilo-kinesthésiques pour les seconds), pouvant être exploitées efficacement dans la reconnaissance des formes géométriques élémentaires. L'activation de ces représentations (qui constituent des traces mnésiques) faciliterait la rétention des informations et leur intégration au sein de représentations unifiées des dessins. Les enfants amblyopes

précoces présentant un déficit visuel et un exercice de la modalité haptique (exploration manuelle) beaucoup plus réduit que les enfants aveugles précoces, ils ne seraient en mesure de recourir à des représentations visuelles ou haptiques précises susceptibles de faciliter le maintien des informations encodées pour la construction de représentations globales des dessins. De même, nous avons constaté que, chez les enfants de 7 ans (mais pas chez ceux de 9 et 10 ans), l'usage du PEC dans la résolution du problème de coordination d'informations locales est conditionné par le mode de présentation, imagé ou textuel, des données (expérience 8). Ce résultat peut signifier que les représentations imagées sont exploitées de manière privilégiée par rapport aux représentations verbales ou propositionnelles par les enfants les plus jeunes, alors que les enfants plus âgés recourent aussi efficacement à ces deux formats de représentations. L'activation de représentations verbales pourrait alors dépendre de l'expérience langagière des enfants (maîtrise du langage écrit acquise par le biais des apprentissages en lecture-écriture et permettant l'établissement de représentations verbales stables).

2. Les changements relatifs au format des représentations à travers le modèle développemental de Karmiloff-Smith

Comme nous l'avons souligné précédemment, les résultats de notre travail suggèrent que la mise en œuvre du PEC serait dépendante du (des) format(s) représentationnel(s) au(x)quel(s) les enfants peuvent recourir efficacement. L'adoption du PEC dans différentes tâches ou situations seraient notamment déterminées par la variété des types de représentations pouvant être exploités par les enfants au cours du développement. Dans cette optique, le modèle développemental de Karmiloff-Smith (1990, 1992, 1999) apparaît particulièrement pertinent pour rendre compte de la généralisation progressive du PEC au cours du développement à différents contextes expérimentaux, à partir de l'activation possible de représentations qualitativement différentes mais fonctionnellement équivalentes. Ainsi, une multiplicité de représentations distinctes pourrait répondre (output : le comportement observé) à un même input (informations en entrée). L'idée que nous mettons en avant ici est que l'accès à des représentations pouvant revêtir des formes diverses serait sous-tendu par le processus de redescription représentationnelle central dans la théorie de cet auteur. Cette conception dynamique est en outre en accord avec celle des modèles pluralistes du développement s'inscrivant dans une approche différentielle (Lautrey, 1989 ; 1995 ; Lautrey & Caroff, 1997, 1999). L'interaction (et la compétition) de processus vicariants (Reuchlin, 1985 ; 1999) pourrait constituer la source du développement cognitif.

Rappelons que le modèle de Karmiloff-Smith (1990, 1992, 1994, 1999), consacré initialement au domaine du langage, a été par la suite appliqué à d'autres domaines, tels que l'activité de dessin et la résolution de problèmes. Il se fonde sur l'hypothèse d'une modularisation graduelle par le biais d'un processus de redescription représentationnelle, qui rend compte de la manière dont les représentations des enfants deviennent progressivement plus flexibles et manipulables au cours du développement. Toutefois, nous défendons la position de Barlow, Jolley, White et Galbraith (2003) selon laquelle les changements développementaux visibles au niveau comportemental ne peuvent provenir uniquement d'un processus de redescription représentationnelle, mais résultent également

de processus de traitement de l'information (en particulier les capacités de mémoire de travail et de planification de l'action). Karmiloff-Smith (1990, 1992, 1994, 1999) postule quatre niveaux sous-tendant le processus de redescription représentationnelle, en précisant que ce dernier peut être déclenché de manière endogène (spontanément) ou exogène (par exemple, par un apprentissage).

Au niveau implicite (I), les représentations sont stockées sous la forme de procédures ou de patterns d'actions répondant de manière automatique (implicite) à des inputs spécifiques. Celles-ci sont encapsulées, indépendantes. Si deux procédures ou patterns d'actions contiennent une même information (mais sous des formes différentes), le stockage de l'information en mémoire à long terme est double (un pour chaque procédure). Les diverses représentations construites ne sont pas reliées entre elles (l'inter-représentation n'est pas encore disponible).

Au niveau explicite 1 (E1), les représentations du niveau I, stabilisées en raison du succès procédural (répétition de feedbacks positifs), sont redécrites de façon plus générale (perte de détails). Elles sont, d'une part, plus simples et moins spécialisées et, d'autre part, plus flexibles au plan cognitif. Néanmoins, les représentations du niveau I demeurent intactes et peuvent être sollicitées dans des situations spécifiques demandant rapidité et efficience. Les représentations redécrites sont utilisées pour atteindre des objectifs qui requièrent une connaissance explicite. Au niveau E1, les représentations du niveau I sont définies de façon explicite, ce qui permet l'établissement de liens (interconnexions) entre les représentations contenant la même information sous des formes différentes (une même connaissance appartenant à deux procédures est stockée une seule fois en mémoire à long terme). Toutefois, les représentations de ce niveau ne sont pas accessibles à la conscience et ne peuvent faire l'objet d'un compte-rendu verbal.

Au niveau explicite 2 (E2), les connaissances représentées font l'objet d'un contrôle intentionnel, volontaire, mais ne sont toujours pas verbalisables. Les représentations sont donc accessibles à la conscience, mais sont stockées dans un code similaire aux représentations de type E1 à partir desquelles elles ont été redécrites.

Au niveau explicite 3, les connaissances sont recodées dans un format linguistique, inter-système, commun à toutes les représentations. Des connaissances apprises directement sous une forme linguistique peuvent être immédiatement stockées au niveau E3, sans pour autant être encore reliées à des représentations d'un autre format.

Ainsi, le produit final du processus de redescription représentationnelle est l'existence de multiples représentations pour une même connaissance. Selon Karmiloff-Smith, le développement cognitif ne suivrait pas un principe d'économie du système, ce dernier accumulant des connaissances redondantes, des représentations polymorphes d'informations de même contenu.

L'hypothèse de la diversification progressive du format de représentations contenant des informations identiques apparaît pertinente pour expliquer la stabilisation et la généralisation du PEC à différents contextes expérimentaux au cours du développement. Le caractère polymorphe des représentations expliquerait l'efficacité du traitement des données en entrée (*input*) dans des conditions variées quant au mode de présentation de ces dernières.

Ainsi, le traitement ou la représentation des informations visuo-spatiales dans la copie de dessins complexes composés de formes élémentaires s'appuierait sur des connaissances stockées dans la base de connaissances du sujet dans des formats différents selon la modalité d'exploration perceptive sollicitée. Dans le cas de l'exploration

visuelle des stimuli, la reconnaissance des formes simples activerait de manière directe des représentations imagées. Dans la situation d'exploration haptique, l'enfant exploiterait des représentations tactilo-kinesthésiques ou motrices (connaissances de séquences de mouvements générés dans l'exploration ou le tracé de formes géométriques). Néanmoins, l'efficacité du traitement pourrait dépendre de la stabilité des représentations construites et de la force des liens unissant les représentations polymorphes d'une même connaissance. L'exploitation directe de représentations dans un format particulier concernerait des connaissances acquises précocement, stabilisées et ancrées fortement par un processus de répétition. Le recours à une médiation, résidant dans la récupération indirecte d'une connaissance sous une première forme (représentation redécrite) suite à l'activation d'une représentation sous une deuxième forme, serait induit par la compétition entre les deux représentations interconnectées. En raison de sa plus grande stabilité, la représentation secondaire présenterait alors un niveau d'activation beaucoup plus élevé que la représentation première. Le recours au processus de médiation serait rendu possible par la formation de liens suffisamment forts entre des représentations de différents formats nés de la multiplication d'expériences perceptives ou d'apprentissages. L'établissement de connexions inter-représentationnelles requièreraient un degré minimum de stabilité des représentations redécrites. La figure 28 illustre les différents circuits ou cheminements pouvant être empruntés dans le processus d'intégration des informations encodées dans différentes tâches ayant pour but l'exécution de dessins complexes composés de formes élémentaires.

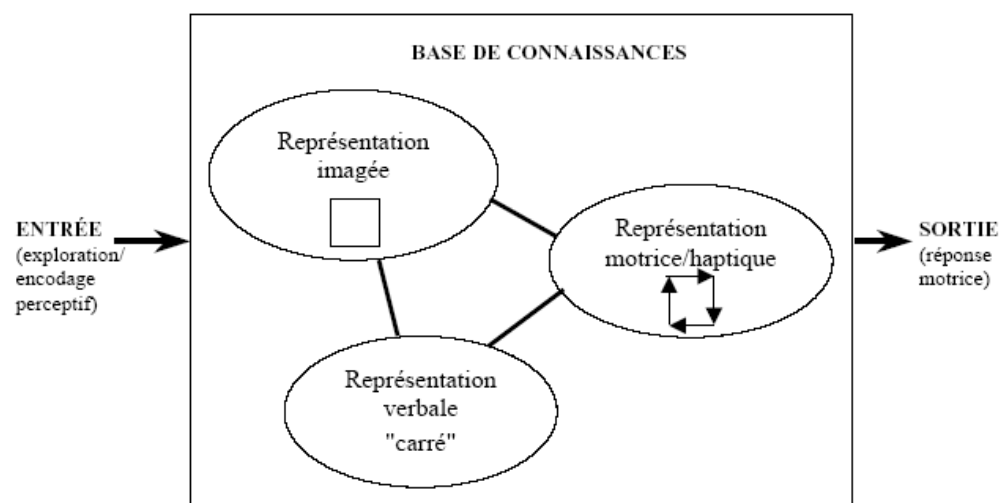


Figure 28 : Les différentes voies (directes et indirectes) pouvant être empruntées dans le processus d'intégration des informations visuo-spatiales.

Concernant l'exécution de dessins complexes composés de formes simples, au moins trois types de représentations peuvent intervenir dans le traitement des données selon la tâche ou le contexte expérimental. Les liens inter-représentationnels s'établiraient grâce au processus de redescription. Les représentations imagées seraient exploitées dans la reproduction visuelle des dessins. Les représentations motrices ou haptiques (tactilo-kinesthésiques) seraient activées lors de la reconnaissance haptique des formes. Celles-ci seraient en outre récupérées pour le tracé des formes élémentaires. Toutefois, dans leur fonction d'intégration des données visuo-spatiales, elles seraient relayées par les représentations imagées (médiation) en raison de la plus grande stabilité de ces dernières.

En revanche, l'expérience haptique très développée des enfants aveugles précoces leur permettraient de recourir directement et de manière efficace aux représentations motrices. De même, en fonction du niveau de stabilité des représentations verbales ou propositionnelles et de la tâche à accomplir, ces dernières pourraient être exploitées de façon directe ou donner lieu à une médiation.

Nous mentionnons ici trois types de formats représentationnel (imagé, moteur et verbal) que peut revêtir une même information, mais n'excluons pas l'existence d'autres types de représentations stockées dans la base de connaissances du sujet. De plus, les représentations sensori-motrices (connaissances construites et stabilisées par l'expérience perceptivo-motrice) seraient disponibles plus précocement que les représentations abstraites (connaissances linguistiques acquises à partir d'apprentissages explicites).

3. Perspectives

Il serait tout d'abord intéressant de tester l'hypothèse du processus de redescription représentationnelle comme moteur de changements développementaux sur laquelle se fonde le modèle théorique de Karmiloff-Smith (1990, 1992, 1999), comme le préconise l'auteur, à travers l'examen des circuits cérébraux intervenant selon l'âge des enfants et/ou leurs déficits. En effet, concernant le format de stockage des informations visuo-spatiales, les résultats établis sur la base de l'examen de l'organisation syntaxique de dessins complexes dans le cadre de cette recherche suggèrent l'exploitation de représentations imagées, verbales et/ou motrices suivant les tâches accomplies, l'âge des enfants et leur statut visuel. Ces données comportementales pourraient être confortées par des observations neuropsychologiques, au moyen de techniques d'imagerie cérébrale (IRMf ou TEP). Ces dernières permettraient de visualiser en temps réel les aires activées dans la réalisation des différentes tâches (en particulier les aires visuelles, langagières et motrices), et d'apporter la preuve, au niveau du substrat biologique, du recours à des représentations spécifiques au statut visuel des enfants, et faisant l'objet de changements au cours du développement.

En outre, comme l'ont fait Gentaz, Colé et Bara (2003) pour l'apprentissage de la lecture chez de jeunes enfants, un entraînement à la reconnaissance haptique de formes pourrait permettre de stabiliser les représentations motrices ou d'élaborer des connexions inter-représentationnelles. En particulier, l'usage de la modalité haptique pourrait conduire l'enfant à traiter les informations de façon séquentielle, et donc analytique, alors qu'il recourrait à des représentations imagées de façon implicite et rigide. Le processus de redescription représentationnelle permettrait ainsi une plus grande flexibilité cognitive. L'explicitation des représentations permettrait la construction de connexions inter-représentationnelles offrant le choix entre plusieurs alternatives en réponse à une même entrée et donc la sélection possible d'une solution adéquate et efficace. De plus, l'étude de l'effet de cet entraînement chez une population d'enfants atteints du syndrome de Williams, à laquelle s'est notamment intéressée Karmiloff-Smith ces dernières années (Grant, Karmiloff-Smith, Gathercole, Paterson, Howlin, Davies & Udwin, 1997 ; Karmiloff-Smith, 1997 ; Karmiloff-Smith, Brown, Grice & Paterson, 2001 ; Karmiloff-Smith, Tyler, Voice, Sims, Udwin, Howlin & Davies, 1998), pourrait permettre d'appréhender le caractère graduel (via la modularisation) du développement normal et atypique. Les déficits des enfants

porteurs du syndrome de Williams pourraient en effet être liés à un dysfonctionnement dans le processus de redescription représentationnelle. C'est ce qui expliquerait pourquoi chez ces enfants, « certaines de leurs fonctions cognitives restent intactes, d'autres présentent des anomalies dès le départ, d'autres sont touchées au cours du développement » (Troader & Martinot, 2003, p. 214). La perspective neuroconstructiviste de Karmiloff-Smith « ne doit pas être considérée comme un catalogue de fonctions perturbées et intactes. Ainsi une approche neuropsychologique classique et statique n'est pas appropriée pour comprendre la dynamique des troubles du développement » (idem).

