



DIRIGÉ PAR NICOLAS POIREL
Préface de Grégoire Borst

Neurosciences cognitives développementales

**LICENCE 1-3
DE PSYCHOLOGIE**

- Toutes les fonctions psychologiques
- Toutes les bases neurologiques

Dirigé par Nicolas Poirel

Neurosciences cognitives développementales

Pour toute information sur notre fonds et les nouveautés dans votre domaine de spécialisation, consultez notre site web : **www.deboecksuperieur.com**

© De Boeck Supérieur s.a., 2020

Rue du Bosquet, 7 – B-1348 Louvain-la-Neuve

Tous droits réservés pour tous pays.

Il est interdit, sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, de reproduire (notamment par photocopie) partiellement ou totalement le présent ouvrage, de le stocker dans une banque de données ou de le communiquer au public, sous quelque forme et de quelque manière que ce soit.

Dépôt légal :

Bibliothèque nationale,

Paris : septembre 2020

Bibliothèque royale de Belgique,

Bruxelles : 2020/13647/145

ISSN 2030-4196

ISBN 978-2-8073-2747-4

Sommaire

Chapitre 1 L'attention visuelle globale/locale	13
1. Quelles informations visuelles sont traitées en priorité ?	14
2. Mise en place de la spécialisation hémisphérique du traitement global/local	19
3. Flexibilité des processus attentionnels et évolution avec l'âge	31
4. Contexte émotionnel et traitement global/local	34
5. Modèle perceptivo-cognitif de l'attention visuelle globale/locale	39
6. Préférence locale chez l'enfant : un passage obligé et utile	40
Chapitre 2 La mémoire	49
1. Introduction	50
2. Mémoires : quelques définitions	51
3. Processus de mémorisation, mémoire de travail et fonctions exécutives	54
4. Développement de la mémoire épisodique : un système complexe et intégratif	56
5. Développement de la mémoire et maturation cérébrale	64
6. Évaluation de la mémoire	67
7. Mémoire et dysfonctionnements	71
8. Conclusion	75
Chapitre 3 Le langage oral	81
1. Introduction	82
2. Développement typique	84
3. Implication des fonctions exécutives dans le développement du langage	102
4. Bases neurales du développement du langage	103
5. Développement atypique du langage	111
6. Remédiation	121
Chapitre 4 L'apprentissage de la lecture	129
1. Théories de l'apprentissage de la lecture	131
2. Dimensions auditives, langagières et phonologiques de l'apprentissage de la lecture	133
3. Dimensions visuelles de l'apprentissage de la lecture	139
4. Acquisition des connaissances orthographiques lexicales	147
5. Réseau neurocognitif de l'apprentissage de la lecture	151
Chapitre 5 Le nombre et l'arithmétique	161
1. Cognition numérique : l'héritage piagétien	162
2. Avant l'école : des intuitions sur les nombres	163
3. Comment se développent nos intuitions numériques précoces ?	171
4. Développement typique du nombre entier et de l'arithmétique	176
5. Précurseurs de l'arithmétique	180

6.	Difficultés d'apprentissage en mathématique : la dyscalculie développementale	183
7.	Conclusion	189
Chapitre 6 La prise de décision		195
1.	Développement de la prise de décision à risque	197
2.	Développement de la prise de décision sous ambiguïté	208
3.	Comprendre les conduites à risque	217
4.	Conclusion	225
Chapitre 7 Le sommeil et les apprentissages		231
1.	Développement du sommeil chez l'enfant	232
2.	Rôle du sommeil dans les apprentissages chez l'enfant à développement typique	236
3.	Impact des troubles du sommeil sur les apprentissages de l'enfant	243
4.	Conclusion	247
Chapitre 8 La créativité		253
1.	Des blocages cognitifs dans la créativité	254
2.	Effets de fixation dans la pensée divergente	259
3.	Neurosciences cognitives et développementales de la pensée divergente	262
4.	Effets de fixation dans la génération d'idées créatives : le rôle des exemples	268
5.	Modèle du triple processus de la créativité	271
6.	Rôle du contrôle inhibiteur dans l'idéation créative	272
7.	Conclusion	276

Avant-propos

Grégoire Borst, professeur de Psychologie du développement et de neurosciences cognitives de l'éducation, Université de Paris, directeur du laboratoire de Psychologie du développement et de l'éducation de l'enfant (LaPsyDÉ – CNRS)

L'émergence des nouvelles technologies de tomographie par émission de positron (PET), puis d'imagerie par résonance magnétique (IRM) à la fin des années 1980 a permis pour la première fois dans l'histoire humaine d'observer en temps réel le cerveau en action (Raichle, 2009). Ces nouveaux outils et méthodes d'exploration du vivant nous éclairent sur les processus cérébraux qui sous-tendent l'ensemble de nos activités mentales (perception, attention, mémorisation, raisonnement, prise de décision, émotion, contrôle de soi, altruisme, coopération, etc.) et révolutionnent toutes les disciplines de la biologie humaine, jusqu'aux sciences humaines et sociales, en passant par les sciences de l'éducation, de l'ingénieur, la robotique et l'informatique. Dans l'histoire des sciences, ces nouvelles techniques d'observation du cerveau tiennent une place comparable à celle du télescope et du microscope (Houdé, Mazoyer & Tzourio-Mazoyer, 2010). Si ces technologies nous permettent d'étudier le cerveau *in vivo*, l'un des grands défis des neurosciences dans les années qui viennent est d'intégrer les différents niveaux d'explication et de compréhension de cet organe : du neurone aux assemblées de neurones, d'une région cérébrale à un réseau distribué de régions travaillant ensemble, du cerveau aux activités mentales simples et complexes. L'une des clés pour comprendre comment ce tissu biologique constitue la matrice de nos pensées, de nos émotions, de nos sentiments, de notre conscience est l'architecture biologique de notre cerveau qui se structure et s'organise au sein de systèmes hiérarchiques de populations de neurones fortement spécialisés et pourtant intégrés les uns aux autres (Friston, 2009). Cette architecture neuronale est héritée de millions d'années d'évolution des espèces (phylogenèse) et émerge progressivement au cours de l'embryogenèse *in utero* et de la maturation cérébrale post-natale chez l'enfant et l'adolescent (ontogenèse ; Changeux, 1983).

1. Ontogenèse et maturation cérébrale

Ces nouvelles techniques de neuro-imagerie permettent aujourd'hui d'étudier pour la première fois dans l'histoire de l'humanité l'ontogenèse cérébrale *in vivo* avant même que l'enfant naisse ! La morphogenèse (architecture du cerveau) et la maturation fonctionnelle du cerveau commencent dès l'apparition du tube neural (système nerveux primitif) entre

le 19^e et le 28^e jour du développement embryonnaire sous l'influence des gènes du développement. Le tube neural est composé d'une seule couche de cellules qui se divisent rapidement pour aboutir en quelques mois à plusieurs milliards de cellules. À certaines étapes du développement cérébral, il se crée plus de 250 000 cellules nouvelles par minute. Entre la 26^e et la 36^e semaine *in utero*, des plis (appelés sulcus) apparaissent à la surface du cortex, donnant sa forme caractéristique au cerveau. Ce plissement du cortex est guidé par des contraintes génétiques, mais également par l'environnement intra-utérin : un stress chronique ou une inflammation pendant la grossesse peut produire des altérations de ce plissement (Mangin, Jouvant & Cachia, 2010). La maturation cérébrale continue après la naissance et perdure jusqu'à 25 ans. Cette ontogenèse est propre à l'espèce humaine : si la période de gestation est comparable chez l'Homme et le chimpanzé (respectivement 270 et 224 jours), la boîte crânienne augmente de 4,3 fois après la naissance chez l'Homme et de 1,6 fois chez le chimpanzé. La maturation cérébrale chez l'homme est donc fortement influencée par le contexte social, les normes morales et les premiers apprentissages comme le langage. À 5 ans, le cerveau humain a atteint quasiment son poids adulte (1,3 kg contre 1,4 kg en moyenne chez l'adulte). Au-delà du volume cérébral, le nombre de connexions entre les neurones se multiplie prodigieusement avec plus de 90 % des synapses qui se forment après la naissance. À certaines périodes de la synaptogenèse, des millions de synapses apparaissent chaque seconde. Ces créations de synapses s'opèrent par vagues successives dans différentes régions du cerveau : des régions postérieures sensorielles (cortex occipital) aux régions associatives (cortex temporal et pariétal), et enfin aux régions antérieures où siègent les fonctions cognitives supérieures (cortex préfrontal).

Ces périodes de prolifération synaptique ouvrent le champ des possibles pour le cerveau en lui permettant de s'adapter de manière optimale à son environnement social et culturel. La multiplication des synapses dans le cortex entraîne mécaniquement une augmentation de l'épaisseur du cortex à différents âges dans différentes régions du cerveau. Dans une seconde phase de la maturation cérébrale, les connexions qui maximisent l'adaptation du cerveau à son environnement se renforcent, notamment quand deux neurones connectés l'un à l'autre sont activés en même temps (Hebb, 1949) ; les connexions les moins renforcées sont quant à elles progressivement éliminées. Cet élagage synaptique aboutit à une diminution de l'épaisseur du cortex dans les différentes parties du cerveau (Ostby *et al.*, 2009). Cette maturation anatomique s'accompagne d'une maturation fonctionnelle caractérisée par une ségrégation et une intégration progressive des réseaux neuroaux impliqués dans chacune des différentes fonctions cognitives (perception, attention, mémorisation, raisonnement, prise de décision, etc. ; Fair *et al.*, 2007, 2009). La ségrégation et l'intégration progressive de ces réseaux de neurones sont également assurées par le renforcement des connexions axonales à longue distance, qui d'une part permettent à des régions relativement distantes dans le cerveau de travailler ensemble, et d'autre part favorisent la myélinisation progressive de ces fibres nerveuses, lesquelles accélèrent la vitesse de conduction de l'influx nerveux (Gilmore, Knickmeyer & Gao, 2018).