Une autre piste de recherche sur le plan expérimental serait, comme nous l'avons évoqué, de poursuivre l'étude du rôle du PEC et de la familiarité des informations dans le rappel des dessins, en proposant une nouvelle version informatisée de l'expérience 7, dans laquelle nous pourrions faire varier avec précision à la fois le temps de présentation et le délai de rappel des stimuli, ainsi que la quantité d'information à encoder (nombre de formes élémentaires). Nous pourrions de cette façon approfondir l'analyse de la relation entre la capacité de maintien en mémoire des données visuo-spatiales et l'usage du PEC au cours du développement. Comme nous l'avons également proposé, le recours au paradigme de double tâche (De Ribeaupierre & al., 2000 ; Miles & al., 1996 ; Pickering, 2001) dans cette même expérience, combinant la tâche principale à une tâche secondaire verbale ou visuo-spatiale (ou à aucune de ces deux tâches concourantes dans une condition contrôle) permettrait de déterminer le rôle des codages verbal et imagé dans le rappel des deux types de dessins (composés de formes élémentaires familières ou abstraites).

Par ailleurs, comme l'a fait Gallina (1998) pour l'apprentissage d'un itinéraire décrit verbalement, il serait intéressant d'évaluer les liens entre les capacités d'imagerie visuelle des enfants et l'usage du PEC à différentes périodes au cours du développement dans les tâches présentées dans un format propositionnel ou faisant l'objet d'une exploration haptique, pour lesquelles le recours à des représentations imagées passe par une médiation (accès indirect). Il serait ainsi possible de rendre compte du rôle des représentations imagées suivant l'âge des enfants. Une corrélation significative suggérerait l'exploitation de représentations imagées dans l'accomplissement des tâches, alors qu'une corrélation non significative conforterait l'idée selon laquelle les enfants pourraient recourir (de façon directe) à des représentations non imagées (verbales ou motrices).

Les résultats issus de cette recherche présentent également un intérêt sur le plan pédagogique. En effet, celles-ci montrent que les jeunes enfants de sept ans connaissent d'importantes difficultés à résoudre un problème lorsque les informations qui le constituent sont textuelles, alors qu'ils résolvent le même problème beaucoup plus facilement lorsque les informations sont présentées sous forme imagée (expérience 8). L'« habillage » du problème (Bastien, 1987) apparaît donc déterminant dans la représentation et la résolution de celui-ci. La représentation imagée des données textuelles semble constituer une étape importante dans la résolution de problèmes chez les enfants encore peu familiarisés au langage écrit ou témoignant de difficultés en lecture. L'activité inférentielle liée au raisonnement logique mis en jeu dans la résolution du problème fait notamment appel aux capacités attentionnelles et mnésiques de l'enfant. Or, la présentation textuelle des données est susceptible de perturber cette activité inférentielle en sollicitant de manière trop importante les ressources cognitives du jeune enfant dans les traitements des informations langagières (décodage et compréhension des mots), limitant alors les ressources disponibles pouvant être dédiées à l'élaboration d'une représentation intégrant les données du problème. Les traitements relatifs à la lecture s'automatisant au cours du développement (les enfants plus âgés possédant une plus grande maîtrise du langage

écrit) ainsi que les capacités mnésiques, les enfants plus âgés seraient alors en mesure d'opérer un raisonnement quelle que soit la version, imagée ou textuelle, du problème. Pour les enfants les plus jeunes, encore peu familiarisés au langage écrit, il s'avère donc préférable de conseiller une résolution du problème suivant une procédure comprenant deux étapes successives : 1) la transformation des informations propositionnelles en informations imagées, puis 2) la résolution du problème (coordination des informations), à partir de la version imagée nouvellement créée.

Enfin, dans une orientation pratique, les stratégies d'exécution dans les tâches de copie, de rappel et de coordination d'informations locales étant révélatrices du fonctionnement cognitif de l'enfant, leur observation pourrait constituer un moyen simple et rapide d'investigation et de détection d'éventuels troubles ou déficits cognitifs dans l'examen neuropsychologique. Connaissant le procédé d'exécution utilisé spontanément par l'enfant pour reproduire une série de dessins composés de formes élémentaires emboîtées (le procédé adopté reflétant le mode de structuration ou de traitement perceptif des stimuli), il est alors possible d'évaluer les capacités cognitives (capacités de rétention des informations visuo-spatiales dans la tâche de rappel, ou capacités inférentielles dans la tâche de coordination d'informations locales) du sujet. L'organisation syntaxique du dessin pourrait donc être utilisée comme un moyen d'investigation de processus cognitifs, les épreuves proposées pouvant servir d'outils diagnostiques du fonctionnement de composantes cognitives.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abraham, A. (1992). *Les identifications de l'enfant à travers son dessin*. Ed. Privat.
- Acredolo, L. P. (1985). Coordinating perspectives on infant spatial orientation. In R. Cohen, *The development of spatial cognition* (pp. 115-140). London : Lawrence Erlbaum Associates.
- Acredolo, L. P. (1990). Individual differences in infant spatial cognition. In J. Colombo & J. Fagan, *Individual differences in infancy : reliability, stability, prediction* (pp. 321-340). London : Lawrence Erlbaum Associates.
- Agostini, M., Kremin, H., Curt, F., & Dellatolas, G. (1996). Immediate memory in children aged 3 to 8 : Digits, familiar words, unfamiliar words, pictures, and Corsi. *ANAE*, 36, 4-10.
- Aguirre, G. K., & D'Esposito, M. (1997). Environmental knowledge is subserved by separable dorsal/ventral neural areas. *The Journal of Neuroscience*, 17(7), 2512-2518.
- Akshoomoff, N. A., & Stiles, J. (1995a). Developmental trends in visuospatial analysis and planning : I. Copying a complex figure. *Neuropsychology*, 9(3), 364-377.
- Akshoomoff, N. A., & Stiles, J. (1995b). Developmental trends in visuospatial analysis and planning : II. Memory for a complex figure. *Neuropsychology*, 9(3), 378-389.
- Alcorn, D., Beaufils, F., Cadet, B., & Laffaiteur, J.-P. (1979). The structure of personality and the reproduction of Rey's figures from memory. *Bulletin de Psychologie*, 32(18), 987-993.
- American Psychiatric Association (2004). *DSM IV-TR: manuel diagnostique et statistiques des troubles mentaux*. Paris : Masson.
- Andrade, J., Kemps, E., Werniers, Y., May, J., & Szmalec, A. (2002). Intensity of visual short-term memory to irrelevant visual information. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 55A(3), 753-774.

- Annett, M. (1970). The growth of manual performance and speed. *British journal of Psychology*, 61, 545-548.
- Annett, M. (1985). *Left, right, hand and brain : The right shift theory*. London : Lawrence Erlbaum Associates.
- Annett, M. (1995). Motor imagery : perception or action ? *Neuropsychologia*, 33, 1395-1417.
- Appelle, S. (1972). Perception and discrimination as a function of stimulus orientation : The "oblique effect" in man and animals. *Psychological Bulletin*, 78, 266-278.
- Appelle, S., & Countryman, M. (1986). Eliminating the haptic oblique effect : Influence of scanning incongruity and prior knowledge of the standards. *Perception*, 15, 365-369.
- Ardila, A., & Rosselli, M. (1994). Developmental language, memory, and visuospatial abilities in 5- to 12-year-old children using a neuropsychological battery. *Developmental Neuropsychology*, 10(2), 97-120.
- Arditi, A., Holtzman, J., & Kosslyn, S. (1988). Mental imagery and sensory experience in congenital blindness. *Neuropsychologia*, 26, 1-12.
- Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1968). Human memory : A proposed system and its control processes. In K.W. Spence (Ed.), *The psychology of learning and motivation, Vol II* (pp.89-105). New-York : Academic Press.
- Badan, M., & Camarazza, A. (1997). Haptic processing by the left hemisphere in a split-brain patient. *Neuropsychologia*, 35, 1275-1287.
- Baddeley, A. D. (1986). *Working memory*. New York : Oxford University Press.
- Baddeley, A. D. (1990). *Human memory : theory and practice*. Lawrence Erlbaum Associates, Ltd Publishers.
- Baddeley, A. D. (1992). Is working memory working? The fifteenth Bartlett lecture. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 44A, 1-31.
- Baddeley, A. D. (1996). Exploring the central executive. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 49A, 5-28.
- Baddeley, A. D., & Andrade, J. (2000). Working memory and the vividness of imagery. *Journal of Experimental Psychology : General*, 129, 126-145.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G.J. (1994). Developments in the concept of working memory. *Neuropsychology*, 8, 485-493.
- Baeyens, C., & Bruyer, R. (1999). Dissociating visual and spatial components of the visuospatial slave system of working memory. *Current Psychology of Cognition*, 18(3), 307-320.
- Baldy, R. (2002). *Dessine-moi un bonhomme. Dessins d'enfants et développement cognitif*. Paris : In Press Editions.
- Baldy, R., & Chatillon, J.-F. (2002). Rôle de la place des éléments et de la répétition dans la FCR. In P. Wallon & C. Mesmin, *La figure de Rey* (pp. 353-381). Editions érès.
- Baldy, R., & Chatillon, J.-F. (1994). Tracing, copying and memory execution of a complex geometric figure by 11-year-old children and adults. Coordination of vision and representation. In C. Faure, P. Keuss, G. Lorette & A. Vinter (Eds), *Advances in handwriting and drawing : a multidisciplinary approach* (pp. 259-274). Paris : Europaia.

- Baldy, R., Chatillon, J-F., & Cadopi, M. (1993). Dessiner une figure géométrique. Etude développementale. *Communication affichée au congrès de la Société Française de Psychologie (SFP)*, Poitiers.
- Baldy, R., Chatillon, J-F., & Cadopi, M. (1994). Effets d'une démonstration sur les procédés d'exécution d'un dessin chez des enfants de 6 ans, 8 ans et 10 ans. *Archives de Psychologie*, 62, 9-23.
- Baldy, R., Chatillon, J-F., & Cadopi, M. (1998). Flexibilité représentationnelle et adaptation à un changement de but : approche développementale. Colloque ARC' 98, 11 & 12 Décembre 1998, Publication des Universités Paris 8 et Paris 12, 19-24.
- Baldy, R., Chatillon, J-F., Cadopi, M., & Chanquoy, L. (1996). Vision and mental representation in geometric design drawing by nine-year-olds. *Current Psychology of Cognition*, 15(6), 599-613.
- Baldy, R., Chatillon, J.-F., & Magnan, A. (2000). Variabilité du procédé d'exécution de dessins géométriques. In A. Flieller, C. Bocéréan, J.-L. Kop, E. Thiébaud, A.-M. Toniolo & J. Tournois, *Questions de psychologie différentielle* (pp. 189-193). Presses Universitaires de Rennes.
- Ballasteros, S., Manga, D., & Reales, J. M. (1997). Haptic discrimination of bilateral symmetry in 2-dimensional and 3-dimensional unfamiliar displays. *Perception and Psychophysics*, 59, 37-50.
- Barrouillet, P., Fayol, M., & Chevrot, C. (1994). Le dessin d'une maison : Construction d'une échelle de développement. *L'Année Psychologique*, 94, 81-98.
- Barton, A., Matthews, B., Farmer, E., & Belyavin, A. (1995). Revealing the basic properties of visuospatial sketchpad : the use of complete spatial arrays. *Acta Psychologica*, 89, 197-216.
- Barlow, C. M., Jolley, R. P., White, D. G., & Galbraith, D. (2003). Rigidity in children's drawings and its relation with representational change. *Journal of Experimental Child Psychology*, 86(2), 124-152.
- Bastien, C. (1987). *Schémas et stratégies dans l'activité cognitive de l'enfant*. PUF.
- Baynes, K., Tramo, M. J., Reeves, A. G., & Gazzaniga, M. S. (1997). Isolation of a right hemisphere cognitive system in a patient with anarchic (alien) hand sign. *Neuropsychologia*, 35, 1159-1173.
- Benoit-Dubrocard, S., Liégeois, F., & Hartlay, F. (1997). What does the haptic modality do during cognitive activities on letter shapes? A study with left- and right-handers. *Cortex*, 33, 301-312.
- Berti, A. E., & Freeman, N. H. (1997). Representational change in resources for pictorial innovation : a three-component analysis. *Cognitive Development*, 12, 405-426.
- Bertolomeo, P. (2002). The relationship between visual perception and visual mental imagery: A reappraisal of the neuropsychological evidence.
- Bertrand, J., Mervis, C. B., & Eisenberg, J. D. (1997). Drawing by children with Williams syndrome : A developmental perspective. *Developmental Neuropsychology*, 13, 41-67.
- Bialystok, E., & Jenkin, H. (1998). L'espace interne: Comment les représentations mentales affectent la rotation mentale. In J. Bideaud & A. Courbois, *Image mentale et*

- développement. *De la théorie piagétienne aux neurosciences cognitives* (pp. 55-77). P.U.F.
- Bideaud, J., & Courbois, Y. (1998). Nouvelles approches de la psychologie cognitive : quel apport à l'étude de l'image mentale chez l'enfant ? In J. Bideaud & A. Courbois, *Image mentale et développement. De la théorie piagétienne aux neurosciences cognitives* (pp. 157-184). P.U.F.
- Biederman, I. (1987). Recognition by components : A theory of human image understanding. *Psychological Review*, 94, 115-145.
- Biscara, C., & Baldy, R. (2001). Copie d'une série de dessins géométriques par des sujets de 6, 9, 12 ans et des adultes. Une application de la théorie des systèmes dynamiques. *Communication affichée au congrès de la Société Française de Psychologie (SFP)*, Paris, 11-13 Octobre 2001.
- Biscara, C., & Baldy, R. (2002). Changements intra-individuels et différences inter-individuelles dans la dynamique de la copie d'une série de dessins géométriques. *Communication affichée aux 15^{èmes} Journées de Psychologie Différentielle*, Rouen, 11-13 Septembre 2002.
- Biscara, C., & Baldy, R. (2003). Variabilité interindividuelle dans la dynamique de l'exécution d'une série de dessins géométriques. In A. Vom Hofe, H. Charvin, J.-L. Bernaud & D. Guéron, *Psychologie différentielle, recherches et réflexions* (pp. 179-183). Presses Universitaires de Rennes.
- Bjorklund, D. F., Muir-Broaddus, J. E., & Schneider, W. (1990). The role of knowledge the development of strategies. In D.F. Bjorklund (Ed.), *Childrens strategies: contemporary views og cognitive development*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Blades, M., Lippa, Y., Golledge, R. G., Jacobson, R. D., & Kitchin, R. M. (2002). The effect of spital tasks on visually impaired peoples' wayfinding abilities. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, 96(6), 407-419.
- Blanc, N., & Tapiero, I. (2000). Mode de présentation et organisation de l'information dans l'acquisition de connaissances spatiales. *L'Année Psychologique*, 100, 241-264.
- Boles, D. B. (2002). Lateralized spatial processes and their lexical implications. *Neuropsychologia*, 40(12), 2125-2135.
- Bradshaw, J. L. & Nettleton, N. C. (1981). The nature of hemispheric specialization in man. *Behavioral and Brain Sciences*, 4, 51-91.
- Broderick, P., & Laszlo, J. I. (1987). The drawing of squares and diamonds : a perceptual-motor task analysis. *Journal of Experimental Child Psychology*, 43, 44-61.
- Broderick, P., & Laszlo, J. I. (1988). The effects of varying planning demands on drawing components of squares and diamonds. *Journal of Experimental Child Psychology*, 45, 18-27.
- Brown, J. H., Johnson, M. H., Paterson, S. J., Gilmore, R., Longhi, E., & Karmiloff-Smith, A. (2003). Spatial representation and attention in toddlers with Willimas syndrome and Down syndrome. *Neuropsychologia*, 41(8), 1037-1046.
- Bryden, M. P., Roy, E. A., McManus, I. C., & Bulman-Fleming, M. B. (1997). On the genetics and measurements of human handedness. *Laterality*, 2, 317-336.