2. De la maturation cérébrale aux modèles du développement cognitif et aux apprentissages scolaires

Ces mécanismes de maturation anatomique perdurent jusqu'à 25 ans dans les parties préfrontales du cerveau, en particulier celles impliquées dans le contrôle de notre activité mentale et de notre impulsivité. Les périodes de sensibilité à l'environnement pendant lesquelles la plasticité cérébrale est maximale (l'enfance et l'adolescence) sont en partie tributaires de cette maturation qui s'opère à des rythmes variables dans les différentes régions du cerveau (Changeux, 2018). Par exemple, certaines conduites à risque (prise de drogues, sexualité non protégée, jeux dangereux) typiques de l'adolescence s'expliqueraient par des décalages de maturation entre les aires sous-corticales (limbiques) et corticales (préfrontales). Chez l'adolescent, le système limbique impliqué dans la réaction émotionnelle à la récompense et plus généralement dans le sentiment de plaisir (qui implique un neurotransmetteur particulier, la dopamine) mature plus rapidement que le système dans le cortex préfrontal qui régule l'activité du système limbique (Casey, 2015; Ernst, Pine & Hardin, 2005; *voir le chapitre 6 sur la prise de décision*).

Plus généralement, ces décalages de maturation expliquent que des périodes de progression fulgurante, suivies d'une stagnation voire d'une régression soient observées au cours du développement cognitif et des apprentissages de l'enfant et de l'adolescent. Contrairement à ce que pensaient les pionniers de la psychologie du développement comme le psychologue suisse Jean Piaget (Piaget & Inhelder, 1966), le développement cognitif et socio-émotionnel de l'enfant et de l'adolescent est fondamentalement dynamique et non linéaire : le bébé a des compétences précoces riches et complexes (sur le nombre, les probabilités bayésiennes, les concepts moraux; Spelke, 2000) que l'enfant ou l'adolescent, plus tard, a du mal à mobiliser. Il en va de même pour les compétences chez l'enfant ou l'adolescent que l'adulte est parfois incapable d'exprimer (Borst, Aïte & Houdé, 2015). Ces erreurs apparaissent à tous les âges dans des situations où nous utilisons spontanément une stratégie heuristique (rapide et peu coûteuse, qui marche souvent mais pas toujours), alors que nous devrions utiliser un algorithme logique (stratégie lente et coûteuse, mais qui marche toujours; Kahneman, 2011). La capacité à inhiber des stratégies heuristiques constitue l'un des mécanismes-clés pour surmonter des erreurs systématiques dans des tâches attentionnelles (Krakowski, Borst, Vidal, Houdé & Poirel, 2018; Poirel *et al.*, 2014; *voir le chapitre 1 sur l'attention visuelle globale/locale*), des tâches piagétienne emblématiques de la psychologie du développement (Borst, Poirel, Pineau, Cassotti & Houdé, 2012, 2013; Poirel *et al.*, 2012; Viarouge, Houdé & Borst, 2019), mais également au cours des apprentissages scolaires et universitaires dans les domaines de la lecture (Ahr, Houdé & Borst, 2016; Borst, Ahr, Roell & Houdé, 2015; *voir le chapitre 4 sur l'apprentissage de la lecture*), de la grammaire (Lanoë, Vidal, Lubin, Houdé & Borst, 2016), des mathématiques (Lubin, Vidal, Lanoë, Houdé & Borst, 2013; Roell, Viarouge, Hilscher, Houdé & Borst, 2019; Rossi, Vidal, Létang, Houdé & Borst, 2019; Viarouge, Houdé & Borst, 2019; *voir le chapitre 5 sur le nombre et l'arithmétique*), des sciences (Masson, Potvin, Riopel & Foisy, 2014; Potvin, Masson, Lafortune & Cyr, 2015) et de l'innovation (Camarda *et al.*, 2018; *voir le chapitre 8 sur la créativité*). Ces découvertes

permettent de réinterpréter les erreurs systématiques dans les apprentissages : elles sont moins le reflet d'une absence de connaissance (contrairement à ce qui est communément admis) qu'une difficulté ponctuelle à exprimer une connaissance dans un contexte où celle-ci entre en compétition avec une stratégie heuristique.

3. Environnement, plasticité et contraintes précoces

La maturation cérébrale est le fruit d'un programme génétique sous contrôle, notamment, des gènes du développement (une partie des 20 000 gènes contenus dans le génome). Elle est également très fortement influencée par l'environnement dans lequel le fœtus, le bébé, l'enfant et l'adolescent se développe. Par exemple, l'environnement socio-économique dans lequel l'enfant grandit produit un effet significatif sur la maturation et la plasticité de son cerveau, en particulier des aires cérébrales impliquées dans les apprentissages cognitifs et scolaires : l'hippocampe (structure cérébrale enfouie dans le cerveau et qui tire son nom de sa forme particulière), pour la mémorisation à long terme des connaissances (*voir le chapitre 2 sur la mémoire*), et le lobe frontal, pour les fonctions cognitives supérieures, l'apprentissage des règles logiques et le langage (*voir le chapitre 3 sur le langage oral*).

Grandir dans un milieu social défavorisé a des effets sur la maturation et la plasticité de ces régions, car ce sont des environnements où le niveau de stress chronique est important, ce qui peut entraîner des troubles du sommeil, des troubles émotionnels, du stress et de l'anxiété chez l'enfant (Matthews & Gallo, 2011). Une exposition à un stress environnemental chronique pendant l'enfance entraîne une augmentation dans l'organisme de l'hormone du stress, le cortisol, ce qui altère le fonctionnement et l'anatomie des régions qui ont une concentration forte de récepteurs au cortisol, et notamment l'hippocampe et les lobes frontaux (Blair & Raver, 2016). Et c'est vrai aussi pour la maturation du cerveau *in utero*, une exposition à un stress chronique pendant la grossesse ayant un effet regrettable sur l'expression de certains gènes dans le cerveau du fœtus (Hunter, 2012).

L'environnement socio-économique a également une influence sur l'intégrité du sommeil, et notamment du sommeil à ondes lentes impliqué dans la consolidation des connaissances en mémoire (*voir le chapitre 7 sur le sommeil et les apprentissages*). Une partie des difficultés scolaires rencontrées par les enfants grandissant dans des milieux défavorisés pourrait donc être liée à un sommeil plus fragmenté provoqué par l'environnement familial (travail de nuit, surpopulation dans le foyer, stress chronique ; Buckhalt, El-Sheikh & Keller, 2007). En définitive, il n'existe pas d'opposition formelle entre sociologie et neurosciences puisque la maturation et la plasticité cérébrale s'opèrent dans un contexte social particulier. L'enjeu d'un rapprochement entre ces deux disciplines scientifiques est l'identification et la promotion des environnements familiaux et scolaires enrichis cognitivement et émotionnellement dans l'objectif de combattre l'effet de la pauvreté sur le cerveau. Par exemple, certaines recherches essaient d'évaluer finement si certaines interventions ciblées en classe compensent les effets délétères de l'environnement dans lequel se développe l'enfant – dont le cerveau peut se reconfigurer à la suite d'apprentissages grâce à son extraordinaire plasticité (Iuculano, 2015).

Cette double influence génétique et environnementale donne à notre cerveau son universalité (tous les cerveaux comportent deux hémisphères, six lobes, un corps calleux), mais aussi sa singularité (tous les cerveaux diffèrent par leur forme générale, le dessin de leurs plis, l'épaisseur de leur cortex, la connectivité entre leurs régions). Le cerveau répond donc au même caractère universel et singulier que celui des visages humains : tous les visages comportent deux yeux, un nez, une bouche, deux oreilles, et ils sont pourtant tous différents. Tout un pan de la recherche en neurosciences s'attache à l'heure actuelle à mieux comprendre l'origine cérébrale des différences interindividuelles comportementales observées à tout âge de la vie. La forme des plis dans certaines parties très spécifiques du cerveau explique, par exemple, les différences interindividuelles dans les capacités de l'enfant, de l'adolescent et du jeune adulte à résister à ses automatismes, à ses habitudes, et à contrôler son impulsivité (Tissier *et al.*, 2018), ou encore dans les capacités de lecture des normo-lecteurs enfants et adultes (Borst *et al.*, 2016; Cachia *et al.*, 2018). C'est un résultat surprenant, car la forme des plis du cerveau est déterminée *in utero* et relativement stable après la naissance (Cachia *et al.*, 2016). Les différentes trajectoires développementales semblent donc en partie dépendantes de contraintes cérébrales précoces qui interagissent avec les mécanismes de neuroplasticité (création de synapses et de neurones, et modification de la connectivité entre les structures cérébrales), lesquels peuvent potentiellement compenser certaines de ces contraintes.

Cette nouvelle science du développement humain, les neurosciences cognitives du développement, nous permettent de réinterroger les grandes problématiques de la psychologie du développement – c'est-à-dire la part de l'inné et de l'acquis dans nos comportements, les mécanismes à l'origine des changements cognitifs et socio-émotionnels, l'existence de périodes critiques au cours du développement de l'enfant et de l'adolescent – en leur apportant un éclairage nouveau, plus complexe mais plus en phase avec la maturation de notre matière pensante : le cerveau. C'est tout l'enjeu des huit chapitres de cet ouvrage, rédigés par d'éminents spécialistes des neurosciences cognitives du développement, qui couvrent les grands domaines du développement cognitif et socio-émotionnel, et les principaux apprentissages scolaires fondamentaux de l'enfant et de l'adolescent.

Références

- Blair, C., & Raver, C. C. (2016). Poverty, stress, and brain development: New directions for prevention and intervention. *Academic Pediatrics*, 16, 30-36.
- Borst, G., Aïte, A., & Houdé, O. (2015). Inhibition of misleading heuristics as a core mechanism for typical cognitive development: Evidence from behavioural and brain-imaging studies. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 57, 21-25.
- Borst, G., Cachia, A., Tissier, C., Ahr, E., Simon, G., & Houdé, O. (2016). Early cerebral constraints on reading skills of school-age children: An MRI study. *Mind, Brain & Education*, 10, 47-54.
- Borst, G., Poirel, N., Pineau, A., Cassotti, M., & Houdé, O. (2013). Inhibitory control efficiency in a Piaget-like class-inclusion task in school-age children and adults: A developmental negative priming study. *Developmental Psychology*, 49, 1366-1374.
- Borst, G., Poirel, N., Pineau, A., Cassotti, M., & Houdé, O. (2012). Inhibitory control in number-conservation and class-inclusion tasks: A neo-Piagetian inter-tasks priming study. *Cognitive Development*, 27, 283-298.
- Buckhalt, J. A., El-Sheikh, M., & Keller, P. (2007). Children's sleep and cognitive functioning: Race and socioeconomic status as moderators of effects. *Child Development Perspectives*, 78, 213-231.
- Cachia, A., Borst, G., Tissier, C., Fisher, C., Plaze, M., *et al.* (2016). Longitudinal stability of the folding pattern of the anterior cingulate cortex during development. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 19, 122-127.
- Cachia, A., Roell, M., Mangin, J.-F., Sun, J., Jobert, A., Houdé, O., Dehaene, S., & Borst, G. (2018). How inter-individual differences in brain anatomy shape reading accuracy. *Brain Structure and Function*, 223, 701-712.
- Camarda, A., Borst, G., Agogué, M., Habib, M., Weil, B., Houdé, O., & Cassotti, M. (2018). Do we need inhibitory control to be creative? Evidence from a dual-task paradigm. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*, 12, 351-358.

- Casey, B. J. (2015). Beyond simple models of self-control to circuit-based accounts of adolescent behavior. *Annual Review of Psychology*, 66, 295-319.
- Changeux, J. P. (2018). Apprendre avec ses neurones. In Houdé, O., & Borst, G. (éd). *Le Cerveau et les Apprentissages*, 14-39.
- Changeux, J. P. (1983). *L'Homme neuronal*. Paris, Fayard.
- Hebb, D. O. (1949). *The Organization of Behavior*. New York, Wiley.
- Diekelmann, S., & Born, J. (2010). The memory function of sleep. *Nature Reviews Neuroscience*, 11, 114-126.
- Ernst, M., Pine, D. S., & Hardin, M. (2005). Triadic model of the neurobiology of motivated behavior in adolescence. *Psychological Medicine*, 36, 299-312.
- Fair, D. A., et al. (2009). Functional Brain Networks Develop from a "Local to Distributed" Organization. *PLoS Computational Biology*, 5, e1000381.
- Fair, D. A., et al. (2007). Development of distinct control networks through segregation and integration. *PNAS*, 104, 13507-13512.
- Friston, K. J. (2009). Modalities, modes, and models in functional neuroimaging. *Science*, 5951, 399-403.
- Gilmore, J. H., Knickmeyer, R. C., & Gao, W. (2018). Imaging structural and functional brain development in early childhood. *Nature Reviews Neuroscience*, 19, 123-137.
- Houdé, O., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2010). *Cerveau et psychologie*. Paris, PUF.
- Hunter, R. G. (2012). Epigenetic effects of stress and corticosteroids in the brain. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, 6(18).
- Iuculano, T., et al. (2015). Cognitive tutoring induces widespread neuroplasticity and remediates brain function in children with mathematical learning disabilities. *Nature Communication*, 6, 8453.
- Krakowski, C. S., Borst, G., Vidal, J., Houdé O., & Poirel, N. (2018). Children inhibit global information when the forest is dense and local information when the forest is sparse. *Journal of Experimental Child Psychology*, 173, 155-167.
- Mangin, J. F., Jouvent, E., & Cachia, A. (2010). In-vivo measurement of cortical morphology: Means and meanings. *Current Opinion in Neurology*, 23, 359-367.
- Matthews, K. A., & Gallo, L. C. (2011). Psychological perspectives on pathways linking socioeconomic status and physical health. *Annual Review of Psychology*, 62, 502-530.
- Ostby, Y., Tamnes, C. K., Fjell, A. M., Westlye, L. T., Due-Tønnessen, P., & Walhovd, K. B. (2009). Heterogeneity in subcortical brain development: A structural magnetic resonance imaging study of brain maturation from 8 to 30 years. *Journal of Neuroscience*, 29, 11772-11782.
- Piaget, J., & Inhelder, B. (1966). *La Psychologie de l'enfant*. Paris, PUF.
- Poirel, N., Borst, G., Simon, G., Rossi, S., Cassotti, M., Pineau, A., & Houdé, O. (2012). Number conservation is related to children's prefrontal inhibitory control: An fMRI study of a Piagetian task. *PLoS ONE* 7(7), e40802. (doi:10.1371/journal.pone.0040802)
- Poirel, N., Krakowski, C.-S., Sayah, S., Pineau, A., Houdé, O., & Borst, G. (2014). Do you want to see the tree? Ignore the forest. Inhibitory control during local processing: A negative priming study of local-global processing. *Experimental Psychology*, 61, 205-214.
- Raichle, M. E. (2009). A brief history of human brain mapping. *Trends in Neuroscience*, 32, 118-126.
- Roell, M., Viarouge, A., Hilscher, E., Houdé, O., & Borst, G. (2019). Evidence for a visuospatial bias in decimal number comparison in adolescents and in adults. *Scientific Reports*, 9, 14770.
- Rossi, S., Vidal, J., Létang, M., Houdé, O., & Borst, G. (2019). Adolescents and adults need inhibitory control to compare fractions. *Journal of Numerical Cognition*, 5, 314-336.
- Tissier, C., Linzarini, A., Allaire-Duquette, G., Mevel, K., et al. (2018). Sulcal polymorphisms of the IFG and ACC contribute to inhibitory control variability in children and adult. *eNeuro*, 5, ENEURO.0197-17.2018, 1-14.
- Viarouge, A., Houdé, O., & Borst, G. (2019). Evidence for the role of inhibition in numerical comparison: a negative priming study in 7-8-year-olds and adults. *Journal of Experimental Child Psychology*, 186, 131-141.
- Viarouge, A., Houdé, O., & Borst, G. (2019). The progressive 6-year-old conservator: Numerical saliency and sensitivity as core mechanisms of numerical abstraction in a Piaget-like estimation task. *Cognition*, 190, 137-142.



1.	Quelles informations visuelles sont traitées en priorité? . . .	14
2.	Mise en place de la spécialisation hémisphérique du traitement global/local	19
3.	Flexibilité des processus attentionnels et évolution avec l'âge	31
4.	Contexte émotionnel et traitement global/local.	34
5.	Modèle perceptivo-cognitif de l'attention visuelle globale/locale	39
6.	Préférence locale chez l'enfant: un passage obligé et utile	40

CHAPITRE

1

L'attention visuelle globale/locale

Nicolas Poirel, professeur de Psychologie du développement, Université de Paris, laboratoire de Psychologie du développement et de l'éducation de l'enfant (UMR CNRS 8240, LaPsyDÉ), Paris, GIP Cyceron, Caen

1. Quelles informations visuelles sont traitées en priorité ?

Observer le monde qui nous entoure implique une focalisation de l'attention soit sur la vision d'ensemble d'une scène, soit sur un élément particulier de cette même scène. Ces deux fonctions renvoient à deux mécanismes distincts ; dans le premier cas, on parle de traitement global, et dans le second, de traitement local. On peut ainsi observer soit une forêt, soit les arbres qui la composent. Mais percevons-nous d'abord les arbres ou la forêt ? Afin de répondre à cette question et d'étudier les processus de traitement global et local, Navon (1977) a élaboré des figures dites hiérarchiques dans lesquelles des éléments locaux sont arrangés en une configuration globale. Ces figures de laboratoire présentent l'avantage d'avoir deux niveaux de traitement bien distincts, identifiables : par exemple, au niveau global, la lettre « H », et au niveau local, la lettre « S » (figure 1.1). De plus, ces deux niveaux présentent des mécanismes identificatoires indépendants : à partir d'un élément local, il est impossible de prédire quelle sera la forme présentée au niveau global et vice versa. Les résultats de l'étude princeps de Navon ont révélé qu'un adulte est plus rapide et efficace pour identifier le niveau global que le niveau local. Cette priorité du traitement global est ce que l'on a coutume d'appeler l'avantage global. En outre, l'information présentée au niveau global peut perturber le traitement de l'information locale, ce que l'on qualifie d'interférence globale (ce qui n'est pas vrai pour l'inverse). Cette double constatation amène le concept général d'effet de précedence globale, ce qui a conduit Navon (2003) à l'affirmation suivante : l'attention visuelle de l'adulte est d'abord captée spontanément par la forêt, puis par les arbres.

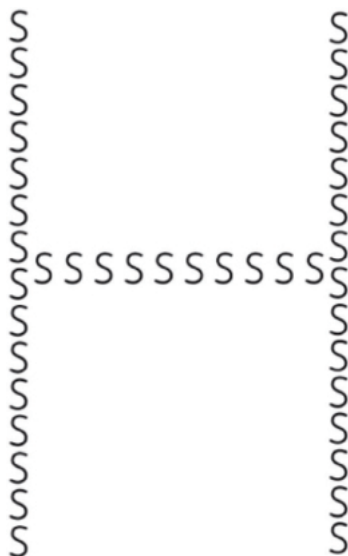


Figure 1.1 Exemple de figure hiérarchique utilisée pour étudier la perception globale/locale (adapté de Navon, 1977).

Navon suggère que la précedence globale présente l'avantage d'une économie de ressources attentionnelles, permettant d'abord une vision d'ensemble de notre monde visuel, puis un affinement, si nécessaire – plus coûteux –, véhiculé par les informations

locales plus précises. Un cadrage général sur la scène d'ensemble est une prise d'information relevant d'une stratégie plus ergonomique. Imaginons une précé-
 dence inverse (locale) : il serait coûteux de d'abord traiter tous les détails d'une scène, puis de les mettre en rapport afin d'obtenir une vision cohérente et significative du contexte. Ainsi, la perception prioritaire globale permettrait une première analyse rapide et économique de la scène (le phénomène bien connu de « cécité au changement » en est un exemple frappant : cet effet correspond au fait que, souvent, un adulte ne perçoit pas la disparition d'un élément local d'une scène d'ensemble ; Rensink *et al.*, 1997), puis cette première ébauche d'information guiderait et mobiliserait notre attention vers l'information utile à traiter. Les travaux de Lamb et Robertson (1990) ont par la suite suggéré une forte implication des processus de préparation attentionnels dans le traitement global/local. L'attention pourrait en effet moduler la précé-
 dence globale. Par exemple, le fait de traiter à l'essai N une information au niveau local produit un phénomène d'amorçage attentionnel qui engendre de meilleures performances si le traitement requis à l'essai N + 1 se situe de nouveau au niveau local (Hubner, 2000 ; Lamb & Yund, 1996). Ainsi, l'effet de précé-
 dence du niveau global peut être réduit par des modifications attentionnelles de (1) l'attente spécifique d'une cible à un certain niveau (Robertson *et al.*, 1993 ; Stoffer, 1993), (2) la manipulation de la fréquence d'apparition de la cible à un même niveau (Kinchla *et al.*, 1983 ; Ward, 1982), (3) la division de l'attente au niveau global ou local (Miller, 1981). L'effet de précé-
 dence globale reste néanmoins très robuste et difficile à inverser, car il faut un entraînement local sur plus de 10 000 essais pour que la précé-
 dence globale soit inversée en précé-
 dence locale chez l'adulte (Dulaney & Marks, 2007), ce qui en dit long sur la force de ce mécanisme.