- Büchel, C., Price, C., Frackowiak, R. S. J., & Friston, K. (1998). Different activation patterns in the visual cortex of late and congenitally blind subjects. *Brain*, 121, 409-419.
- Caplan, P. J., & Kinsbourne, M. (1976). Baby drops the rattle : Asymmetry of duration of grasp by infants. *Child Development*, 47, 532-534.
- Carreiras, M., & Codina, M. (1992). Spatial cognition of the blind and sighted : Visual and amodal hypotheses. *Current Psychology on Cognition*, 12, 51-78.
- Case, R. (1985). *Intellectual development : Birth to adulthood*. New York : Academic Press.
- Case, R. (1988). The structure and process of intellectual development. In A. Demetriou (ed.), *The neo-piagetian theories of cognitive development: toward an integration* (pp. 65-101). Amsterdam Elsevier.
- Case, R. (1992). *The mind's staircases: exploring the conceptual underpinnings of children's thought and knowledge*. Hillsdale Erlbaum.
- Case, R., & Okamoto, Y. (1996). The role of central conceptual structures in the development of children's numerical, literacy, and spatial thought. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 61, Serial n° 246.
- Casey, M. B., Winner, E., Hurwitz, I., & Da Silva, D. (1991). Does processing style affect recall of the Rey-Osterrieth or Taylor complex figures ? *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 13(4), 600-606.
- César, M. (2002). La Figure de Rey prédit-elle la réussite scolaire? Etude de 25 enfants au Portugal, leur devenir scolaire 4 ans après le test de Rey. In P. Wallon & C. Mesmin, *La figure de Rey* (pp. 293-322). Editions érès.
- Chapman, C. A., Waber, D. P., Bernstein, J. H., & Pomeroy, S. L. (1995). Neurobehavioral and neurologic outcome in long-term survivors of posterior fossa brain tumors : Role of age and perioperative factors. *Journal of Child Neurology*, 10(3), 209-212.
- Chatterjee, A., & Southwood, M. H. (1995). Cortical blindness and visual imagery. *Neurology*, 45, 2189-2195.
- Chen, M. J., & Holman, J. (1989). Emergence of drawing devices for total and partial occlusion : A longitudinal study. *Perception*, 18, 445-455.
- Chen, J., Myerson, J., & Hale, S. (2002). Age-related dedifferentiation of visuospatial abilities. *Neuropsychologia*, 40(12), 2050-2056.
- Chen, J., Myerson, J., Hale, S., & Simon, A. (2000). Behavioral evidence for brain-based ability factors in visuospatial information processing. *Neuropsychologia*, 28, 380-387.
- Clarke, S., & Miklossy, J. (1990). Occipital cortex in man : organisation of callosal connections, related myelo- and cytoarchitecture, and putative boundaries of functional visual area. *Journal of Comparative Neurology*, 298, 188-214.
- Clément, E. (1996). L'effet du contexte sémantique dans l'élaboration de la représentation du problème. *L'Année Psychologique*, 96, 410-442.
- Coiffi, J., & Kandel, G. (1979). Laterality of stereognostic accuracy of children for words, shapes and bigrams : Sex differences for bigrams. *Science*, 204, 1432-1434.

- Conant, L. L., Fastenau, P. S., Giordani, B., Boivin, M. J., Chounramany, C., Xaisida, S., Choulamontary, L., Pholsena, P., & Olness, K. (1997). Relationships among memory span tasks : A cross-cultural developmental perspective. *The Clinical Neuropsychologist*, 11, 304.
- Connolly, K., & Jones, B. (1970). A developmental study of afferent-reefferent integration. *British Journal of Psychology*, 61, 259-266.
- Cook, G. L., & Odom, R. D. (1992). Perception of multidimensional stimuli: A differential-sensitivity account of cognitive processing and development. *Journal of Experimental Child Psychology*, 54, 213-249.
- Corbetta, D., & Vereijen, B. (1999). Understand development and learning of motor coordination in sport : The contribution of Dynamic Systems Theory. *International Journal of Sport Psychology*, 30, 507-530.
- Cornoldi, C., Bertuccelli, B., Rocchi, P., & Sbrana, B. (1993). Processing capacity limitations in pictorial and spatial representations in the totally congenitally blind. *Cortex*, 29, 675-689.
- Cornoldi, C., Cortesi, A., & Preti, D. (1991). Individual differences in the capacity limitations of visuospatial short-term memory : Research on sighted and totally congenitally blind people. *Memory & Cognition*, 19, 459-468.
- Cornoldi, C., & Vecchi, T. (2000). Cécité précoce et images mentales spatiales. In Y. Hatwell, A. Streri & E. Gentaz, *Toucher pour connaître. Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle* (pp. 175-189). Paris : P.U.F.
- Costermans, J. (1998). *Les activités cognitives. Raisonnement, décision et résolution de problèmes*. Paris : De Boeck Université.
- Cowan, N. (1997). The development of working memory. In N. Cowan (Ed.), *The development of memory in childhood* (pp. 163-199). Hove, UK : Psychology Press.
- Cowan, N., Wood, N. L., & Borne, D. N. (1994). Reconfirmation of the short-term storage concept. *Psychological Science*, 5, 103-106.
- Cowan, N., Wood, N. L., Wood, P. K., Keller, T. A., Nugent, L. D., & Keller, C. V. (1998). Two separate verbal processing rates contributing to short-term memory span. *Journal of Experimental Psychology : General*, 127, 141-160.
- Cox, M. V. (1986). *The child's point of view. The development of language and cognition*. London : Harvest Press.
- Craver-Lemley, C., & Reeves, A. (1987). Visual imagery selectively reduces vernier acuity. *Perception*, 16, 599-614.
- Craver-Lemley, C., & Reeves, A. (1992). How visual imagery interferes with vision. *Psychological Review*, 99, 633-649.
- Craver-Lemley, C., Reeves, A., & Arterberry, M. E. (1997). Effects of imagery on vernier acuity under conditions of induced depth. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 23, 3-13.
- Creem, S. H., & Proffitt, D. R. (2001a). Grasping objects by their handles : a necessary interaction between cognition and action. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 27, 218-228.

- Creem, S. H., & Proffitt, D. R. (2001b). Defining the cortical visual systems : "what", "where", and "how". *Acta Psychologica*, 107(1-3), 43-68.
- Dalman, J. E., Verhagen, W. I. M., & Huygen, P. L. M. (1997). Cortical blindness. *Clinical Neurology and Neurosurgery*, 99, 282-286.
- Damasio, A. R., & Damasio, H. (1990). Face agnosia and the neural substrates of memory. *Annual Review of Neuroscience*, 13, 89-109.
- D'Angiulli, A., & Kennedy, J. M. (2000). Guided exploration enhances tactile pictorial recognition in blindfolded sighted children. *International Journal of Rehabilitation Research*, 23, 319-320.
- D'Angiulli, A., & Kennedy, J. M. (2001). Children's tactual exploration and copying without vision. *International Journal of Rehabilitation Research*, 24, 233-234.
- D'Angiulli, A., & Kennedy, J. M. & Heller, M. A. (1998). Blind children recognizing tactile pictures respond like sighted children given guidance in exploration. *Scandinavian Journal of Psychology*, 39, 187-190.
- Dapratti, E., & Gentilucci, M. (1997). Grasping an illusion. *Neuropsychologia*, 35, 1577-1582.
- Das, J. P., & Aysto, S. M. (1994). Cognitive performance of disphasic students. *European Journal of Psychology of Education*, 9(1), 27-39.
- David, R. (1998). *La découverte de votre enfant par le dessin*. Ed. L'Archipel, Paris.
- Davis, A. M., & Bentley, M. (1984). Young children's interpretation of the task demands in a simple experimental situation : An example from drawing. *Educational Psychology*, 4(3), 249-254.
- De Beni, R., & Cornoldi, C. (1988). Imagery limitations in totally congenitally blind subjects. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory & Cognition*, 14, 650-655.
- De Ribeaupierre, A., Lecerf, T., & Bailleux, C. (2000). Is a nonverbal working memory task necessarily nonverbally encoded ? *Current Psychology of Cognition*, 19(2), 135-170.
- Dehaene-Lambertz, G. (1997). Image du développement cérébral. In S. Dehaene (Ed.), *Le cerveau en action : Imagerie cérébrale fonctionnelle en psychologie cognitive* (pp. 185-204). Paris : P.U.F.
- Della Salla, S., Gray, C., Baddeley, A. D., Allamano, N., & Wilson, L. (1999). Pattern span : A tool for unwinding visuo-spatial memory. *Neuropsychologia*, 37, 1189-1199.
- Delpature, A. (1976). Etude expérimentale des résultats des perceptions visuelles en fonction de la présentation horizontale des stimuli. *Revue Belge de Psychologie et de Pédagogie*, 38(154), 33-50.
- Denis, M., & Cocude, M. (1989). Scanning visual images generated from verbal descriptions. *European Journal of Cognitive Psychology*, 1, 540-545.
- Denis, M., & Cocude, M. (1992). Structural properties of visual images constructed from poorly or well-structured verbal descriptions. *Memory and Cognition*, 20, 497-506.
- Denis, M., & Denhiere, G. (1990). Comprehension and recall of spatial descriptions. *European Bulletin of Cognitive Psychology*, 10, 115-143.

- Denis, M., & Zimmer, H. D. (1992). Analog properties of cognitive maps constructed from verbal descriptions. *Psychological Research*, 54, 286-298.
- Desbiez, D., Vinter, A., & Meulenbroek, R. G. (1999). Activations différenciées de processus centraux et périphériques dans une tâche de dessin : analyse des pauses et des amplitudes du mouvement. *L'Année psychologique*, 99, 9-43.
- De Ribeaupierre, A. (1997). Les modèles néo-piagétien : quoi de nouveau ? *Psychologie Française*, 42(1), 9-21.
- De Volder, A., Bol, A., Blin, J., Robert, A., Arno, P., Grandin, C., Michel, C., & Veraart, C. (1997). Brain energy metabolism in early blind subjects : Neural activity in the visual cortex. *Brain Research*, 750, 235-244.
- De Wit, T. C. J., & Van Lier, R. J. (2002). Global visual completion of quasi-regular shapes. *Perception*, 31, 969-984.
- Di Carlo, J., Johnson, K., & Hsiao, S. (1998). Structure of receptive fields in area 3b of primary somatosensory cortex. *Canadian Journal of Physiological Pharmacology*, 72, 558-570.
- Dolle, J. M. (1991). *Pour comprendre Jean Piaget*. Privat.
- Douglas, K. L., & Rockland, K. S. (1992). Extensive visual feedback connections from ventral infero-temporal cortex. *Society of Neuroscience Abstracts*, 18, 390.
- Endo, K., Miyasaka, M., Makishita, H., Yanagisawa, N., & Sugishita, M. (1992). Tactile agnosia and tactile aphasia : Symptomatological and anatomical differences. *Cortex*, 28, 445-469.
- Eriksson, Y. (1998). *Tactile Pictures : Pictorial Representations for the Blind 1784-1940*. Gothenburg : Gothenburg University Press.
- Ernst, M. O., & Banks, M. S. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, 415, 429-433.
- Essock, E. A. (1980). The oblique effect of stimulus identification considered with respect to two classes of oblique effects. *Perception*, 9, 37-46.
- Fagard, J. (1999). *Développement des habiletés bimanuelles et latéralisation*. Thèse pour l'Habilitation à Diriger des Recherches. Université René Descartes, Paris.
- Fagot, J., Lacreuse, A., & Vauclair, J. (1997). Role of sensory and postsensory factors on hemispheric asymmetries in tactual perception. In S. Christman (Ed.), *Cerebral asymmetries in sensory and perceptual processing* (pp. 469-494). Amsterdam : Elsevier.
- Faillenot, I., Toni, I., Decety, J., Gregoire, M. C., & Jeannerod, M. (1997). Visual pathways for object-oriented action and object recognition : functional anatomy with PET. *Cerebral Cortex*, 7, 77-85.
- Farah, M. J. (1984). The neurological basis of mental imagery : A componential analysis. *Cognition*, 18, 245-272.
- Farah, M. J. (1985). Psychophysical evidence for a shared representational medium for mental images and percepts. *Journal of Experimental Psychology : General*, 14, 91-103.
- Farah, M. J. (1988). Is visual imagery really visual? Overlooked evidence from neuropsychology. *Psychological Review*, 95, 307-317.