Qu'en est-il chez l'enfant ? Des querelles un peu tombées dans l'oubli avaient animé au début du xx^e siècle les partisans d'une perception enfantine « globale » (Claparède, 1925) et ceux tout autant déterminés d'une perception « locale » (Cramausse, 1924). La variabilité des matériels utilisés et surtout des méthodes proposées avaient laissé le problème non résolu et toujours ouvert. Depuis les travaux pionniers de Navon, les figures hiérarchiques sont également l'outil principal et privilégié permettant l'étude du traitement global/local chez l'enfant. Cette puissante précé-
 dence globale de l'attention est-elle présente ou non chez l'enfant ? En se servant de stimuli hiérarchiques inspirés très directement du matériel de Navon, Poirel et collaborateurs ont procédé à l'étude de la genèse des mécanismes attentionnels local/global de 4 ans à l'âge adulte. Ils ont montré que lorsqu'un enfant doit indiquer le plus rapidement possible si deux figures hiérarchiques sont identiques ou non (figure 1.2), les plus jeunes fondent leur jugement sur les informations locales : ils font peu d'erreurs dans les situations présentant des différences locales. Inversement, les erreurs pour les différences globales sont significativement plus nombreuses (Poirel, Mellet *et al.*, 2008). Ce résultat laisse supposer un effet de précé-
 dence locale jusqu'à 6 ans. Les réponses enfantines sont probantes à cet égard et plaident en faveur d'une très forte préférence attentionnelle sur le niveau local dès l'âge de 4 ans, avec une inversion progressive en faveur d'une précé-
 dence globale autour de 6 ans. Cette préférence attentionnelle globale sera comparable à celle de l'adulte vers 9 ans.

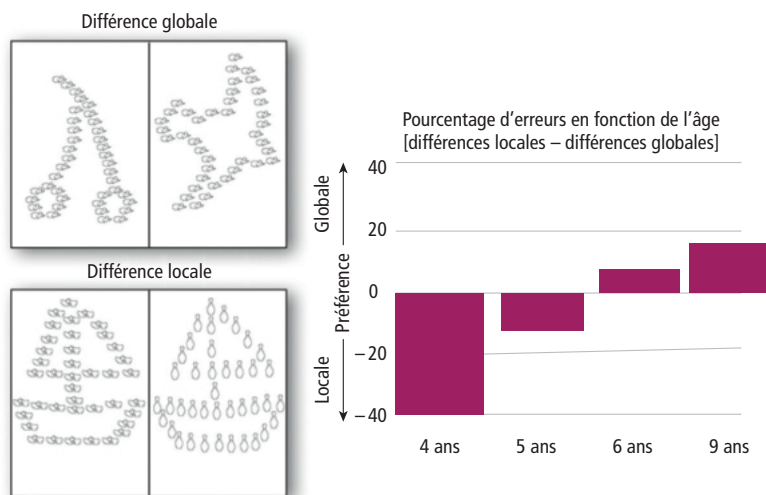


Figure 1.2 Exemple de stimuli hiérarchiques présentés aux enfants (adapté de Poirel, Mellet *et al.*, 2008). On constate une évolution d'une préférence pour le niveau local vers une préférence pour le niveau global avec l'âge.

Avec l'âge, une bascule de la préférence perceptive a été observée ; les plus jeunes sont en mode préférence locale, alors qu'à partir de 6 ans les enfants vont évoluer vers le mode préférence globale. À partir de cet âge, ils vont progressivement mieux réussir à détecter les différences globales. Ainsi, l'effet de préférence globale décrit par Navon ne serait pas l'une des composantes innées de la perception et se construirait peu à peu avec l'âge. Avant 6 ans, comme nous le voyons sur la figure 1.2, les jeunes enfants vont spontanément focaliser leur attention essentiellement sur les éléments constitutifs locaux. Très progressivement, ce mode de traitement de l'information va s'inverser au bénéfice du traitement global à partir de 6 ans. C'est autour de 9 ans que cette dominance de l'information globale va trouver son achèvement ; dès lors, la préférence globale est comparable à celle de l'adulte (Poirel, Mellet *et al.*, 2008). Cette courbe développementale concorde avec d'autres études concernant l'influence de la densité des éléments locaux sur la perception de la forme globale (Dukette & Stiles, 1996, 2001). Dans une tâche de choix forcé, les auteurs demandent aux enfants d'indiquer parmi deux figures hiérarchiques celle qui ressemble le plus à la figure témoin. Les choix vont révéler soit une préférence fondée sur la forme globale, soit une préférence pour les éléments locaux constitutifs. Les résultats font apparaître une dichotomie enfants/adultes liée à la densité des stimuli. Les adultes présentent une robuste préférence globale quelle que soit la densité des éléments constitutifs : dans les deux exemples présentés dans la figure 1.3, c'est toujours sur la forme globale que s'élabore le jugement de similitude. Par contre, la densité influence les choix des enfants. Lorsque les formes globales comportent beaucoup d'éléments (figure 1.3 A), à 4 et 6 ans, les jugements de ressemblance portent sur la forme globale (la grande croix). Inversement, lorsque le nombre d'éléments diminue (figure 1.3 B), les enfants vont choisir les éléments locaux comme indicateurs de ressemblance. Les enfants sont encore dans une dominance locale, et leurs jugements fluctuent en fonction des variations de la densité des stimuli. La réduction du nombre d'éléments provoque une dégradation sensible de la forme globale, qui par conséquent devient moins accessible. Ces résultats corroborent la fragilité de la mise en relation d'éléments locaux en une forme d'ensemble organisée chez les plus jeunes enfants.

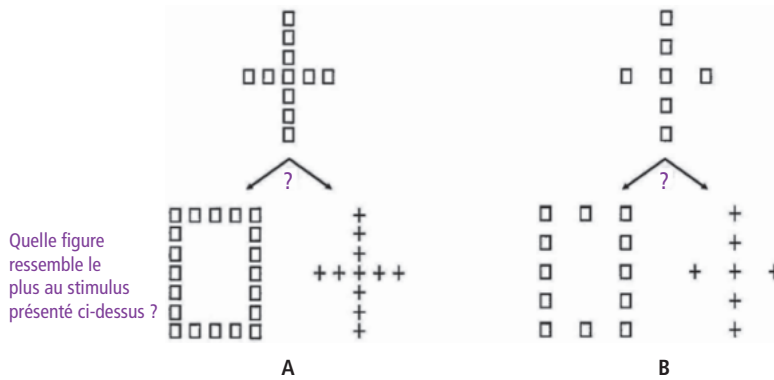


Figure 1.3 Exemple de stimuli utilisés lors d'une tâche de choix forcé (adapté de Dukette & Stiles, 1996). Les stimuli comportent soit beaucoup d'éléments (A), soit peu d'éléments (B). Les enfants présentent une préférence pour les informations globales uniquement dans la condition présentée en A.

Les travaux de Burack vont également dans ce sens ; la capacité à regrouper des éléments espacés en une forme globale s'améliore entre 6 et 10 ans. Par contre, ces mêmes enfants présentent des capacités de groupement comparables à celles des adultes lorsque les éléments sont très proches (Burack *et al.*, 2000). On sait par ailleurs que des enfants de 4 à 8 ans ayant pour consigne de dessiner ce type de stimulus de mémoire vont présenter des patterns développementaux similaires : la variation de la densité des éléments perturbe le dessin global uniquement à 4 et 5 ans (Dukette & Stiles, 2001). Moins il y a d'éléments dans le modèle à reproduire, et plus le dessin de la forme globale est perturbé. Akshoomoff (1995a, 1995b) avait également fait l'hypothèse que les jeunes enfants traitaient d'abord les informations locales avant les informations globales avec des stratégies différentes de celles de l'adulte. Ainsi, bien que les jeunes enfants soient sensibles aux informations globales d'une scène visuelle (Farroni *et al.*, 2000 ; Quinn *et al.*, 2002), l'intégration des éléments locaux en une forme d'ensemble reste fragile et instable jusqu'à l'âge de 6 ans. Ce n'est qu'à partir de cet âge que le groupement des éléments en une forme globale devient automatique et généralisé (Kimchi *et al.*, 2005 ; Scherf *et al.*, 2009).

Pourquoi observe-t-on une préférence pour les informations locales chez les enfants les plus jeunes ? On peut trouver un premier élément de réponse en observant l'évolution de l'activité exploratoire des enfants avec l'âge. Les travaux pionniers de Vurpillot qui enregistre les mouvements oculaires de jeunes enfants dans une tâche de comparaison montrent une amélioration quantitative et qualitative de l'exploration visuelle avec l'âge (Kowler & Martins, 1982 ; Vurpillot, 1968). Lorsqu'il s'agit de comparer deux dessins pour savoir s'ils sont ou non pareils, les plus jeunes se contentent d'une exploration partielle que l'on qualifie de « conduite d'échantillonnage ». Pour élaborer leurs jugements d'identité, les plus jeunes vont focaliser leur attention sur un nombre restreint d'éléments (parfois un seul) et conclure sur un simple détail de l'identité des deux scènes visuelles. Cette « contrainte locale » conduit bien évidemment à de nombreuses erreurs. Les enfants segmentent les éléments locaux d'une figure indépendamment les uns des autres, ce qui dessert la perception globale. Avec l'âge, le nombre de fixations oculaires croît (sans toutefois atteindre l'exhaustivité, même chez l'adulte ; Yarus, 1967). Parallèlement, les stratégies de récolte de l'information vont s'affiner également au fil du temps, ce qui permettra une amélioration de la mise en relation des éléments locaux en une forme globale (Stiles & Tada, 1996). Cette

exploration incomplète, ainsi que des stratégies de mises en relation défaillantes expliqueraient la focalisation de l'attention au niveau des éléments. Ceci peut conduire à des réponses enfantines « paradoxales » : par exemple, un enfant de 4 ans peut fort bien affirmer que les deux dessins du haut de la figure 1.2 sont « pareils » parce que constitués de petites souris (alors que le niveau global représente un oiseau et des cerises). La capture attentionnelle de l'enfant est focalisée avec tant de force sur l'élément local que la forme globale n'est pas prise en compte, phénomène que l'on pourrait qualifier de « cécité attentionnelle globale ». Un exemple frappant de cette priorité de traitement des détails locaux peut également être relativement simplement mis en évidence : un enfant de 4 ans auquel on demande de décrire ce qu'il voit sur les célèbres peintures d'Arcimboldo, comme l'œuvre *Vertumne*, ou la représentation de la figure 1.4 indiquera : « Ce sont des fruits, des légumes et des fleurs » (il ne parlera pas du visage). Un enfant de 5-6 ans indiquera : « Ce sont des fruits, des légumes, des fleurs, et il y a un visage aussi. » Cet enfant est toujours en mode local prioritaire, mais commence à décrire l'information présente au niveau global. Enfin, les enfants plus âgés indiqueront, comme les adultes : « C'est un visage, qui est fait de fruits, de légumes et de fleurs. » Nous aurons ainsi chez l'enfant plus âgé une description qui respecte l'effet de précedence globale : l'enfant décrira d'abord l'ensemble, puis passera aux détails.