- Farah, M. J., Hammond, K. M., Levine, D. N., & Calvanio, R. (1988). Visual and spatial mental imagery : Dissociable systems of representation. *Cognitive Psychology*, 20, 439-462.
- Fastenau, P. S., Conant, L. L., & Lauer, R. E. (1998). Working memory in young children : Evidence for modality-specificity and implications for cerebral reorganisation in early childhood. *Neuropsychologia*, 36, 643-652.
- Felleman, D. J., & Van Essen, D. C. (1991). Distributed hierarchical processing in the primate cerebral cortex. *Cerebral Cortex*, 1, 1-47.
- Fenner, J., Heathcote, D., & Jerrams-Smith, J. (2000). The development of wayfinding competency : Asymmetrical effects of visuo-spatial and verbal ability. *Journal of Environmental Psychology*, 20, 165-175.
- Fodor, J. A. (1983). *The modularity of mind*. MIT Press.
- Foley, M. A., Durso, F. T., Wilder, A., & Friedman, R. (1991). Developmental comparisons of the effects of explicit vs. Implicit imagery generation on reality monitoring. *Journal of Experimental Child Psychology*, 51, 1-13.
- Freeman, N. H. (1980). *Strategies of representation in young children*. London : Academic Press.
- Freeman, N. H., & Cox, M. V. (1985). *Visual order : The nature and development of visual representation*. Cambridge, England : Cambridge University Press.
- Gallina, J.-M. (1998). Image mentale et compréhension de textes décrivant des configurations spatiales: vers une approche développementale. In J. Bideaud & Y. Courbois, *Image mentale et développement. De la théorie piagétienne aux neurosciences cognitives* (pp. 115-138). PUF.
- Gallina, J.-M., & Lautrey, J. (2000). Evolution de la représentation mentale d'un itinéraire décrit verbalement chez des enfants de 5 à 11 ans. *Enfance*, 52(4), 351-374.
- Garbin, C. P. (1988). Visual-Haptic perceptual nonequivalence for shape information and its impact upon cross-modal performance. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 14, 547-553.
- Gaunet, F., & Thinus-Blanc, C. (1995). Exploratory patterns and reactions to spatial changes : the role of early visual experience. In B.G. Bardy, R.J. Bootsma & Y. Guiard (Eds.), *Studies in Perception and Action III* (pp. 351-354). Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Gentaz, E. (2000a). Caractéristiques générales de l'organisation anatomo-fonctionnelle de la perception cutanée et haptique. In Y. Hatwell, A. Streri & E. Gentaz, *Toucher pour connaître. Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle* (pp. 19-34). Paris : P.U.F.
- Gentaz, E. (2000b). Existe-t-il un « effet de l'oblique » dans la perception tactile des orientations ? *L'Année Psychologique*, 100, 37-46.
- Gentaz, E., & Badan, M. (2000). Organisation anatomo-fonctionnelle de la perception tactile : apports de la neuropsychologie et de l'imagerie cérébrale. In Y. Hatwell, A. Streri & E. Gentaz, *Toucher pour connaître. Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle* (pp. 35-50). Paris : P.U.F.

- Gentaz, E., Colé, P., & Bara, F. (2003). Evaluation d'entraînements multisensoriels de préparation à la lecture pour les enfants en grande section de maternelle : une étude sur la contribution du système haptique manuel. *L'année psychologique*, 104, 561-564.
- Gentaz, E., & Hatwell, Y. (1995). The haptic « oblique effect » in children's and adults' perception of orientation. *Perception*, 24, 631-646.
- Gentaz, E., & Hatwell, Y. (1996). Role of gravitational cues in the haptic perception of orientation. *Perception & Psychophysics*, 58, 1278-1292.
- Gentaz, E., & Hatwell, Y. (1998). The haptic oblique effect in the perception of rod orientation by blind adults. *Perception & Psychophysics*, 60, 157-167.
- Gentaz, E., & Hatwell, Y. (1999). Role of memorisation conditions in the haptic processing of orientations and the « oblique effect ». *British Journal of Psychology*, 90, 373-388.
- Gentaz, E., & Hatwell, Y. (2000). Le traitement haptique des propriétés spatiales et matérielles des objets. In Y. Hatwell, A. Streri & E. Gentaz, *Toucher pour connaître. Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle* (pp. 129-162). Paris : P.U.F.
- Gentaz, E., Luyat, M., Cian, C., Hatwell, Y., Barraud, P.-A., & Raphel, C. (2001). The reproduction of vertical and oblique orientations in the visual, haptic, and somato-vestibular systems. *Quarterly Journal of Experimental Psychology : Human Experimental Psychology*, 54(A), 513-526.
- Gentaz, E., & Rossetti, Y. (1999). Is haptic perception continuous with cognition ? *Behavioral and Brain Sciences*, 22, 378-379.
- Gibson, J. J. (1962). Observation on active touch. *Psychological Review*, 69, 477-491.
- Gibson, J. J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Boston, Houghton Mifflin Company.
- Gibson, C., & Bryden, M. P. (1983). Dichaptic recognition of shapes and letters in children. *Canadian Journal of Psychology*, 37, 132-143.
- Goldenburg, G., Müllbacher, W., & Nowak, A. (1995). Imagery without perception. A case study of anosognosia for cortical blindness. *Neuropsychologia*, 33, 1373-1382.
- Goldenburg, G., Podreka, I., Steiner, M., Willmes, K., Suess, E., & Deecke, L. (1989). Regional cerebral blood flow patterns in visual imagery. *Neuropsychologia*, 33, 1373-1382.
- Goldenburg, G., Steiner, M., Podreka, I., & Deecke, L. (1992). Regional cerebral blood flow patterns related to the verification of low- and high-imagery sentences. *Neuropsychologia*, 27, 641-664.
- Golledge, R. G., Jacobson, D., Kintchin, R., & Blades, M. (2000). Cognitive maps, spatial abilities and human wayfinding. *Geographical Review of Japan*, 73 (Series B), 93-104.
- Goodenough, F. (1926). *Measurement of intelligence by drawings*. New York : Harcourt Brace.
- Goodnow, J. J. (1977). *Children's drawing*. London : Fontana.
- Goodnow, J. J., & Levine, R.A. (1973). « The grammar of action » : sequence and syntax in children's drawing. *Cognitive Psychology*, 4, 82-98.

- Grady, C. L. (1998). Brain imaging and age-related changes in cognition. *Experimental Gerontology*, 33, 661-673.
- Grady, C. L., Maisog, J. M., Horwitz, B., & Ungerleider, L. G. (1994). Age-related changes in cortical blood flow activation during visual processing of faces and locations. *Journal of Neuroscience*, 14(2), 1450-1462.
- Grant, J., Karmiloff-Smith, A., Gathercole, S., Paterson, S., Howlin, P., Davies, M., & Udwin, O. (1997). Language and Williams syndrome: how intact is "intact" ? *Child Development*, 68, 246-262.
- Greco, P. (1991). *Structures et significations : Approches du développement cognitif*. Paris : Editions de l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales.
- Griffon, P. (1995). *Déficiences visuelles : pour une meilleure intégration*. Paris : CTNERHI.
- Guérin, F., Ska, B., & Belleville, S. (1999). Cognitive processing of drawing abilities. *Brain and Cognition*, 40, 464-478.
- Gullaud, L., & Vinter, A. (1998). Rôle de la vision dans la direction de mouvements graphiques simples. *L'Année Psychologique*, 98, 401-428.
- Gyselinck, V., Cornoldi, C., Dubois, V., De Beni, R., & Ehrlich, M. F. (2002). Visuospatial memory and phonological loop in learning from multimedia. *Applied Cognitive Psychology*, 16(6), 665-685.
- Haffenden, A. M., & Goodale, M. A. (2000). Independent effects of pictorial displays on perception and action. *Vision Research*, 40, 1597-1607.
- Hale, S., Myerson, J., Rhee, S. H., Weiss, C. S., & Abrams, R. A. (1996). Selective interference with the maintenance of location information in working memory. *Neuropsychology*, 10, 228-240.
- Halford, G. (1993). *Children's understanding: the development of mental models*. Hillsdale Erlbaum.
- Harris, D. B. (1963). *Children's drawings as measures of intellectual maturity : A revision and extension of the Goodenough Draw-a-Man Test*. New York : Harcourt Brace.
- Harris, J. F., Durso, F. T., Mergler, N. L., & Jones, S. K. (1990). Knowledge base influences on judgments of frequency of occurrence. *Cognitive Development*, 5, 223-233.
- Hatwell, Y. (1986). *Toucher l'espace : la main et la perception tactile de l'espace*. Lille : PUL.
- Hatwell, Y. (1994). Transferts intermodaux et intégration intermodale. In M. Richelle, J. Requin, & M. Robert (Eds), *Traité de psychologie expérimentale* (pp. 543-584). Paris : PUF.
- Hatwell, Y. (2000a). Introduction. In Y. Hatwell, A. Streri & E. Gentaz, *Toucher pour connaître. Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle* (pp. 1-16), Paris : P.U.F.
- Hatwell, Y. (2000b). Les procédures d'exploration manuelle chez l'enfant et l'adulte. In Y. Hatwell, A. Streri & E. Gentaz, *Toucher pour connaître. Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle* (pp. 71-84). Paris : P.U.F.

- Hatwell, Y. (2000c). Les coordinations intermodales chez l'enfant et l'adulte. In Y. Hatwell, A. Streri & E. Gentaz, *Toucher pour connaître. Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle* (pp. 211-224). Paris : P.U.F.
- Hatwell, Y., & Cazals, C. (1988). Conflit visuo-tactile-kinesthésique et activité sensori-motrice pratique. *L'Année Psychologique*, 88, 7-29.
- Hatwell, Y., Mellier, D., & Lécuyer, R. (2003). Le développement perceptivo-moteur de l'enfant aveugle. La variété des développements. *Enfance*, 1, 88-94.
- Hatwell, Y., Orliaguet, J. P., & Brouty, G. (1990). Effects of object properties, attentional constraints and manual exploratory procedures on haptic perceptual organization : A developmental study. In H. Bloch & B. Bertenthal (Eds), *Sensory-motor organizations and development in infancy and early childhood* (pp. 315-335). Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- Hauert, C. A., Mounoud, P., & Mayer, E. (1981). Approche du développement cognitif des enfants de 2 à 5 ans à travers l'étude des caractéristiques physiques de leurs actions. *Current Psychology of Cognition*, 1, 33-54.
- Hawn, P. R., & Harris, L. J. (1983). Hand differences in grasp duration and reaching in two- and five-month-old infants. In G. Young, S.J. Segalowitz, C.M. Corter, & S.E. Trehub 5 (Eds), *Manual specialization and developing brain* (pp. 331-348). New York : Academic Press.
- Haxby, J. V., Grady, C. L., Horwitz, B., Ungerleider, L. G., Mishkin, M., Carson, R. E., Herscovitch, P., Schapiro, M. B., & Rapoport, S. I. (1991). Dissociation of object and spatial visual processing pathways in human extrastriate cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 88, 1621-1625.
- Hecker, R., & Mapperson, B. (1997). Dissociation of visual and spatial processing in working memory. *Neuropsychologia*, 35, 599-603.
- Heller, M. A. (1983). Haptice dominance in form perception with blurred vision. *Perception*, 12, 607-613.
- Heller, M. A. (2000). Les illusions perceptives haptiques. In Y. Hatwell, A. Streri & E. Gentaz, *Toucher pour connaître. Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle* (pp. 163-174). Paris : P.U.F.
- Heller, M. A. (2002). Tactile picture perception in sighted and blind people. *Behavioural Brain Research*, 135, 65-68.
- Heller, M. A., Brackett, D. D., & Scroggs, E. (2002). Tangible picture matching by people who are visually impaired. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, 96(5), 349-353.
- Heller, M. A., Brackett, D. D., Scroggs, E., Allen, A. C., & Green, S. (2001). Haptic perception of the horizontal by blind and low-vision individuals. *Perception*, 30, 601-610.
- Heller, M. A., Brackett, D. D., Scroggs, E., Steffen, H., Heatherly, K., & Salik, S. (2002). Tangible pictures : Viewpoint effects and linear perspective in visually impaired people. *Perception*, 31, 747-769.
- Heller, M. A., Brackett, D. D., Wilson, K., Yoneyama, K., Boyer, A., & Steffen, H. (2002). The haptic Müller-Lyer illusion in sighted and blind people. *Perception*, 31, 1263-1274.

- Heller, M. A., Calcaterra, J., Tyler, L. A., & Burson, L. L. (1996). Production and interpretation of perspective drawings by blind and sighted people. *Perception*, 25(3), 321-334.
- Heller, M. A., & Joyner, T. D. (1993). Mechanisms in the haptic horizontal-vertical illusion : Evidence from sighted and blind subjects. *Perception & Psychophysics*, 53, 422-428.
- Heller, M. A., & Kennedy, J. M. (1990). Perceptive taking, pictures and the blind. *Perception & Psychophysics*, 48, 459-466.
- Heller, M. A., Kennedy, J. M., & Joyner, T. (1995). Production and interpretation of pictures of houses by blind people. *Perception*, 24, 1049-1058.
- Henry, G. K. (2001). The Rey figure in Amazonia : effects of Jungle Living on childrens' copy performance. *Developmental Neuropsychology*, 19(1), 33-39.
- Hershberger, W., & Misceo, G. (1996). Touch dominates haptic estimates of discordant visual-haptic size. *Perception & Psychophysics*, 58, 1124-1132.
- Hikosaka, O., Tanaka, M., Sakamoto, M., & Iwamura, Y. (1985). Deficits in manipulative behaviors induced by local injections of muscimol in the first somatosensory cortex of the conscious monkey. *Brain Research*, 325, 375-380.
- Hintzman, D. L. (1986). "Schema abstraction" in a multiple trace memory model. *Psychological Review*, 93, 411-428.
- Hitch, G. J. (1990). Developmental fractionation of working memory. In G. Vallar & T. Shallice (Eds), *Neuropsychological impairments of short-term memory* (pp. 221-246). Cambridge University Press.
- Hitch, G. J., Halliday, M. S., Dodd, A., & Littler, J. E. (1989). Development of rehearsal in short-term memory : Differences between pictorial and spoken stimuli. *British Journal of Developmental Psychology*, 7, 347-362.
- Hitch, G. J., Halliday, M. S., Schaafstal, A. M., & Schraagen, J. M. C. (1988). Visual working memory in children. *Memory and Cognition*, 16, 120-132.
- Hitch, G. J., Woodin, M. E., & Baker, S. (1989). Visual and phonological components of working memory in children. *Memory and Cognition*, 17, 175-185.
- Hopkins, R. (2000). Touching Pictures. *British Journal of Aesthetics*, 40, 149-167.
- Howard, I. P. (1982). *Human visual orientation*. New York : Wiley.
- Howell, D. C. (1998). L'analyse log-linéaire. In D.C. Howell, *Méthodes statistiques en Sciences Humaines* (pp. 687-720). De Boeck Université.
- Hummel, J., & Biederman, I. (1992). Dynamic binding in a neural network for shape recognition. *Psychological Review*, 99, 480-517.
- Humphrey, D. R., & Tanji, J. (1991). What features of voluntary motor control are encoded in the neuronal discharge of different cortical motor areas. In D.R. Humphrey & H.-J. Freund (Eds), *Motor control : Concepts and issues* (pp. 413-443). New York, John Wiley & Sons.
- Ishai, A., & Sagi, D. (1995). Common mechanisms of visual imagery and perception. *Science*, 268, 1772-1774.
- Jackson, S. R., & Shaw, A. (2000). The Ponzo illusion affects grip force but not grip aperture scaling during prehension movements. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 26, 1-6.