Figure 1.4 Cette représentation inspirée d'une peinture d'Arcimboldo permet, de façon simple, de mettre en évidence l'évolution d'une précedence locale vers une précedence globale chez l'enfant.

Les capacités attentionnelles permettant à l'enfant de considérer les deux niveaux de traitement local/global vont ainsi connaître un bouleversement important vers 6 ans. Ce moment de transition correspond au passage entre deux stades du développement cognitif dans les théories piagétienues (Piaget, 1984). Le jeune enfant de 4-5 ans gère un nombre limité de critères et de propriétés concernant les objets. Par exemple, un petit carré rouge est soit un « rouge », soit un « carré », soit un « petit » (phénomène aussi identifié par Markman [1989] en termes de « biais d'exclusivité mutuelle » dans la catégorisation). La capacité de coordination entre ces différents critères (couleur, forme, taille) s'accroît de façon significative lors du passage du stade préopératoire au stade opératoire autour de 6 ans. On peut raisonnablement faire l'hypothèse d'une coordination similaire entre

les informations locales et globales dans cette même période du développement cognitif. Dans les modèles néopiagétien (Demetriou *et al.*, 1992), cette transition est décrite en termes quantitatifs, et correspondrait à l'accroissement de la capacité de co-activation de schèmes en mémoire de travail. Au départ, l'enfant utiliserait préférentiellement le schème local, plus accessible, puis ultérieurement le schème global serait également inclus et articulé avec le schème local lors du traitement de l'information visuelle. Enfin, lorsque la précéden- ce globale a émergé et devient prédominante, on peut supposer une compétition entre les deux modes de traitement de l'information, en particulier lors du traitement local. Nous verrons plus loin que l'activation du traitement local nécessite alors l'inhibition de l'information globale naturellement prédominante, comme on peut le supposer à partir du modèle développemental proposé par Houdé (2000).

En conclusion, il semblerait que la précéden- ce des informations globales se construise progressivement avec l'âge. Lorsqu'elle est complètement acquise, elle semble extrêmement robuste et constitue notre mode de perception visuelle « par défaut » (Kimchi, 1992). Des études de neuropsychologie, de présentation en hémichamp visuel et des travaux récents d'imagerie cérébrale suggèrent également des chemins cérébraux différents pour le traitement de ces informations, avec une forte variation de l'anatomie cérébrale lors du passage à 6 ans de la précéden- ce locale à la précéden- ce globale (Poirel *et al.*, 2011 ; Poirel, Leroux *et al.*, 2014).

2. Mise en place de la spécialisation hémisphérique du traitement global/local

Si nous revenons aux résultats de l'expérience princeps de Navon chez l'adulte, il semble très difficile que l'on puisse échapper au traitement prioritaire de l'information globale lors de l'inspection d'une scène visuelle. Navon (1981) avait fait l'hypothèse que cette propriété pouvait être inhérente à la structure de notre système visuel. Pour ce faire, il invoque l'idée d'un traitement en parallèle des informations visuelles globales et locales en supposant une mise à disposition plus rapide des informations globales, ce qui favoriserait la priorité de leur traitement (figure 1.5).

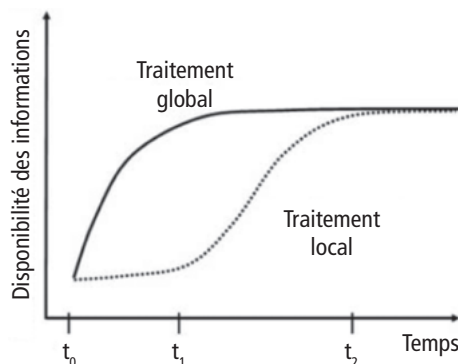


Figure 1.5 Proposition de traitement parallèle des informations pouvant expliquer le phénomène de précéden- ce globale (adapté de Navon, 1981).

Les particularités des canaux magno- et parvocellulaires des voies visuelles cérébrales en font de bons candidats comme supports fonctionnels de cette hypothèse. La voie visuelle magnocellulaire (véhiculant les basses fréquences spatiales), connue pour sa célérité, traiterait rapidement l'information globale avant que la voie parvocellulaire (véhiculant les hautes fréquences spatiales) ne fournisse les informations sur le niveau local (Felleman & Van Essen, 1991; Shulman *et al.*, 1986; Shulman & Wilson, 1987). Il a été clairement démontré que les informations globales reposent sur des fréquences spatiales basses, alors que les éléments locaux sont portés par les fréquences spatiales hautes (Boeschoten *et al.*, 2005). Le lien direct entre fréquences spatiales et niveau de traitement permet une explication élégante de la précédece globale. En poursuivant ce raisonnement, Bullier (2001), dans son modèle par itération, suggère qu'une première ébauche de reconnaissance globale serait possible via la voie magnocellulaire. Cette première vague de reconnaissance serait ensuite rétro-injectée par une deuxième vague de retour vers la voie parvocellulaire – troisième vague plus lente – dévolue aux informations locales. La rencontre de ces deux dernières vagues validerait ou infirmerait l'ébauche globale initialement fournie par la première vague magnocellulaire (figure 1.6).

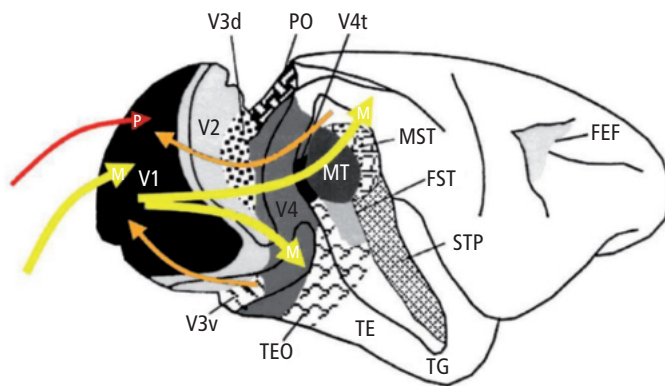


Figure 1.6 Modèle par itération (adapté de Bullier, 2001). L'information visuelle se propagerait en trois vagues successives décalées dans le temps. La première vague (magnocellulaire, M, flèches jaunes) véhiculerait l'information globale en premier. Ces informations seraient ensuite renvoyées vers les aires visuelles de bas niveau par des connexions descendantes (flèches orange), en même temps que la troisième vague ascendante (parvocellulaire, P, flèche rouge), plus lente, activerait les aires visuelles.

Cette succession de vagues pourrait expliquer les deux phénomènes comportementaux de l'effet de précédece globale : l'avantage global et l'interférence globale. L'avantage global s'expliquerait par la grande rapidité de transmission des informations véhiculées par la voie magnocellulaire. L'interférence globale serait liée à un conflit possible entre les informations de retour de la deuxième vague et la rencontre avec la troisième vague. En effet, les informations pré-identifiées par la voie rapide globale (par exemple, un grand H) viendraient – via la deuxième vague – perturber le traitement que le participant doit effectuer sur une information locale (par exemple, de petits «s»), qui est quant à elle véhiculée par la voie plus lente. L'information globale, en conflit avec ce que le participant souhaite identifier au niveau local, viendrait ainsi perturber le traitement local. C'est ici l'identification des stimuli qui entraînerait les effets d'interférence lors du traitement visuo-attentionnel global/local, en accord avec des résultats de plusieurs travaux

expérimentaux (Beaucousin *et al.*, 2011, 2013; Poirel, Pineau *et al.*, 2008), aussi bien chez l'adulte (Poirel *et al.*, 2006) que chez l'enfant (Poirel, Mellet *et al.*, 2008). Un autre modèle présentant de fortes similitudes avec celui proposé par Bullier, et en accord avec ces résultats, a été développé par Bar (2004). Des travaux récents d'imagerie cérébrale fonctionnelle sont tout à fait compatibles avec ces deux modèles, renforçant cette proposition d'explication physiologique pour la reconnaissance rapide des scènes visuelles chez l'Homme (Peyrin *et al.*, 2010).

Des travaux convergents en psychologie expérimentale, en neuropsychologie clinique, et en imagerie cérébrale ont mis en évidence que les deux hémisphères cérébraux ne présentent pas les mêmes prédispositions pour les traitements global et local. Des études menées auprès de patients victimes de lésions focales unilatérales temporo-pariétales à droite ont révélé une grave défaillance du traitement global, indiquant une spécialisation de cet hémisphère pour le traitement global, alors que des lésions homologues à gauche affectent le traitement local (Delis *et al.*, 1986; Robertson & Lamb, 1991). Les dessins produits par les patients cérébro-lésés à droite négligent l'aspect global de la figure 1.7, alors que d'autres patients présentant une lésion similaire de l'hémisphère gauche étaient dans l'incapacité de rapporter les éléments locaux.

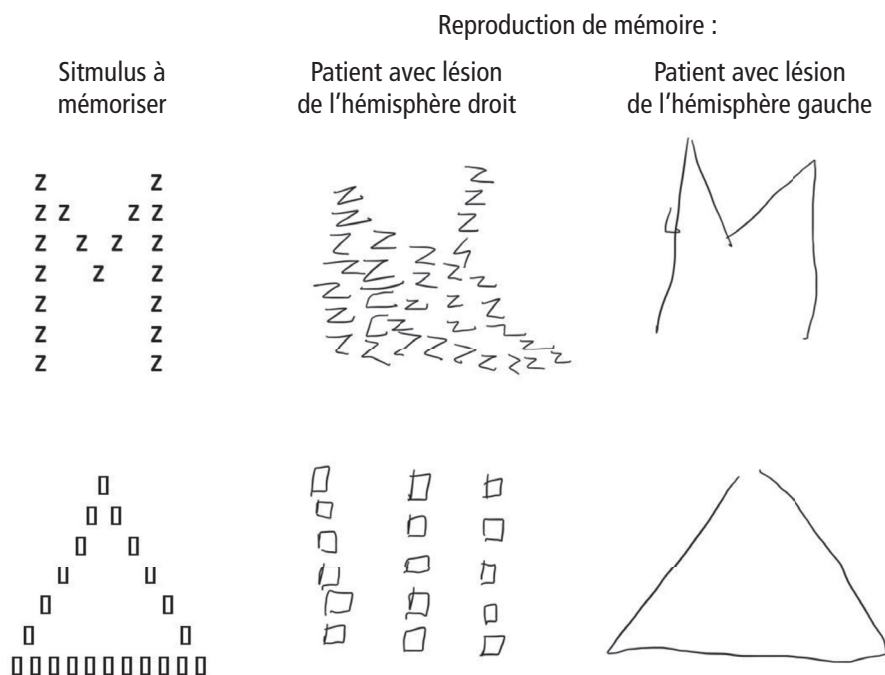


Figure 1.7 Reproduction de mémoire de figures hiérarchisées par des patients présentant des lésions temporo-pariétales à droite ou à gauche (adapté de Delis *et al.*, 1986).

Ces spécialisations hémisphériques ont également été mises en évidence lors d'études en présentation par héli-champ visuel chez le sujet sain. Sergent (1982) fut la première à explorer les asymétries hémisphériques pour le traitement global/local chez le sujet sain. Chaque stimulus hiérarchique apparaissait pendant 150 ms dans l'héli-champ visuel

gauche ou droit, sachant que les informations présentées du côté droit du champ visuel sont envoyées seulement à l'hémisphère gauche, et vice versa. Le sujet avait pour consigne de fixer un point central. Le temps de présentation très court du stimulus garantissait l'absence de mouvements des yeux du sujet, évitant ainsi tout recentrage du stimulus en vision fovéale. Les temps de réponse étaient plus rapides pour identifier la lettre globale lorsqu'elle était présentée dans l'hémi-champ visuel gauche (en comparaison d'une présentation dans l'hémi-champ visuel droit), et plus rapides pour identifier la lettre au niveau local lorsque la figure hiérarchique apparaissait dans l'hémi-champ visuel droit (en comparaison d'une présentation à gauche). De façon tout à fait intéressante, ces résultats ont été répliqués avec des scènes naturelles (figure 1.8) sur lesquelles un filtrage dit « passe bas » (favorisant les informations globales) ou « passe haut » (favorisant les informations locales) était appliqué (Peyrin *et al.*, 2003). L'hémisphère droit de notre cerveau semble donc bien spécialisé pour porter notre attention sur la forêt, alors que l'hémisphère gauche favorise la perception des arbres. Cette affirmation a également été validée à l'aide de techniques d'imagerie cérébrale.

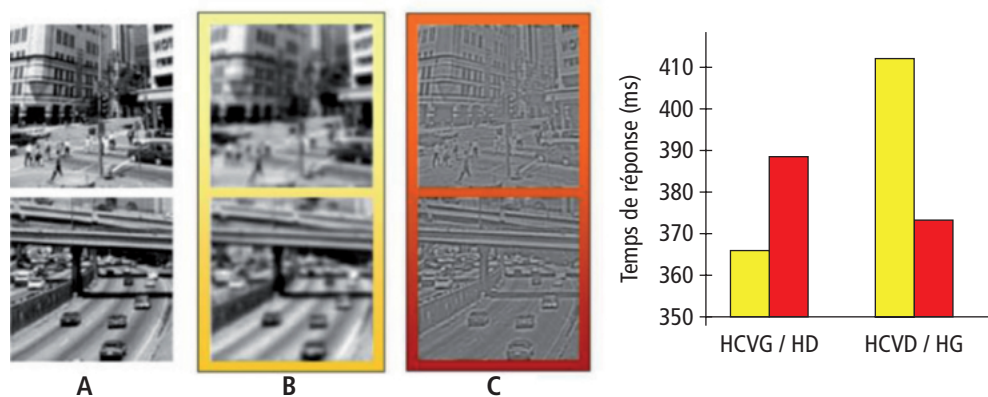


Figure 1.8 Photographies non filtrées (A), filtrées en passe bas (B) et filtrées en passe haut (C; adapté de Peyrin *et al.*, 2003). Les résultats indiquent un traitement préférentiel des images filtrées en passe bas, véhiculant l'information globale, par l'hémisphère droit (HD, présentation dans l'hémi-champ visuel gauche, HCVG). Un traitement préférentiel des images filtrées en passe haut, favorisant les informations locales, est observé pour l'hémisphère gauche (HG, présentation dans l'hémi-champ visuel droit, HCVD). Le même pattern de résultats est obtenu avec des figures hiérarchisées (Sergent, 1982).

Les techniques de neuro-imagerie fonctionnelle ont permis de déterminer de manière précise les bases neurales de cette spécialisation hémisphérique. L'expérience menée par Fink a été la première à proposer l'enregistrement de l'activité cérébrale pendant la présentation de figures hiérarchiques (Fink *et al.*, 1996). Une activation plus importante du gyrus lingual droit a été observée lorsque le participant portait son attention sur le niveau global, alors que le cortex occipital inférieur gauche était plus sollicité lors d'une focalisation de l'attention au niveau local. Ces résultats ont pour la première fois mis en évidence une spécialisation hémisphérique dès les aires visuelles de bas niveau (figure 1.9).

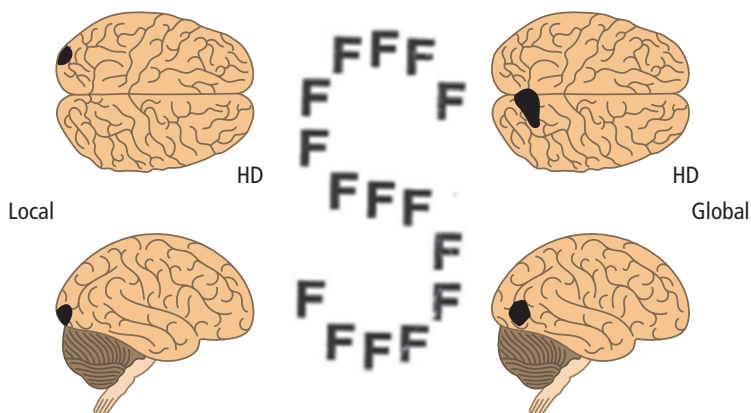


Figure 1.9 Résultats du premier paradigme d'imagerie cérébrale fonctionnelle utilisant des figures de Navon (HD : hémisphère droit; adapté de Fink *et al.*, 1996).

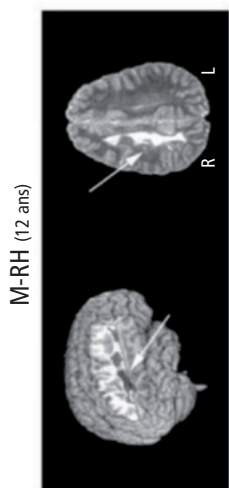
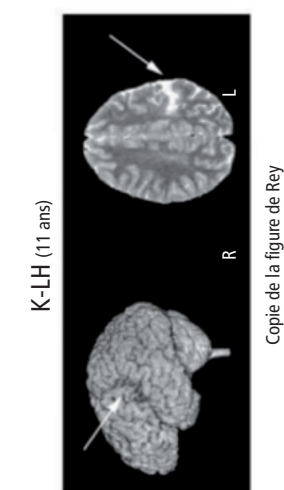
En accord avec les résultats de Fink, d'autres études en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle ont rapporté des résultats similaires, avec des stimuli hiérarchiques (Han *et al.*, 2002; Lux *et al.*, 2004; Martinez *et al.*, 1997) ou des photographies de scènes naturelles filtrées (Peyrin *et al.*, 2004). Cette sensibilité aux variations des propriétés des stimuli dès les aires visuelles de bas niveau signerait la capacité d'intégration d'éléments en une forme globale organisée beaucoup plus précocement qu'on ne l'imaginait dans la microgenèse du traitement visuel (Altmann *et al.*, 2003; Kourtzi *et al.*, 2003). Cependant, une étude a proposé une mise en regard de l'organisation rétinotopique et des activations global/local. La représentation fovéale (vision centrale) correspond aux activations trouvées lors du traitement local, et les représentations para-fovéales (vision périphérique) coïncident avec les activations du traitement global, quel que soit l'hémisphère (Sasaki *et al.*, 2001). Même si aucune spécialisation hémisphérique n'est rapportée dans cette étude, ce type de travail reste néanmoins à approfondir. Il est en effet fortement possible que les deux hémisphères soient capables de traiter les informations globales et locales, avec simplement une préférence pour un type de traitement selon l'hémisphère. Cette question reste à élucider à l'aide, par exemple, de cartes d'asymétries fonctionnelles comparant l'activité de régions homologues droites et gauches, en s'inspirant de la méthode utilisée par Peyrin (2004). Selon l'auteur, il faut considérer la spécialisation hémisphérique comme un système dynamique dans lequel la supériorité d'un hémisphère sur l'autre varierait en fonction des contraintes temporelles (Peyrin *et al.*, 2006) : plus le système visuel serait « contraint » par des temps de présentation rapides des stimuli, plus les deux hémisphères tendraient à traiter des informations de différentes natures (préférence locale pour l'hémisphère gauche et préférence globale pour l'hémisphère droit). Ainsi, les résultats confortent cette hypothèse, avec une spécialisation hémisphérique uniquement pour les présentations rapides (30 ms), et une spécialisation moindre au-delà de 150 ms. De toute évidence, des effets top-down vont nous préparer à faire face à des modifications rapides ou non de l'environnement (ce qui est certainement le cas également lors de situations d'alerte ou d'émotion). La prise d'information par les deux hémisphères va s'adapter et s'optimiser selon les contraintes temporelles dans lesquelles le sujet s'inscrit.