- Jeannerod, M. (1994a). *Objects oriented action*. Amsterdam, Elsevier Science.
- Jeannerod, M. (1994b). The representating brain : Neural correlates of motor intention and imagery. *Behavioral and Brain Sciences*, 17, 187-245.
- Jeannerod, M. (1995). Mental imagery in the visual cortex. *Neuropsychologia*, 33, 1419-1432.
- Jeannerod, M. (1997). *The cognitive neuroscience of action*. Blackwell Publishers : Oxford.
- Jeannerod, M., Arbib, M. A., Rizzolatti, G., & Sakata, H. (1995). Grasping objects : The cortical mechanisms of visuo-motor transformations. *Trends in Neurosciences*, 18, 314-320.
- Johansson, R. S. (1996). Sensory control of dexterous manipulation in humans. In A.M. Wing, P. Haggard & J.R. Flanagan (Eds.), *Hand and brain* (pp. 381-414). San Diego, CA, Academic Press.
- Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental models: Towards a cognitive science of language, inference and consciousness*. Cambridge: Harvard University Press.
- Jumel, B. (2002). Violence incoercible, Figure de Rey et Rorschach. In P. Wallon & C. Mesmin, *La figure de Rey* (pp. 271-291). Editions érès.
- Juurmaa, J., & Lehtinen-Railo, S. (1994). Visual experience and access to spatial knowledge. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, 88, 157-170.
- Kannellaki-Agathos, S., & Richard, F. (1997). Planification et représentation de l'action chez l'enfant. *Archives de Psychologie*, 65, 49-79.
- Kappers, A. M. (1999). Large systematic deviations in the haptic perception of parallelity. *Perception*, 28, 1001-1012.
- Kappers, A. M. (2002). Haptic perception of parallelity in the midsagittal plane. *Acta Psychologica*, 109, 25-40.
- Kappers, A. M., & Koenderinck, J. J. (1999). Haptic perception of spatial relations. *Perception*, 28, 781-795.
- Kappers, A. M., Koenderinck, J. J., & Lichtenegger, I. (1994). Haptic identification of curved surfaces. *Perception and Psychophysics*, 56, 53-61.
- Kappers, A. M., Koenderink, J. J., & Pas, S. F. (1994). Haptic discrimination of doubly curved surfaces. *Perception*, 23, 1483-1490.
- Karapetsas, A., & Vlachos, F. (1992). Visuomotor organization in the left-handed child : A neuropsychological approach. *Perceptual and Motor Skills*, 75, 699-705.
- Karmiloff-Smith, A. (1990). Constraints on representational change : Evidence from children's drawing. *Cognition*, 34, 57-83.
- Karmiloff-Smith, A. (1992). *Beyond modularity: a developmental perspective on cognitive science*. Cambridge: MIT Press.
- Karmiloff-Smith, A. (1994). Précis of *Beyond Modularity: a developmental perspective on cognitive science*. *Behavioral and Brain Sciences*, 17, 693-745.
- Karmiloff-Smith, A. (1997). Crucial differences between developmental cognitive neuroscience and adult neuropsychology. *Developmental Neuropsychology*, 13, 513-524.
- Karmiloff-Smith, A. (1999). Taking development seriously. *Human Development*, 42, 325-327.

- Karmiloff-Smith, A., Brown, J., Grice, S., & Paterson, S. (2001). Dethroning the myth: cognitive dissociations and innate modularity in Williams syndrome. *Developmental Neuropsychology*, 23(1), 227-242.
- Karmiloff-Smith, A., Tyler, L., Voice, K., Sims, K., Udwin, O., Howlin, P., & Davies, M. (1998). Linguistic dissociations in Williams syndrome: evaluating receptive syntax in on-line and off-line tasks. *Neuropsychologia*, 6, 342-351.
- Kaski, D. (2002). Revision : Is visual perception a requisite for visual imagery ? *Perception*, 31, 717-731.
- Kello, A. (1977). Effect of emotional traits on memory achievements : Preliminary report. *Studia Psychologica*, 19(3), 225-231.
- Kello, A., & Kovac, D. (1975). A probe into the relationships between emotional lability and memory performance. *Studia Psychologica*, 17(4), 306-308.
- Kemler Nelson, D. G. (1984). The effect of attention on what concepts are acquired. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 23, 734-759.
- Kemler Nelson, D. G. (1989). The nature and occurrence of holistic processing. In B.E. Shepp & S. Ballesteros (Ed.), *Object perception: structure and process* (pp. 357-386). Hillsdale, Erlbaum.
- Kennedy, J. M. (1993). *Drawing and the Blind*. New Haven, CT : Yale University Press.
- Kennedy, J. M. (1997). Comment les aveugles dessinent. *Pour la Science*, 233, 76-81.
- Kennedy, J. M., & Bai, J. (2002). Haptic pictures : Fit judgments predict identification, recognition memory, and confidence. *Perception*, 31, 1013-1026.
- Kennedy, J. M., & Merkas, C. (2000). Depictions of motion devised by a blind person. *Psychonomic Bulletin & Review*, 7, 700-706.
- Kerr, N. H. (1983). The role of vision in « visual imagery » experiments : Evidence from congenitally blind. *Journal of Experimental Psychology : General*, 112, 265-267.
- Klatzky, R. L. (1999). Path completion after haptic exploration without vision : Implications for haptic spatial representations. *Perception & Psychophysics*, 61, 220-235.
- Klatzky, R. L., Golledge, R. G., Loomis, J. M., Cicinelli, J. G., & Pellegrino, J. W. (1995). Performance of blind and sighted persons on spatial tasks. *Journal of Visual impairment and Blindness*, 89, 70-82.
- Klatzky, R. L., & Lederman, S. J. (1987). The intelligent hand. In G. Bower (Ed.), *Psychology of learning and motivation : Advances in research and theory* (pp.121-151). New York: Academic Press.
- Klatzky, R. L., & Lederman, S. J. (1993). Toward a computational model of constraint-driven exploration and haptic object identification. *Perception*, 22, 597-621.
- Klatzky, R. L., & Lederman, S. J. (2000). L'identification haptique des objets significatifs. In Y. Hatwell, A. Streri & E. Gentaz, *Toucher pour connaître. Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle* (pp. 109-128). Paris : P.U.F.
- Klicpera, C. (1983). Poor planning as a characteristic of problem-solving behavior in dyslexic children : A study with the Rey-Osterrieth complex figure test. *Acta Pedopsychiatrica*, 49(1-2), 73-82.
- Koenig, O., & Hauert, C. A. (1986). Construction de l'objet chez l'enfant de 5 à 9 ans : Approche dichaptique. *Cahiers de Psychologie Cognitive*, 6, 21-39.

- Koppitz, E. (1968). *Psychological evaluation of children's human figure drawings*. New York : Grune & Stratton.
- Kosslyn, S. M. (1980). *Image and Mind*. Cambridge, MA : MIT Press.
- Kosslyn, S. M. (1987). Seeing and imaging in the cerebral hemispheres : A computational approach. *Psychological Bulletin*, 94, 148-175.
- Kosslyn, S. M. (1994). *Image and Brain*. Cambridge : MIT Press.
- Kosslyn, S. M., Alpert, N. M., Thompson, W. L., Maljkovic, V., Chabris, S. F., Hamilton, S. E., & Buonanno, F. S. (1993). Visual mental imagery activates the primary visual cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 5, 263-287.
- Kosslyn, S. M., & Koenig, O. (1992). *Wet mind : The new cognitive neuroscience*. New York : The Free Press.
- Kosslyn, S. M., Pascual-Leone, A., Felician, O., Camposano, S., Keenan, J. P., Thompson, W. L., Ganis, G., Sukel, K. E., & Alpert, N. M. (1999). The role of area 17 in visual imagery : convergent evidence from PET and rTMS. *Science*, 284, 167-170.
- Kosslyn, S. M., Thompson, W. L., & Alpert, N. M. (1995). Topographical representations of mental images in primary visual cortex. *Nature*, 378, 496-498.
- Kosslyn, S. M., Thompson, W. L., & Alpert, N. M. (1997). Neural systems shared by visual imagery and visual perception : a positron emission tomography study. *Neuroimage*, 6, 320-334.
- Kulhavy, R. W., Lee, J. B., & Caterino, L. C. (1985). Conjoint retention of maps and related discourse. *Contemporary Educational Psychology*, 10, 28-37.
- Kulhavy, R. W., Stock, W. A., Verdi, M. P., Rittschoff, K. A., & Savenye, W. (1993). Why maps improve memory for text: The influence of structural information on working memory operations. *European Journal of Cognitive Psychology*, 5, 375-392.
- Lacreuse, A., Fagot, J., & Vauclair, J. (1996). Latéralisation hémisphérique et stratégies d'exploration dans des tâches de perception tactilo-kinesthésique. *L'Année Psychologique*, 96, 131-145.
- Lakatos, S., & Marks, L. (1998). Haptic underestimation of angular extent. *Perception*, 27, 737-754.
- Lanca, M., & Bryant, D. (1995). Effect of orientation in haptic reproduction of line length. *Perceptual & Motor Skills*, 80, 1291-1298.
- Laszlo, J. I., & Broderick, P.A. (1985). The perceptual-motor skill of drawing. In N. H. Freeman & M. V. Cox (Eds), *Visual order. The nature and development of pictorial representation* (pp. 356-373). London : Cambridge University Press.
- Lautrey, J. (1989). Unicité ou pluralité dans le développement cognitif : les relations entre image mentale, action et perception. In G. Netchine-Grynberg (Ed.), *Développement et fonctionnement cognitifs chez l'enfant* (pp. 71-89). Paris : PUF.
- Lautrey, J. (1995). *Universel et différentiel en psychologie*. Paris : PUF.
- Lautrey, J., Bonthoux, F., & Pacteau, C. (1996). Le traitement holistique peut-il guider le traitement analytique dans la catégorisation des visages ? *L'Année Psychologique*, 96, 225-254.
- Lautrey, J., & Caroff, X. (1997). Variability and cognitive development. *Polish Quarterly of Developmental Psychology*, 2(2), 71-89.

- Lautrey, J., & Caroff, X. (1999). Une approche pluraliste du développement cognitif: la conservation "revisitée". In G. Netchine-Grynberg (ed.), *Développement et fonctionnement cognitifs: vers une intégration* (pp. 155-179). Paris : PUF.
- Le Bihan, D., Turner, R., Zeffiro, T. A., Cuenod, C.A., Jezard, P., & Bonnerot, V. (1993). Activation of human primary visual cortex during visual recall : A magnetic resonance imaging study. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 90, 11802-11805.
- Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (1987). Hand movements : A window into haptic object recognition. *Cognitive Psychology*, 19, 342-368.
- Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (1990). Haptic classification of common objects : Knowledge-driven exploration. *Cognitive Psychology*, 22(4), 421-459.
- Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (1993). Extracting object properties through haptic exploration. *Acta Psychologica*, 84, 29-40.
- Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (1996). Action for perception : Manual exploratory movements for haptically processing objects and their features. In A.M. Wing, P. Haggard & J.R. Flanagan (Eds), *Hand and Brain. The neurophysiology and psychology of hand movements* (pp. 431-446). New York, Academic Press.
- Lefebure, F. (1993). *Le dessin de l'enfant. Le langage sans parole*. Ed. Masson.
- Lehman, E. B., & Goodnow, J. (1975). Directionality in copying : memory, handedness and alignment effects. *Perceptual and motor skills*, 41, 863-872.
- Leplat, J., & Hoc, J. M. (1983). Tâche et activité dans l'analyse psychologique des situations. *Cahiers de Psychologie Cognitive*, 3, 49-63.
- Lewis, C., Russell, C., & Berridge, D. (1993). When is a mug not a mug ? Effects of content, naming, and instructions on children's drawings. *Journal of Experimental Child Psychology*, 56, 291-302.
- Lhote, M., & Streri, A. (1998). Haptic memory and handedness in 2-month-old infants. *Laterality*, 3, 173-192.
- Lhote, M., & Streri, A. (2003). La mémoire haptique de la forme des objets chez les bébés âgés de 4 mois. *L'Année Psychologique*, 103(1) : 33-50.
- Locher, P. J., & Wagemans, J. (1993). Effects of element type and spatial grouping on symmetry detection. *Perception*, 22, 565-587.
- Logie, R. H. (1995). *Visuo-spatial working memory*. Hove, U.K. : Lawrence Erlbaum Associates Ltd.
- Logie, R. H., Della Sala, S., Wynn, V., & Baddeley, A. D. (2000). Visual similarity effects in immediate verbal serial recall. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 53A, 626-646.
- Logie, R. H., & Pearson, D. G. (1997). The inner eye and the inner scribe of visuo-spatial working memory : Evidence from developmental fractionation. *European Journal of Cognitive Psychology*, 9, 241-257.
- Longoni, A. M., & Scalisi, T. G. (1994). Developmental aspects of phonemic and visual similarity effects : Further evidence in Italian children. *International Journal of Behavioural Development*, 17, 57-71.
- Loomis, J., Klatzky, R. L., & Lederman, S. J. (1991). Similarity of tactual and visual picture recognition with limited field of view. *Perception*, 20(2), 167-177.