Les travaux d'imagerie cérébrale ont également mis en évidence une spécialisation des aires pariétales pour le traitement global/local. La région temporo-pariétale gauche refléterait les processus de contrôle attentionnel permettant de passer d'un traitement d'un niveau à

l'autre. Par contre, il semblerait que l'attention fortement soutenue sur l'un ou l'autre des niveaux implique préférentiellement un réseau constitué des régions temporo-pariétale et préfrontale dorso-latérale droites (Fink *et al.*, 1997). Ces résultats ont été étayés par Corbetta, qui montre une implication du sillon intrapariétal durant le maintien de l'attention sur un niveau donné (local ou global; Corbetta *et al.*, 2000). D'autres travaux ont souligné l'importance des processus exécutifs nécessaires pour résister à l'interférence des informations globales (Weissman *et al.*, 2002). Dans ce cas, l'activation massive du cortex cingulaire antérieur (connu pour son implication dans la gestion de conflits et dans l'inhibition des interférences) est requise (Weissman *et al.*, 2003, 2005). Mevorach a également proposé une hypothèse intéressante sur le rôle du cortex pariétal lors du traitement visuel global/local (Mevorach *et al.*, 2006). À partir d'un paradigme de stimulation magnétique transcrânienne, les auteurs ont montré que le cortex pariétal droit (partie postérieure) permettait de focaliser l'attention vers l'information perceptive la plus accessible, soit locale, soit globale de la figure hiérarchique. Inversement, la région homologue gauche permettrait de résister au traitement de l'information la plus accessible lorsqu'elle doit être inhibée. Ce résultat attribue pour la première fois au cortex pariétal une fonction de « médiateur attentionnel ». Cette interprétation est tout à fait compatible avec les études d'imagerie, mais le rôle dévolu aux aires pariétales est sujet à une interprétation différente. Pour rappel, les études d'imagerie utilisent des stimuli dont le niveau global est plus saillant et plus accessible que le niveau local (nombreux éléments locaux, faible distance entre les éléments par exemple; voir figure 1.9). En conséquence, les activations du cortex pariétal gauche au cours du traitement du niveau local pourraient ne pas traduire une spécialisation pour ce niveau, mais, de façon plus subtile, une résistance active pour inhiber le traitement de l'information la plus saillante (l'information globale). Les activations pariétales droites ne seraient quant à elles pas le reflet d'une spécialisation de cet hémisphère pour le traitement global per se, mais celui de processus d'activation engageant l'attention vers l'information la plus saillante du stimulus (qui se révèle ici, comme dans la plupart des cas, l'information globale des stimuli hiérarchiques).

Chez l'adulte, les informations visuelles globales seraient donc traitées plus rapidement que les informations locales grâce à la célérité de la voie magnocellulaire, et ces deux types de traitements présenteraient une spécialisation hémisphérique différente. Les résultats recueillis auprès d'enfants entre 5 et 12 ans, victimes de lésions unilatérales, répliquent ceux obtenus chez l'adulte : des lésions de l'hémisphère droit perturbent le traitement global alors que des lésions de l'hémisphère gauche rendent le traitement local très difficile pour les enfants (Stiles *et al.*, 2003, 2005). Ces études, qui proposent un suivi longitudinal, ont été menées auprès d'enfants atteints d'une lésion focale unilatérale de l'hémisphère gauche ou de l'hémisphère droit (Akshoomoff *et al.*, 2002; Stiles *et al.*, 2003). La copie d'un enchevêtrement de figures géométriques (la figure de Rey-Osterrieth) est déficitaire quel que soit le côté de la lésion, et les déficits les plus importants sont observés entre 6 et 7 ans. Comme pour les enfants sains (Akshoomoff & Stiles, 1995a, 1995b), tous les enfants cérébro-lésés commencent leur reproduction par les éléments locaux de la figure. Ce résultat indique une absence de déficit pour le traitement local quel que soit le côté de la lésion. En outre, la qualité de la reproduction s'améliore avec l'âge : des scores normaux sont atteints vers l'âge de 10 ans pour les deux groupes. Ainsi, les résultats de deux adolescents de 11 et 12 ans, K-LH (lésion focale unilatérale au niveau du lobe pariétal gauche) et M-RH (lésion focale unilatérale au niveau du lobe pariétal droit), présentent des performances similaires à celles d'adolescents sans lésion, laissant envisager la mise en place de phénomènes de compensation (figure 1.10).

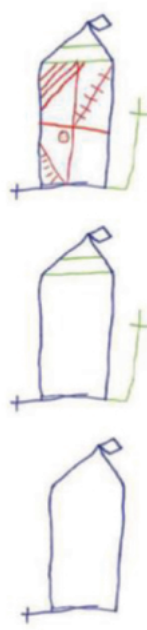
Figure de Rey



Copie de la figure de Rey



Reproduction de mémoire



Temps

Copie de la figure de Rey



Reproduction de mémoire



Temps

Figure 1.10 Copie et reproduction de mémoire de la figure de Rey-Osterrieth par deux adolescents victimes d'une lésion focale unilatérale gauche (K-LH) ou droite (M-RH; adapté de Stiles *et al.*, 2003). La couleur bleue indique les premiers tracés, la couleur verte les deuxièmes tracés, et la couleur rouge les derniers tracés (R: hémisphère droit, L: hémisphère gauche).

Cependant, même si la mise en place de mécanismes compensatoires permet aux sujets d'obtenir une copie de la figure finale comparable à celle produite par des enfants sans lésion, les stratégies utilisées chez les sujets lésés sont différentes. En effet, contrairement aux autres adolescents, K-HL et M-RH commencent leur copie par des éléments de la figure et non par le rectangle central. Lors de la reproduction de mémoire, K-HL débute par la forme d'ensemble, alors que M-RH commence par reproduire les détails. Ces résultats démontrent que les processus déficitaires de traitement global ou local par un hémisphère peuvent être compensés par l'hémisphère non lésé. Cependant, il faut préciser que ces phénomènes ne permettent pas à un enfant victime d'une lésion au sein d'un hémisphère de compenser totalement la fonction atteinte : des déficits persistent pour l'un ou l'autre des traitements selon le côté de la lésion.

Des données d'imagerie cérébrale fonctionnelle sont venues compléter ces résultats, et ont établi une spécialisation atypique pour K-HL et M-RH (Stiles *et al.*, 2003, 2005). Alors que le groupe contrôle présente une activation plus importante de la région occipito-temporale droite lors du traitement global et une activité plus importante de la région homologue gauche pour le traitement local, K-HL et M-RH activent préférentiellement la région occipito-temporale du côté de l'hémisphère non lésé pour les deux types de traitements (figure 1.11).

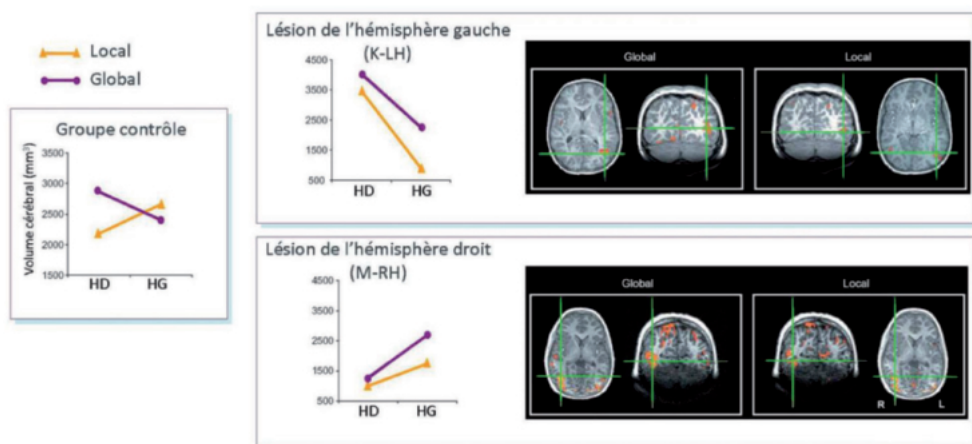


Figure 1.11 Données d'imagerie fonctionnelle des deux adolescents présentant soit une lésion focale unilatérale de l'hémisphère gauche, soit une lésion focale unilatérale de l'hémisphère droit (adapté de Stiles *et al.*, 2003). Les résultats montrent qu'en comparaison d'un groupe contrôle (à gauche) une spécialisation hémisphérique atypique est présente, révélant des mécanismes de plasticité cérébrale (HG : hémisphère gauche, HD : hémisphère droit).

Ce résultat démontre une spécialisation fonctionnelle différente pour ces deux adolescents cérébro-lésés, et prouve que les deux hémisphères cérébraux ne sont pas seulement capables de traiter les deux niveaux, mais peuvent aussi compenser les effets d'une lésion cérébrale. L'imagerie cérébrale fonctionnelle montre ici toute sa puissance et son intérêt : cette technique permet de déterminer la réorganisation fonctionnelle de cerveaux atteints de lésions focales, allant au-delà des résultats obtenus avec la seule approche neuropsychologique utilisant un « paradigme lésionnel » classique. Ainsi, l'imagerie cérébrale fonctionnelle permet non seulement de faire le lien entre le développement cognitif et le développement

neural, mais également d'aborder les phénomènes de plasticité cérébrale lors d'études neuropsychologiques. Dans l'ensemble, ces études lésionnelles révèlent que, même si des mécanismes compensatoires se mettent en place, une lésion de l'hémisphère droit affecte plus le traitement visuospatial qu'une lésion de l'hémisphère gauche : le traitement global – moins mature que le traitement local chez l'enfant – est en effet beaucoup plus perturbé lors d'une lésion cérébrale droite que ne l'est le traitement local après une lésion gauche.

Ces résultats laissent supposer que des changements structuraux principalement situés au sein de régions cérébrales droites (spécialisées pour le traitement global chez l'adulte) permettraient l'émergence de la préférence globale chez l'enfant avec l'âge. En revanche, la structure de l'hémisphère gauche maturerait et se spécialiserait très tôt pour le traitement local, ce qui expliquerait le biais attentionnel local (préférence locale) observé chez les tout-petits. Les résultats d'une étude d'imagerie cérébrale fonctionnelle chez l'enfant sain sont en accord avec cette hypothèse (Moses *et al.*, 2002). Dans cette recherche, deux groupes d'enfants de 7 à 14 ans ont été constitués d'après leur temps de réponse lors d'un paradigme global/local en héli-champ visuel : un groupe dit « mature latéralisé », qui regroupait les enfants présentant des résultats semblables à ceux des adultes, et un groupe dit « immature bilatéral », qui comprenait les autres enfants. L'analyse des activations d'une région d'intérêt centrée sur le cortex occipito-temporal latéral a révélé une activation plus importante lors du traitement local pour le groupe « immature bilatéral », quel que soit l'hémisphère cérébral (figure 1.12). En revanche, le groupe « mature latéralisé » présentait une spécialisation hémisphérique droite pour le traitement global et une spécialisation hémisphérique gauche pour le traitement local. Enfin, en accord avec ce qui a été évoqué précédemment, on constate une réorganisation totale des activations entre les deux groupes d'enfants au niveau de l'hémisphère droit, alors que les variations d'activation pour l'hémisphère gauche concernent principalement le traitement global.

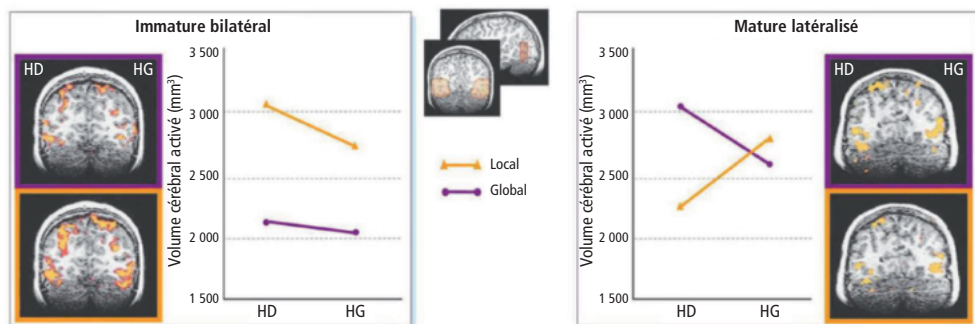


Figure 1.12 Résultats des acquisitions d'imagerie fonctionnelle de l'étude de Moses (adapté de Moses *et al.*, 2002). La région d'intérêt est indiquée au centre. Les cartes d'activation moyenne pour chaque groupe de participants sont représentées à côté des graphiques (HG : hémisphère gauche, HD : hémisphère droit).

Afin de déterminer quelles structures cérébrales accompagnent la construction de la préférence globale, une étude d'imagerie par résonance magnétique anatomique (IRMa) en « cerveau entier » (et non en région d'intérêt comme l'étude d'imagerie fonctionnelle précédemment décrite) a été menée, dans laquelle des résultats comportementaux et des résultats anatomiques d'enfants de 6 ans ont été mis en regard (Poirel *et al.*, 2011).

Les enfants devaient indiquer dans une tâche de choix forcé quelle figure hiérarchique ressemblait le plus à une figure témoin (l'un des choix correspondant à l'aspect local de la figure témoin, l'autre choix représentant sa forme globale ; figure 1.13). Deux groupes ont été constitués à partir des résultats : le premier groupe comportait des enfants qui fondaient leur jugement de ressemblance sur l'aspect local (précédence locale) ; le second groupe était constitué d'enfants répondant en faveur du principe de précédence globale. La volumétrie cérébrale de ces deux groupes d'enfants a ensuite été comparée. Il est important de noter ici que les deux groupes d'enfants étaient du même âge (moyenne de 6 ans, écart-type de 2 mois). Il a été découvert que la préférence exprimée au niveau comportemental s'accompagne anatomiquement d'une perte de substance grise dans plusieurs régions occipito-pariétales droites chez le groupe d'enfants en faveur de la préférence globale (figure 1.13). Cette diminution de la densité de la substance grise, appelée élagage synaptique (Changeux, 1983 ; Edelman, 1993), est très probablement le reflet d'une plasticité neuronale relayant le passage de la précédence locale à la précédence globale chez l'enfant autour de 6 ans.

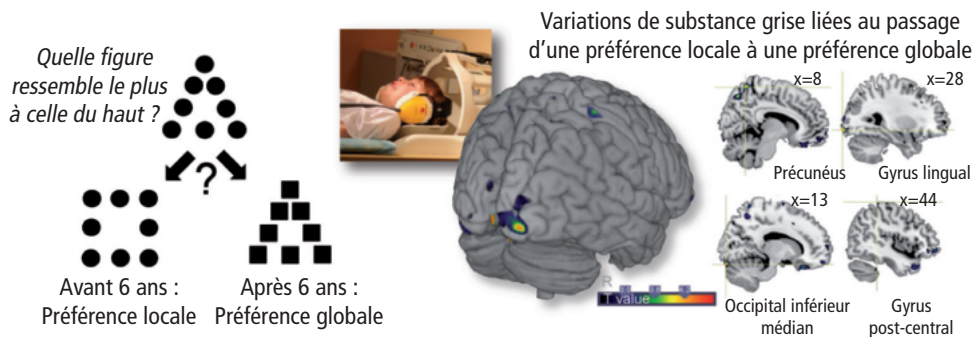


Figure 1.13 Tâche de choix forcé (à gauche), et résultats anatomiques de la mise en place de la préférence globale chez l'enfant (à droite) : l'évolution de la préférence visuelle s'accompagne d'une diminution de substance grise principalement au niveau de l'hémisphère droit (adapté de Poirel *et al.*, 2011).

Si nous détaillons le réseau impliqué dans ce passage, nous observons cette même diminution de la matière grise dans cinq régions de l'hémisphère droit, plus une région de l'hémisphère gauche, qui ont déjà été identifiées chez l'adulte comme le support du traitement global. Tout d'abord, elle est constatée dans le cortex occipital inférieur/médian droit qui est connu pour être plus activé dans des tâches attentionnelles globales que locales (Han *et al.*, 2002). Cette aire visuelle prédomine également durant le traitement de scènes naturelles filtrées en passe bas (convoyant les informations globales ; Peyrin *et al.*, 2004). Ensuite, nous trouvons une variation au sein du gyrus lingual droit, impliqué dans le traitement global, comme nous l'avons évoqué plus haut (Fink *et al.*, 1996). Les troisième et quatrième structures corticales concernées par cette diminution de matière grise pour le groupe global – précunéus et gyrus post-central – sont situées dans le cortex pariétal droit, impliqué dans les mécanismes attentionnels globaux (Peyrin *et al.*, 2004 ; Robertson, 1996 ; Robertson & Lamb, 1991). La diminution trouvée au niveau du précunéus peut refléter le changement attentionnel d'une précédence locale vers la précédence globale (Himmelbach *et al.*, 2009). La diminution conjointe de matière grise dans le gyrus post-central entraînerait quant à elle la disparition de ce que nous avons qualifié de « cécité globale ». On sait que cette structure permet de fournir une cohérence d'ensemble à une

Neurosciences cognitives développementales

Le champ de la psychologie s'est incroyablement étendu et diversifié depuis que les sciences cognitives ont fait leur apparition. Les nouvelles méthodes d'exploration mettent en évidence des mécanismes jusqu'à présent ignorés, levant le voile sur nombre de manifestations de la psychologie développementale.

Ce livre offre une explication claire et synthétique des connaissances actuelles. Son organisation selon les principales fonctions psychologiques rend sa lecture particulièrement simple. Il aborde :

- L'attention visuelle
- La mémoire
- Le langage oral
- L'apprentissage de la lecture
- Le nombre et l'arithmétique
- La prise de décision
- Le sommeil et les apprentissages
- La créativité

Pour chaque fonction, les auteurs précisent les sous-basements neurologiques, les troubles liés, les bilans et remédiations dédiés aux troubles.

Ania Aïte, maître de conférences en Psychologie du développement, université de Paris, laboratoire de Psychologie du développement et de l'éducation de l'enfant (UMR CNRS 8240, LaPsyDÉ), Paris

Sabrina Bouhassoun, psychologue spécialisée en neuro-psychologie, université de Paris, laboratoire de Psychologie du développement et de l'éducation de l'enfant (UMR CNRS 8240, LaPsyDÉ), Paris, GIP Cyceron, Caen

Anaëlle Camarda, chercheure pour la chaire TMCI, Centre de gestion scientifique (CGS), i3, UMR CNRS 9217, Mines ParisTech – PSL, Paris

Mathieu Cassotti, professeur de Psychologie du développement, université de Paris, laboratoire de Psychologie du développement et de l'éducation de l'enfant (UMR CNRS 8240, LaPsyDÉ), Paris

Estelle Gillet Perret, orthophoniste, CHU Grenoble-Alpes, Centre de référence des troubles du langage et des apprentissages (CRTL A)

Bérengère Guillery-Girard, maître de conférences en Neuropsychologie EPHE, laboratoire de Neuropsychologie et imagerie de la mémoire humaine (NIMH), Normandie Univ, UNICAEN, PSL université Paris, EPHE, INSERM, U1077, CHU de Caen, GIP Cyceron, Caen

Karine Lebreton, maître de conférences en Neuropsychologie, université de Caen Normandie, laboratoire de Neuropsychologie et

imagerie de la mémoire humaine (NIMH), Normandie Univ, UNICAEN, PSL université Paris, EPHE, INSERM, U1077, CHU de Caen, GIP Cyceron, Caen

Stéphanie Mazza, université de Lyon, laboratoire HESPER, EA7425, Lyon

Marcela Perrone-Bertolotti, maître de conférences en Psychologie, laboratoire de Psychologie et NeuroCognition (UMR CNRS 5105), université Grenoble-Alpes ; Institut universitaire de France

Nicolas Poirel, professeur de Psychologie du développement, université de Paris, laboratoire de Psychologie du développement et de l'éducation de l'enfant (UMR CNRS 8240, LaPsyDÉ), Paris, GIP Cyceron, Caen

Géraldine Rauchs, université de Caen-Normandie, UNICAEN, PSL Université, EPHE, INSERM, U1077, CHU de Caen, GIP Cyceron, Neuropsychologie et imagerie de la mémoire humaine, Caen

Sylviane Valdois, DR CNRS, laboratoire de Psychologie et NeuroCognition (UMR 5105), université Grenoble-Alpes

Arnaud Viarouge, maître de conférences en Psychologie du développement, université de Paris, laboratoire de Psychologie du développement et de l'éducation de l'enfant (UMR CNRS 8240, LaPsyDÉ), Paris

ISBN : 978-2-8073-2747-4



deboeck
SUPÉRIEUR

www.deboecksuperieur.com