- Loomis, J., & Lederman, S. J. (1986). Tactual Perception. In K. Boff, L. Kaufman & J. Thomas (Eds.), *Handbook of perception and human performance*, New York : Wiley.
- Lopes, D. M. M. (1997). Art media and the sense modalities : Tactile pictures. *Philosophical Quaterly*, 47, 425-440.
- Luciana, M., & Nelson, C. A. (1998). The functional emergence of pre-frontally-guided working memory systems in four- to eight-year-old children. *Neuropsychologia*, 36, 273-293.
- Luquet, G. H. (1927). *Le dessin enfantin*. Delachaux et Niestlé, Paris.
- Lurçat, L. (1974). *Etude de l'acte graphique*. Paris : Mouton.
- Luyat, M., & Gentaz, E. (2002). Body tilt effect on the reproduction of orientations : Studies on the visual oblique effect and subjective orientations. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 28(4), 1002-1011.
- Luyat, M., Gentaz, E., Corte, T.R., & Guerraz, M. (2001). Reference frames and haptic perception of orientation : Body and head tilt effects on the oblique effect. *Perception & Psychophysics*, 63(3), 541-554.
- Luzzati, C., Vecchi, T., Agazzi, D., Cesa-Bianchi, M., & Vergani, C. (1998). A neurological dissociation between preserved visual and impaired spatail processing in mental imagery. *Cortex*, 34, 461-469.
- Magnan, A., Aimar, J.-B., & Baldy, R. (2000). Représentation et exécution d'un dessin-modèle composé de figures géométriques élémentaires chez l'enfant de cinq à huit ans : effet de la tâche et de l'ordre de présentation des figures élémentaires. *Archives de Psychologie*, 68, 199-212.
- Magnan, A., Baldy, R., & Chatillon, J-F. (1999). Organizing principle in 4- to 8-year-old children's drawings of embedded geometric shapes. *Swiss Review of Psychology*, 1, 3-11.
- Mecklinger, A., & Müller, N. (1996). Dissociations in the processing of "what" and "where" information in working memory : an event-related potential analysis. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 8, 453-473.
- Mellet, E. (2002). La perception et l'imagerie mentale visuelles. In O. Houdé, B. Mazoyer & N. Tzourio-Mazoyer, *Cerveau et psychologie* (pp. 403-435). Paris : PUF.
- Meulenbroek, R. G. J., & Thomassen, A. J. W. M. (1991). Stroke-direction preferences in drawing and handwriting. *Human Movement Science*, 10 (2-3), 247-270.
- Meulenbroek, R. G. J., & Thomassen, A. J. W. M. (1993). Exploitation of elasticity as a biomechanical property in the production of graphic stroke sequences. *Acta Psychologica*, 82, 313-327.
- Meulenbroek, R. G. J., Vinter, A., & Desbiez, D. (1998). Exploitation of elasticity in copying geometrical patterns : the role of age, movement amplitude, and limb-segment involvement. *Acta Psychologia*, 99, 329-345.
- Meulenbroek, R. G. J., Vinter, A., & Mounoud, P. (1993). Development of the start-rotation principle in circle production. *British Journal of Psychology*, 11, 307-320.
- Meyers, J. E., & Meyers, K. R. (1996). Rey complex figure test and recognition trial : Supplemental norms for children and adolescents. In *Professional manual* (pp. 1-21), Odessa, FL : Psychological Assessment Resources.

- Miles, C., Morgan, M. J., Milne, A. B., & Morris, E. D. M. (1996). Developmental and individual differences in visual memory span. *Current Psychology*, 15(1), 53-67.
- Milewski, A. E., & Laccino, J. (1982). Strategies in cross-modal matching. *Perception & Psychophysics*, 31, 273-275.
- Millar, S. (1981). Self-referent and movement cue in coding spatial localization by blind and sighted children. *Perception*, 10, 255-264.
- Millar, S. (1994). *Understanding and representing space. Theory and evidence from studies with blind and sighted children*. Oxford : Clarendon Press.
- Millar, S., & Zainab, A. (2002). The Müller-Lyer illusion in touch and vision : Implications for multisensory processes. *Perception & Psychophysics*, 64(3), 353-365.
- Miller, E. A. (1972). Interaction of vision and touch in conflict and non-conflict form perception tasks. *Journal of Experimental Psychology*, 96, 114-123.
- Milner, A. D. (1997). Neglect, extinction, and the cortical streams of visual processing. In P. Theier & H. O. Karnath (Eds.), *Parietal lobe contributions to orientation in 3D space* (pp. 3-22). Berlin : Springer.
- Milner, A. D., & Goodale, M. A. (1995). *The visual brain in action*. Oxford University Press : Oxford.
- Misceo, G. F., Hersherberger, W. A., & Mancini, R. A. (1999). Haptic estimates of discordant visual-haptic size vary developmentally. *Perception & Psychophysics*, 61, 608-641.
- Miyashita, Y. (1995). How the brain creates imagery : Projection to primary visual cortex. *Science*, 268, 1719-1720.
- Montero, V. M. (1991). A quantitative study of synaptic contacts on interneurons and relay cells of the cat lateral geniculate nucleus. *Experimental Brain Research*, 86, 257-270.
- Moscovitch, M., Behrmann, M., & Winocur, G. (1994). Do PETS have long or short ears? Mental imagery and neuroimaging. *Trends in Neurosciences*, 17, 292-294.
- Murphy, P. C., Duckett, S. G., & Sillito, A. M. (1999). Feedback connections to the lateral geniculate nucleus and cortical response properties. *Science*, 286, 1552-1554.
- Nebes, N. D. (1971). Superiority of the minor hemisphere in commissurotomy man for the perception of part-whole relations. *Cortex*, 7, 333-349.
- Ninio, A., & Lieblisch, A. (1976). The grammar of action : « Phase structure » in children's copying. *Child Development*, 47, 846-849.
- Ochaita, E., & Huertas, J. A. (1993). Spatial representation by persons who are blind : A study of the effects of learning and development. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, 87, 37-41.
- O'Craven, K., & Kanwisher, N. (2000). Mental imagery of faces and places activates corresponding stimulus-specific brain regions. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12, 1013-1023.
- Odom, R. D., & Cook, G. L. (1996). Valuing of identity, distribution of attention, and perceptual salience in free and rule-governed classifications. *Journal of Experimental Child Psychology*, 61, 73-89.
- Osterrieth, P. H. (1945). Le test de copie d'une figure complexe, contribution à l'étude de la perception et de la mémoire. *Archives de Psychologie*, 30, 205-353.

- Paillard, J. (1991). *Brain and space*. New York : Oxford University Press.
- Paillard, J., Michel, F., & Stelmach, G. (1983). Localization without content : A tactile analogue of « blind sight ». *Archives of Neurology*, 40, 548-551.
- Paivio, A. (1971). *Imagery and verbal processes*. New York : Hold, Rinehart & Winston.
- Paivio, A. (1986). *Mental representations : A dual coding approach*. New York : Oxford University Press.
- Palmer, S. (2000). Working memory : A developmental study of phonological recoding. *Memory*, 8, 179-193.
- Papagno, C. (2002). Progressive impairment of constructional abilities : a visuospatial sketchpad deficit? *Neuropsychologia*, 40(12), 1858-1867.
- Pascual-Leone, J. (2000). Reflections on working memory: are the two models complementary? *Journal of Experimental Child Psychology*, 77, 138-154.
- Pascual-Leone, J., & Baillargeon, R. (1994). Developmental measurement of mental attention. *International Journal of Behavioral Development*, 17(1), 161-200.
- Passini, R., & Proulx, G. (1988). Wayfinding without vision : An experiment with congenitally totally blind people. *Environment and Behavior*, 20, 227-252.
- Pearson, D. G., & Logie, R. H. (1998). La mémoire de travail visuo-spatiale : fractionnement et développement. In J. Bideaud & Y. Courbois, *Image mentale et développement. De la théorie piagétienne aux neurosciences cognitives* (pp. 139-156). PUF.
- Pêcheux, M.-G. (1980). Les enfants et les grands espaces. *L'Année Psychologique*, 80, 567-597.
- Pêcheux, M.-G. (1990). *Le développement des rapports des enfants à l'espace*. Paris : Nathan.
- Pelizzon, L., Brandimonte, M. A., & Favretto, A. (1999). Imagery and recognition : Dissociable measures of memory? *European Journal of Cognitive Psychology*, 11, 429-443.
- Perrig, W. J., & Kintsch, W. (1985). Propositional and situational representations of text. *Journal of Memory and Language*, 28, 292-312.
- Petit, L., & Zago, L. (2002). L'attention et la mémoire de travail visuo-spatiales. In O. Houdé, B. Mazoyer & N. Tzourio-Mazoyer, *Cerveau et psychologie* (pp. 377-402). Paris : PUF.
- Petrie, B. F., & Peters, M. (1980). Handedness : Left/right differences in intensity of grasp response and duration of rattle holding in infants. *Infant Behavior and Development*, 3, 215-221.
- Philip, J., & Hatwell, Y. (1998). Effects of cueing and of the direction of scanning on the tactile line bisection of normal adults. *Current Psychology on Cognition*, 17, 31-51.
- Piaget, J. (1923). *Le langage et la pensée chez l'enfant*. Delachaux & Niestlé, Neuchâtel.
- Piaget, J. (1967). *La psychologie de l'intelligence*. Paris : Armand Colin Editeur.
- Piaget, J., & Inhelder, B., (1947). *La représentation de l'espace chez l'enfant*. Paris : PUF.
- Piaget, J., & Inhelder, B. (1966). *L'image mentale chez l'enfant*. Paris : PUF.

- Piaget, J., Inhelder, B., & Szeminska, A. (1948). *La géométrie spontanée de l'enfant*. Paris : PUF.
- Picard, D., & Vinter, A. (1999). Representational flexibility in Children's drawings : effects of age and verbal instructions. *British Journal of Developmental Psychology*, 17, 605-622.
- Pickering, S. J. (2001). The development of visuo-spatial working memory. *Memory*, 9(4/5/6), 423-432.
- Pickering, S. J., Gathercole, S. E., Hall, M., & Lloyd, S. (2001). Development of memory for pattern and path : Further evidence for the fractionation of visuo-spatial memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 54A, 397-420.
- Piguet, O., Saling, M. M., O'Shea, M. F., & Berkovic, S. F. (1994). Rey figure distortions reflect nonverbal recall differences between right and left foci in unilateral temporal lobe epilepsy. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 9(5), 451-460.
- Pont, S., Kappers, A., & Koenderink, J. (1997). Haptic curvature discrimination at several regions of the hand. *Perception & Psychophysics*, 59, 1225-1240.
- Pont, S., Kappers, A., & Koenderink, J. (1998). Anisotropy in haptic curvature and shape perception. *Perception*, 27, 573-589.
- Quinn, J.G. (1994). Towards a clarification of spatial processing. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 47A, 465-480.
- Reisberg, D., & Logie, R. H. (1993). The in's and out's of visual working memory : Overcoming the limits on learning from imagery. In M. Intons-Peterson, B. Roskos-Ewoldsen & R. Anderson (Eds.), *Imagery, creativity & Discovery : A cognitive approach* (pp. 39-76). Amsterdam : Elsevier.
- Reppas, J. B., Dale, A. M., Sereno, M. I., & Tootell, R. B. H. (1996). La vision, une perception subjective. A la (re)découverte de la panoplie d'aires visuelles du cortex. *La recherche*, 289, 52-56.
- Reuchlin, M. (1985). Développement et différenciation. In J. Bideaud & M. Richelle (eds.), *Psychologie développementale. Problèmes et réalités* (pp. 283-298). Bruxelles : Mardaga.
- Reuchlin, M. (1999). *Evolution de la psychologie différentielle*. Paris : PUF.
- Reuter-Lorenz, P. A., Stanczak, L., & Miller, A. C. (1999). Neural recruitment and cognitive aging : two hemispheres are better than one, especially as you age. *Psychological Science*, 10, 494-500.
- Revesz, G. (1950). *Psychology and art of the blind*. London : Longmans Green.
- Rey, A. (1941). L'examen psychologique dans les cas d'encéphalopathie traumatique. *Archives de Psychologie*, 28, 286-340.
- Rey, A. (1959). *Test de copie d'une figure complexe*. Manuel, Paris : Editions du Centre de Psychologie Appliquée (ECPA).
- Rey, A. (1969). *Problèmes du développement mental*. Neuchâtel : Delachaux & Niestlé.
- Richard, J. F. (1982). Planification et organisation des actions dans la résolution du problème de la Tour de Hanoï par des enfants de 7 ans. *L'année Psychologique*, 82, 307-336.
- Richard, J. F. (1990). *Les activités mentales*. Paris : PUF.

- Richard, J. F., Poitrenaud, S., & Tijus, C. (1993). Problem solving restructuration : Elimination of implicit constraints. *Cognitive Science*, 17, 497-529.
- Robles-De-La-Torre, G., & Hayward, V. (2001). Force can overcome object geometry in the perception of shape through active touch. *Nature*, 412, 445-448.
- Roland, P. E., & Gulyas, B. (1994). Visual imagery and visual representation. *Trends in Neurosciences*, 17, 294-296.
- Roland, P. E., & Gulyas, B. (1995). Visual memory, visual imagery, and visual recognition of large field patterns by the human brain : functional anatomy by positron emission tomography. *Cerebral Cortex*, 1, 79-93.
- Rose, S. A. (1984). Developmental changes in hemispheric specialization for tactual processing in very young children : Evidence from cross-modal transfer. *Developmental Psychology*, 20, 568-574.
- Rose, A., Feldman, J. F., Futterweit, L. R., & Jankowski, J. J. (1998). Continuity in tactual-visual cross-modal transfer ; Infancy to 11 years. *Developmental Psychology*, 34, 435-440.
- Rosenbaum, D. A. (1991). *Human motor control*. San Diego, CA : Academic Press.
- Rossetti, I. (1998). Implicit short-lived motor representation of space in brain-damaged and healthy subjects. *Consciousness and Cognition*, 7, 520-558.
- Rossetti, Y., Rode, G., & Boisson, D. (1995). Implicit processing of somesthetic information : A dissociation between Wher and How? *Neuroreport*, 6, 506-510.
- Royer, J. (1995). *Que nous disent les dessins d'enfants?* Ed. Hommes et perspectives.
- Rubin, N. (2001). The role of junctions in surface completion and contour matching. *Perception*, 30, 339-366.
- Russier, S., & Magnan, A. (1999). Organizing principle in blind and sighted children's drawings of embedded geometric shapes. XI ESCOP (p.345), Gent, September 1-4.
- Sadato, N., Pascual-Leone, A., Grafman, J., Ibanez, V., Deiber, M.-P., Dold, G., & Hallet, M. (1996). Activation of the primary visual cortex by braille reading blind subjects. *Nature*, 380, 526-528.
- Satlaw, E., & Newcombe, N. (1998). When is a triangle not a triangle? Young children's developing concepts of geometric shapes. *Cognitive Development*, 13, 547-559.
- Saway, A. F. S., & Logie, R. H. (1995). Visuo-spatial working memory, movement control and executive demands. *British Journal of Psychology*, 86, 253-269.
- Schneider, W., & Sodian, B. (1997). Memory strategy development : Lessons from longitudinal research. *Developmental Review*, 17, 442-461.
- Segond, H., & Streri, A. (1994). Mieux percevoir la forme des objets à deux mois : main droite ou main gauche? *Enfance*, 2, 155-164.
- Seron, X. (1993). *La neuropsychologie cognitive*. Collection Que sais-je ?, Paris: PUF.
- Siegler, R. (2001). *Enfant et raisonnement : le développement cognitif de l'enfant*. Bruxelles : De Boeck Université.
- Simner, M. L. (1981). The grammar of action and children's printing. *Developmental Psychology*, 17, 866-871.
- Smith, J. D. (1989). Analytic and holistic processes in categorization. In B.E. Shepp & S. Ballesteros (Ed.), *Object perception: structure and process* (pp. 297-323). Hillsdale, Erlbaum.

- Smith, E. E., Jonides, J., Koeppe, R. A., Awh, E., Schumacher, E. H., & Minoshima, S. (1995). Spatial versus object working memory : PET investigations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 7, 337-356.
- Smyth, M. M. (1989). Visual control of movement patterns and the grammar of action. *Acta Psychologica*, 70, 253-265.
- Smyth, M. M., & Scholey, K. A. (1996). The relationship between articulation time and memory performance in verbal and visuo-spatial tasks. *British Journal of Psychology*, 87, 179-191.
- Spensley, F., & Taylor, J. (1999). The development of cognitive flexibility: Evidence from children's drawings. *Human Development*, 42, 300-324.
- Stamback, M., & Pêcheux, M. G. (1969). Essai d'analyse de l'activité de reproduction de figures géométriques complexes. *L'Année Psychologique*, 69, 55-66.
- Stein, J. F. (1992). The representation of egocentric space in the posterior parietal cortex. *Behavioral and Brain Sciences*, 15, 691-700.
- Stiles, J., Sabbadini, L., Capirci, O., & Volterra, V. (2000). Drawing abilities in Williams syndrome : A case study. *Developmental Neuropsychology*, 18(2), 213-235.
- Streri, A. (1997). Intermodalité : le statut de la main par rapport à l'œil et à l'oreille. *Les Cahiers de l'Audition*, 2, 8-11.
- Streri, A. (2000). Exploration et latéralisation manuelles. In Y. Hatwell, A. Streri & E. Gentaz, *Toucher pour connaître. Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle* (pp. 85-106). Paris : P.U.F.
- Streri, A., & Gouarir, C. (1996). Handedness : Left-Right differences in object holding and motor skills in 6-month-old infants. *Current Psychology on Cognition*, 15, 209-230.
- Streri, A., Lhote, M., & Dutilleul, S. (2000). Haptic perception in the newborn. *Developmental Science*, 3, 319-327.
- Sullivan, E. V., Mathalon, D. H., Chung, N. H., & Zipursky, R. B. (1992). The contribution of constructional accuracy and organizational strategy to nonverbal recall in schizophrenia and chronic alcoholism. *Biological Psychiatry*, 32(4), 312-333.
- Summers, C. D., & Lederman, S. J. (1990). Perceptual asymmetries in the somatosensory system : A dichaptic experiment and critical review of the literature from 1929 to 1986. *Cortex*, 26, 201-226.
- Sutton, P. J., & Rose, D. H. (1998). The role of strategic visual attention in Children's drawing development. *Journal of Experimental Child Psychology*, 68, 87-107.
- Symmons, M., & Richardson, B. (2000). Raised line drawings are spontaneously explored with a single finger. *Perception*, 29, 621-626.
- Taylor, C. M. (2001). Visual and haptic perception of the horizontal-vertical illusion. *Perceptual and Motor Skills*, 92, 167-170.
- Thomassen, A. J. W. M., Meulenbroek, R. G. J., & Hoofs, M. P. E. (1992). Economy and anticipation in graphic stroke sequences. *Human Movement Science*, 10, 271-289.
- Thomassen, A. J. W. M., & Tibosch, H. J. C. M. (1991). A quantitative model of graphic production. In *Tutorials in motor neuroscience* (pp.269-282), Stelmach G.E. & Requin, J. (Eds). Dordrecht : Kluwer.

- Tresh, M. C., Sinnamon, H. M., & Seamon, J. G. (1993). Double dissociation of spatial and object visual memory : evidence from selective interference in intact human subjects. *Neuropsychologia*, 31, 211-219.
- Troadec, B., & Martinot, C. (2003). *Le développement cognitif. Théories actuelles de la pensée en contextes*. Belin.
- Tubiana, R., & Thomine, J. M. (1990). La main : Anatomie fonctionnelle et examen clinique, Paris: Masson.
- Tulving, E. (1983). *Elements of episodic memory*. Oxford University Press.
- Ungar, S., Blades, M., & Spencer, C. (1995). Mental rotation of a tactile layout by young visually impaired children. *Perception*, 24, 891-900.
- Ungerleider, L. G., & Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. In D. J. Ingle, M. A. Goodale & R. J. W. Mansfields (Eds.), *Analysis of visual behavior* (pp. 549-586). Cambridge, MA : The MIT Press.
- Vallbo, A. B. (1995). Single-afferent neurons and somatic sensations in humans. In M.S. Gazzaniga (Eds.), *The cognitive neurosciences* (pp. 237-252), Cambridge : The MIT Press.
- Van Dijk, T. A., & Kintsch, W. (1983). *Strategies of discourse comprehension*. New York: Academic Press.
- Van Galen, G. P. (1991). Handwriting : Issues for a psychomotor theory. *Human Movement Science*, 10, 165-191.
- Van Lier, R. J. (1999). Investigating global effects in visual occlusion: from a partly occluded square to the back of a tree-trunk. *Acta Psychologica*, 102, 203-220.
- Van Lier, R. J., & Wagemans, J. (1999). From images to objects: global and local completions of self-occluded parts. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25, 1721-1741.
- Vanlierde, A., De Volder, A. G., Wanet-Defalque, M.-C., & Veraart, C. (2003). Occipito-parietal cortex activation during visuo-spatial imagery in early blind humans. *Neuroimage*, 19(3), 698-709.
- Van Sommers, P. (1984). *Drawing and Cognition : descriptive and experimental studies og graphic production processes*. Cambridge, England : Cambridge University Press.
- Van Sommers, P. (1989). A system for drawing and drawing-related neuropsychology. *Cognitive Neuropsychology*, 6, 117-164.
- Vecchi, T. (1998). Visuo-spatial imagery in congenitally totally blind people. *Memory*, 6(1), 91-102.
- Vecchi, T., Montecellai, M. L., & Cornoldi, C. (1995). Visuo-spatial working memory : Structures and variables affecting a capacity measure. *Neuropsychologia*, 33, 1549-1564.
- Verdoux, H., Magnin, E., & Bourgeois, M. (1995). Neuroleptic effects on neuropsychological test performance in schizophrenia. *Schizophrenia Research*, 14(2), 133-139.
- Verjat, I. (1989). A propos de l'exploration dichaptique. *L'Année Psychologique*, 89, 277-289.

- Vinter, A. (1994). Part II : Development, & Hierarchy among graphic production rules : a developmental approach. In C. Faure, P. Keuss, G. Lorette & A. Vinter (Eds), *Advances in handwriting and drawing : a multidisciplinary approach* (pp. 183-185 et 275-289). Paris : Europa.
- Vinter, A., & Mounoud, P. (1991). Isochrony and accuracy of drawing movements in children : effects of age and context. *Development of graphic skills, Research perspectives and educational implications* (pp. 113-134). London : Academic Press.
- Viviani, P., Baud-Bovy, G., & Redolfi, M. (1997). Perceiving and tracking kinesthetic stimuli : Further evidence of motor-perceptual interactions. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 23(4), 1232-1252.
- Vogels, I. M. L. C., Kappers, A.M., & Koenderink, J.J. (1996). Haptic aftereffect of curved surfaces. *Perception*, 25, 109-119.
- Vogels, I. M. L. C., Kappers, A. M., & Koenderink, J. J. (2001). Haptic after-effect of successively touched curved surfaces. *Acta Psychologica*, 106, 247-263.
- Waber, D. P., & Bernstein, J. H. (1995). Performance of learning-disabled and non-learning-disabled children on the Rey-Osterrieth Complex Figure : Validation of the developmental scoring system. *Developmental Neuropsychology*, 11(2), 237-252.
- Waber, D. P., & Holmes, J. M. (1985). Assessing children's copy productions of the Rey-Osterrieth Complex Figure. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 7, 264-280.
- Wagemans, J. (1995). Detection of visual symmetries. *Spatial Vision*, 9, 9-32.
- Walker, P., Hitch, G. J., Doyle, A., & Porter, T. (1994). The development of short-term visual memory in young children. *International Journal of Behavioral Development*, 17, 73-89.
- Wallon, H. (1942). *De l'acte à la pensée*. Flammarion (Ed. de 1970).
- Wallon, P. (2002a). FCR et difficultés psychologiques. (1) Analyse de l'enveloppe sur 242 enfants de scolarité primaire. In P. Wallon & C. Mesmin, *La figure de Rey* (pp. 23-63). Editions érès.
- Wallon, P. (2002b). FCR et difficultés psychologiques. (2) Etude de 94 enfants de CP, comparaison avec le personnage. In P. Wallon & C. Mesmin, *La figure de Rey* (pp. 65-126). Editions érès.
- Wallon, P., Cambier, A., & Engelhart, D. (1990). *Le dessin de l'enfant*. PUF.
- Wallon, P., & Mesmin, C. (2002). *La figure de Rey*. Editions érès.
- Ward, T. B., & Scott, J. (1987). Analytic and holistic modes of learning family-resemblance concepts. *Memory & Cognition*, 16, 85-89.
- Wilson, J. T. L., Scott, J. H., & Power, K. G. (1987). Developmental differences in the span of visual memory for pattern. *British Journal of Developmental Psychology*, 5, 249-255.
- Wraga, M., Creem, S. H., & Proffitt, D. R. (2000). Perception-action dissociations of a walkable Muller-Lyer configuration. *Psychological Science*, 11(3), 239-243.
- Witelson, S. F. (1977). Developmental dyslexia : Two right hemisphere and none left. *Science*, 195, 425-427.
- Zeki, S., & Shipp, S. (1988). The functional logic of cortical connections. *Nature*, 335, 311-317.

Zhi, Z., Thomas, G. V., & Robinson, O. J. (1997). Constraints on representational change: Drawing a man with two heads. *British Journal of Developmental Psychology*, 15, 275-290.

Zilles, K. (1996). Pour un nouveau découpage du cortex. *La Recherche*, 289, 46-48.

Zilles, K., & Schleider, A. (1993). Cyto- and myeloarchitecture of human visual cortex and the periodical GABAA receptor distribution. In B. Gulyas, D. Ottoson & P.E. Roland, *Functional Organisation of the Human Brain* (pp. 111-121). Oxford : Pergamon Press.

Zimler, J., & Keenan, J. M. (1983). Imagery in the congenitally blind : How visual are visual images ? *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 9, 269-282.

Annexes

5

Annexe 1 : Procédés d'exécution non centripètes adoptés par les enfants ayant participé à l'expérience 1, selon la modalité perceptive d'exploration, la condition de tracé, l'âge et le modèle-test (N=15).

		Exploration visuelle		Exploration haptique	
		M1	M2	M1	M2
6 ans	Exec. V	<i>TCLR</i>	—	RCTL RTCL LRCT RCLT	TLRC TCRL CLTR CTLR TCRL
	Exec. VM	<i>TCLR</i>	RLCT CLRT	TRLC LRCT RLTC LRCT	CLRT CLRT TCRL
	Exec. H	<i>TCLR TCLR</i> CTLR	<i>RLCT RLCT</i> CTLR CLRT TCRL	RCTL LCTR CTLR RTLC RLTC <i>TCLR</i>	TRLC CLRT <i>RLCT</i> LRCT CLRT <i>RLCT</i> TLCT
	Exec. A	RLTC CTLR RCTL RCTL LRCT	CRLT <i>RLCT</i> TCRL RCTL CTLR	<i>TLCT</i> LRCT CTLR LCTR RTLC LCTR	TCRL TLRC RCLT LRCT CLTR TCRL
8 ans	Exec. V	—	RLCT	<i>TCLR</i> RCLT	<i>RLCT RLCT RLCT</i>
	Exec. VM	<i>TCLR</i>	<i>RLCT RLCT</i>	LRCT RCTL	TCRL TLCT <i>RLCT</i> TLCT
	Exec. H	<i>TCLR TCLR</i> <i>TCLR</i> TCRL	<i>RLCT RLCT</i> TCRL TCRL	RCTL CLTR <i>TCLR</i> CTLR	TCRL <i>RLCT</i> CLRT <i>RLCT</i> LRCT
	Exec. A	<i>TCLR TCLR</i> CTLR TCRL	<i>RLCT RLCT</i> TCRL	RCTL RLTC CTLR <i>TCLR</i> TRCL RTCL	TCRL <i>RLCT</i> TCRL CTRL TLCT

6

Annexe 2 : Ordres de superposition non centripètes adoptés par les enfants ayant participé à l'expérience 2, selon la tâche et l'âge (N=15).

⁵ Ordres de tracé des formes géométriques élémentaires constitutives des dessins-modèles (C=cercle ; R=rectangle ; T=triangle ; L=losange). En italique : ordre d'exécution centrifuge. Les sujets ne figurant pas dans cette grille sont ceux ayant adopté le PEC.

⁶ Séquences d'assemblage des formes géométriques élémentaires constitutives des items (C=cercle ; R=rectangle ; K=carré ; T=triangle ; L=losange). En italique : ordre de superposition centrifuge. Les sujets ne figurant pas dans cette grille sont ceux ayant adopté le PEC pour chacun des trois items d'une même tâche.

	Tâche A (copie)			Tâche B (coordination d'informations locales)		
	Item 1	Item 2	Item 3	Item 1	Item 2	Item 3
6 ans	<i>_ LTKC TKCL LKTC</i>	<i>_ _ TCLR RCTL</i>	<i>TLRC _ RLTC _</i>	<i>TKCL KCTL _ LCTK LCTK LKTC TLCK LCTK CTLK CTLK TCLK TKCL TCLK LCTK</i>	<i>TCLR TCLR LCTR LCTR LCTR _ TCLR LCTR CTLR CLTR TCLR TCLR TCLR RLTC</i>	<i>RLCT RLCT _ TCRL LCTR _ RCTL CLRT TCRL CRTL RLCT RLCT RCTL TCRL</i>
8 ans	<i>TKCL TKCL</i>	<i>TCLR TCLR</i>	<i>RLCT RLCT</i>	<i>LCTK LKCT _ LCTK LCTK LCTK KTCL TKCL _ _ TKCL _ _</i>	<i>LCTR _ RCTL RLTC LCTR _ RLTC TCLR LCTR RCTL TCLR LTRC LRCT</i>	<i>RTCL _ _ TCRL TCRL TLCR CLRT RLCT _ RLCT TLRC TCLR</i>
10 ans	<i>_ LCTK TKCL TKCL</i>	<i>_ LRTC TCLR TCLR</i>	<i>LRCT LCTR RLCT RLCT</i>	<i>LTCK _ _ TKCL CKTL _ TKCL TKCL TKCL LKTC</i>	<i>LCTR LRCT RCLT TCRL LCTR RCTL TCLR TCR TLCR LRCT</i>	<i>TCRL _ _ RLCT CLRT TLCR RLCT TCRL RLCT CLRT</i>

Annexe 3a : Caractéristiques des enfants ayant participé à l'expérience 3.

	Sujet	Sexe	Age (années ; mois)	Niveau scolaire	QI		
					Verbal	Performance	Total
Enfants présentant un THADA (groupe test)	S1	Garçon	8 ; 9	CE1	91	106	98
	S2	Garçon	9	CE1	108	132	121
	S3	Garçon	9 ; 3	CE2	116	98	108
	S4	Garçon	10 ; 2	CM1	110	88	99
	S5	Garçon	10 ; 8	CM1	85	87	84
	S6	Garçon	10 ; 8	CM2	115	116	115
	S7	Garçon	11	CM2	104	100	101
	S8	Garçon	11 ; 6	CM2	109	84	96
	S9	Garçon	12 ; 8	6 ^{eme}	70	101	83
Enfants sans trouble attentionnel (groupe contrôle)	S10	Garçon	8 ; 5	CE2			
	S11	Garçon	9 ; 1	CE2			
	S12	Garçon	9 ; 9	CM1			
	S13	Garçon	9 ; 10	CM1			
	S14	Fille	10 ; 4	CM2			
	S15	Garçon	10 ; 8	CM2			
	S16	Garçon	10 ; 8	CM2			
	S17	Garçon	10 ; 11	CM2			
	S18	Fille	11 ; 4	CM2			

Annexe 3b : Ordres de superposition non centripètes ⁷ adoptés par les enfants ayant participé à l'expérience 3, selon la tâche et le statut (N=15).

	Sujet	Tâche A (copie)			Tâche B (coordination d'informations locales)		
		Item 1	Item 2	Item 3	Item 1	Item 2	Item 3
Enfants avec THADA	S1	—	—	—	LCTK	LTCL	TCRL
	S2	—	—	—	LCTK	LCTR	TCRL
	S3	<i>TKCL</i>	<i>TCLR</i>	<i>RLCT</i>	CKTL	RLTC	CLRT
	S4	—	—	—	LCTK	—	—
	S6	—	—	—	LCTK	RLTC	TCRL
	S7	—	—	—	—	LCTR	TCRL
	S8	—	—	—	LKTR	CLRT	CTLR
	S10	<i>TKCL</i>	<i>TCLR</i>	<i>RLCT</i>	TCLK	TCLR	RLCT
Enfants « normaux »	S14	—	—	—	CKTL	LCTR	CLRT
	S15	—	—	—	LKTC	<i>LRTC</i>	CLRT
	S18	—	—	—	TKCL	TCLR	TCRL

Annexe 4 : Ordres de superposition non centripètes ⁸ adoptés par les enfants ayant participé à l'expérience 4, selon le type de dessins et l'âge (N=15).

⁷ Séquences d'assemblage des formes élémentaires composant les dessins-cibles (C=cercle ; R=rectangle ; K=carré ; T=triangle ; L=losange). En italique : ordre de superposition centrifuge. Les sujets ne figurant pas dans cette grille sont ceux ayant adopté le PEC pour chacun des items des deux tâches.

⁸ Séquences d'assemblage des formes géométriques élémentaires constitutives des items (C=cercle ; R=rectangle ; K=carré ; T=triangle ; L=losange). En italique : ordre de superposition centrifuge. En gras : forme visuellement plus saillante. Les sujets ne figurant pas dans cette grille sont ceux ayant adopté le PEC pour chacun des items d'un même type de dessins.

	Dessins de type A				Dessins de type B			
	Item 1	Item 2	Item 3	Item 4	Item 1	Item 2	Item 3	Item 4
5 ans	$\overline{\text{RCKL}}$ $\overline{\text{RCKL}}$ $\overline{\text{LRKC}}$	$\overline{\text{RCKL}}$ $\overline{\text{RLKC}}$ $\overline{\text{RLKC}}$ $\overline{\text{RLKC}}$	TLRC RTCL LRCT TCLR RTCL RLTC RCLT	LRTC LTCR TCLR RTCL RLTC RCLT	LCRK LKRC LKRC LKRC LKRC LKRC LCRK LCRK LCRK LCRK	CRKL CLRK CLRK CLRK CLRK CLRK KLRC RLKC KLRC CKRL CLKR	TRCL TCLR TLRC CLRT TCLR TLRC TRLR TRLR TRLR CTLR	LCTR LCTR RCTL RCTL LCTR LCTR CTLR LTCR TCRL LCTR LTCR RCLT
6 ans	$\overline{\text{RCKL}}$ $\overline{\text{RCKL}}$ $\overline{\text{RCKL}}$	$\overline{\text{LRKC}}$ $\overline{\text{LRKC}}$ $\overline{\text{LRKC}}$	$\overline{\text{LRCT}}$ $\overline{\text{LRCT}}$ $\overline{\text{LRCT}}$	LCTR LCTR RCTL TCLR LCTR	$\overline{\text{RLKC}}$ KCLR LKRC LKRC LKRC LKRC LKRC LKRC LKRC LKRC	KLRC CLRK CLRK CLRK CLRK CLRK CLRK CLRK CLRK CLRK	$\overline{\text{TCLR}}$ TCLR TCLR TCLR TCLR TCLR TCLR TCLR TCLR TCLR	$\overline{\text{CTLR}}$ RCTL LCTR RTCL LCTR LCTR LCTR LCTR LCTR LCTR
7 ans	$\overline{\text{RCKL}}$ $\overline{\text{RCKL}}$ $\overline{\text{RCKL}}$	CLRK RLKC CKRL RLKC	TCLR LRCT LRCT LRCT	$\overline{\text{TCLR}}$ RCTL TCLR RCLT	LKRC LKRC KCLR LKRC CRKL LKRC RCKL	CLRK LRKC RLKC CLRK RLKC CKRL CLKR RLKC	$\overline{\text{RLTC}}$ TCLR RLCT TCLR LRCT	RCTL LCTR LCTR TCLR TCLR LCTR TCLR
8 ans	RCKL RCKL LRCK	RLKC RLKC RLKC	LRCT LRCT TCLR	TCLR TCLR RCLT	CRKL LKRC LKRC RCKL	KLRC CLRK RLKC	RLCT TCLR LRCT	LCTR RCTL TCLK

Annexe 5 : Ordres de superposition non centripètes⁹ adoptés par les enfants ayant participé à l'expérience 5, selon le type de dessins et l'âge (N=18).

⁹ Séquences d'assemblage des formes géométriques élémentaires constitutives des items (C=cercle ; K=carré ; T=triangle ; L=losange). Pour la condition IF, dans laquelle les dessins comportent des formes élémentaires identiques (se distinguant uniquement par la taille), sont indiquées les couleurs de chacune des figures géométriques simples (b=bleu ; r=rouge ; ve=vert ; vi=violet). En gras : forme élémentaire se distinguant sur la dimension de couleur. En italique : ordre de superposition centrifuge. Les sujets ne figurant pas dans cette grille sont ceux ayant adopté le PEC pour chacun des items issus des trois types de dessins.

Perception, représentation et planification de l'action dans l'organisation syntaxique de l'exécution de dessins complexes

	Dessins de type SIV				Dessins de type IC				Dessins de type IF		
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C
5 ans	- - - LKTC CLTK CTLK KLTTC CLTK LKTC	KLTC LCTK LCTK TCLK - - - - LCTK LCTK TCLK	TKLC CKLT TCKL - - CKLT -	TLCK LTKC KCTL LCTK LTKC KCTL	CLKTC KLTTC TLKC TLKC TLKC TLKC	- - - LTCK CTKL - - CKTL LTCK	TLKC KLTCT TLKC TLKC - TKLC KLCT	LKTC CTKL - - LTCK CTKL	CviLCTCrCb CviCbLveCr CviLveCrCb CrCbLveCvi	KveTrKviKb KviKbTrKve KbKvKveTr KbTrKviKve KveTrKviKb	TveT TbK TveT TveK TbT
8 ans	LKTC LKTC - - - - -	TCLK TCLK LKCT - - - - -	CKLT CKLT - TLCK -	KCLT KCLT - - - - -	TLKC TLKC TKLC CKTL CKTL	LTCK LTKC - - LTCK -	KLCT KLCT - - - - -	CTKL CTKL LKCT - - -	CrCbLveCvi CrCbCviLve CviLveCrCb CviLveCrCb - -	KveTrKviKb KveTrKviKb KbTrKviKve - -	TbT TbT TveK -

Annexe 6a : Caractéristiques des enfants ayant participé à l'expérience 6.

	Sujet	Sexe	Age (année ; mois)	Niveau scolaire	Pratique du braille	Pathologie/altérations visuelles
Enfants amblyopes précoces	S1	Fille	7 ; 7	CE1	Non	Cataracte congénitale
	S2	Garçon	7 ; 8	CP	Non	Dysplasie rétinovitréenne
	S3	Garçon	7 ; 10	CE1	Oui	Cataracte congénitale + glaucome secondaire
	S4	Garçon	8 ; 4	CE1	Non	Nystagmus + hérédodysfonction des cônes
	S5	Garçon	8 ; 8	CE1	Non	Nystagmus + dysfonction des bâtonnets
	S6	Garçon	9 ; 1	CE2	Non	Nystagmus + forte myopie + malformation du globe oculaire
	S7	Garçon	10 ; 9	CM1	Non	Albinisme + nystagmus + atrophie chorioretinienne
	S8	Garçon	10 ; 10	CM1	Oui	Nystagmus + dysfonction des bâtonnets
	S9	Fille	12 ; 7	CM2	Non	Nystagmus + cataracte congénitale + glaucome secondaire
Enfants aveugles précoces	S10	Fille	7 ; 5	CE1	Oui	Malformation du globe oculaire
	S11	Garçon	8 ; 7	CE2	Oui	Rétinopathie pigmentaire + maladie de Leber + nystagmus
	S12	Fille	8 ; 10	CE1	Oui	Glaucome congénital
	S13	Garçon	9	CE1	Non	Malformation congénitale du globe oculaire
	S14	Fille	9 ; 4	CM1	Oui	Nystagmus + malformation du globe oculaire
	S15	Fille	9 ; 8	CE2	Oui	Nystagmus + dysfonction des bâtonnets
	S16	Fille	10 ; 8	CE2	Oui	Rétinopathie des prématurés
	S17	Fille	10 ; 9	CM2	Oui	Dysfonction des bâtonnets
	S18	Garçon	11 ; 10	CM2	Oui	Forte hypermétropie + maladie de Leber
Enfants voyants	S19	Fille	7 ; 11	CE2		
	S20	Fille	8	CE1		
	S21	Garçon	8 ; 5	CE2		
	S22	Garçon	9 ; 2	CE2		
	S23	Garçon	9 ; 2	CM1		
	S24	Fille	9 ; 4	CM1		
	S25	Garçon	10 ; 1	CM1		
	S26	Fille	10 ; 3	CM2		
	S27	Garçon	10 ; 5	CM2		

Annexe 6b : Procédés d'exécution non centripètes ¹⁰ adoptés par les enfants ayant participé à l'expérience 6, suivant le statut visuel (N=9).

¹⁰ Ordres de tracé des formes élémentaires constitutives des dessins-tests M0, M1 et M2 (C=cercle ; R=rectangle ; K=carré ; T=triangle ; L=losange). Les sujets ne figurant pas dans cette grille sont ceux ayant adopté le PEC pour chacun des trois modèles-tests.

Perception, représentation et planification de l'action dans l'organisation syntaxique de l'exécution de dessins complexes

	Sujet	M0	M1	M2
Enfants amblyopes précoces	S1	TCKL	TCRL	RCTL
	S2	LCTK	RTLC	TLCR
	S4	TKLC	—	TCRL
	S5	TLCK	LRCT	CTLR
	S6	LCTK	—	TLRC
	S7	LTCK	RCTL	TCRL
	S8	—	—	TCRL
	S9	LKCT	RTCL	TCRL
Enfants aveugles précoces	S12	LCTK	—	—
	S13	LKTC	RTLC	TLCR
	S15	—	—	TLRC
	S16	CTLK	TLRC	TCRL
	S17	—	—	CRLT
Enfants voyants	S20	CKLT	RCTL	—
	S21	—	RLTC	—
	S25	TKCL	TCLR	CLRT

Annexe 7a : Ordres de superposition non centripètes* adoptés par les enfants dans la tâche de copie de l'expérience 7, selon l'âge et le type de codage pouvant être exploité (N=15).

	Double codage (imagé/verbal)				Simple codage (imagé)			
	Item A	Item B	Item C	Item D	Item E	Item F	Item G	Item H
7 ans	— ECQK KQEC EQCK	— CKTQ QTCK QTCK	— EKCT EKCT	— KQCT KQCT	VXYW YXWV YXWV	— WZXV WZXV	— YVXZ YVXZ	— VWXZ VWXZ ZXVW
9 ans	— ECQK QCEK QCEK	— QTCK TQK	— EKCT KECT	KQCT KQCT TKCQ CQKT	— YXWV XYWV	— WZXV ZWXV	— YVXZ XVYZ	— ZXVW XWVZ
10 ans	— ECQK	— QTCK	— EKCT	— KQCT	— YXWV	— WZXV	ZXYV YVXZ	— ZXVW

*Séquences d'assemblage des formes élémentaires pour chacun des items. En italique : ordre de superposition centrifuge. Légende indiquée ci-dessous.

C=○ ; K=□ ; T=△ ; Q=♥ ; E=☆ ; V=⬠ ; W=◻ ; X=◊ ; Y=⬢ ; Z=◼

Les sujets ne figurant pas dans cette grille sont ceux ayant adopté le PEC pour chacun des huit items.

Annexe 7b : Ordres de superposition non centripètes adoptés par les enfants ou/et erreurs commises* dans la tâche de rappel de l'expérience 7, selon l'âge et le type de dessins (N=15).

Sous contrat Creative Commons : Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-
Pas de Modification 2.0 France ([http://creativecommons.org/
licenses/by-nc-nd/2.0/fr/](http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/fr/)) - BOUAZIZ Serge - Université Lyon 2 - 2004