

Dyscalculie Développementale : L'Approche « Neurocognitive »

Résumé

Dans cet article je décris les grandes lignes de l'approche « neurocognitive » de la dyscalculie développementale. Cette approche se différencie de l'approche piagétienne traditionnelle (basée sur l'idée que la logique est la fondation de la compréhension du nombre), et s'appuie sur des travaux récents qui suggèrent que notre « sens du nombre » est fondé sur une représentation approximative et non verbale du nombre, localisée dans le sillon intra pariétal. Les premières données suggèrent effectivement qu'un mauvais fonctionnement de cette région pourrait être une des causes de la dyscalculie. L'approche « neurocognitive » de la dyscalculie tire profit de ces données pour proposer des nouveaux types d'évaluations et rééducations de ce trouble de l'apprentissage.

Mots clefs

Calcul,
Cognition numérique,
développement,
dyscalculie,
mathématiques,
nombres,
rééducation,
remédiation.

Dyscalculie Développementale : L'Approche « Neurocognitive »

ANNA J. WILSON



Email : ajwilsonkiwi@yahoo.fr

Adresse : INSERM U562,
SHFJ/CEA, 91401 Orsay, FRANCE

Nationalité : Néo-Zélandaise.

Diplômes

B. Sc. (Psychology) Université
d'Auckland 1996.

M. S. (Psychology) Université
d'Oregon 1998.

Ph. D. (Psychology) Université
d'Oregon 2003.

Situation actuelle

Post-doctorante en l'unité INSERM
562, sous supervision of Stanislas
Dehaene. Mène projet de développer
et tester logiciel de rééducation de
la dyscalculie.

Introduction

Cet article a pour but de donner
au lecteur non-spécialiste les
grandes lignes de l'approche
«neurocognitive» de la dyscal-
culie¹ ; depuis sa conceptualisa-
tion, jusqu'à son utilisation en
rééducation. L'approche « tradi-
tionnelle » de la rééducation de

1) La dyscalculie existe en fait sous deux formes : une forme développementale, et une forme acquise (due à des lésions cérébrales chez l'adulte). Je m'intéresse ici à la première.

Intérêts scientifiques

Causes, étiologie and rééducation de la dyscalculie. Cognition numérique. Attention et mémoire spatiale. L'application de la recherche en sciences cognitives à l'éducation.

Publications principales

Wilson, A. J., Dehaene, S, Revkin, S. K., Cohen, L. & Cohen, D. (submitted Behavioral and Brain Functions). Development of Adaptive Remediation Software for Dyscalculia.

Wilson, A. J. & Dehaene, S. (in press). Number sense and developmental dyscalculia. Coch, D., Fischer, K, & Dawson, G. (Eds). Human Behavior and the Developing Brain (2nd Edn).

Molko, N., Wilson, A., & Dehaene, S. (2005). La dyscalculie développementale, un trouble primaire de la perception des nombres. Médecine et Enfance, 1-6.

Dehaene, S., Molko, N., Cohen, L. & Wilson, A. J. (2004). Arithmetic and the brain. Current Opinion in Neurobiology, 14, 218-224.

Molko, N., Wilson, A. J. & Dehaene, S. (2004). Dyscalculie, le sens perdu des nombres. La Recherche, 379, 42-47.

Logiciels

Wilson, A. J. & Dehaene, S. (2005). The Number Race. Remediation software for Dyscalculia. Multiplatform, for children aged 3-10. (Java).

la dyscalculie ainsi que des recherches récentes concernant la cognition numérique seront également abordées.

La Dyscalculie : Une définition théorique

Pour donner une définition rapide et accessible de la dyscalculie, on pourrait dire que la dyscalculie est aux mathématiques ce que la dyslexie est à la lecture. En psychologie clinique, tout comme la dyslexie, la dyscalculie développementale est définie comme un trouble disproportionné de l'apprentissage de l'arithmétique chez l'enfant, qui ne peut pas être expliqué par un environnement d'apprentissage appauvri, ni par un niveau intellectuel inférieur (American Psychiatric Association, 1994). Dès l'introduction de ce terme en 1974 par Kosc, la dyscalculie est conçue sur une base neurologique. Néanmoins, contrairement à la dyslexie, dont les liens neurologiques sont de plus en plus établis (Habib, 2000), l'investigation des bases neurologiques de la dyscalculie demeure balbutiante. Cependant, cette recherche est dès à présent très prometteuse.

La réalité : des approches variées

Si cette définition de la dyscalculie semble claire, il faut avertir le lecteur que la conception et la rééducation de la dyscalculie sont en réalité moins nettes, et différentes à travers les pays. Pour prendre quelques exemples de différences géographiques, aux États-Unis, le terme dyscalculie n'est guère utilisé. À sa place on utilise fréquemment l'expression « mathematical learning disabilities » dont la définition est quasiment identique à la définition neurologique de la dyscalculie, mais qui s'en distingue par son identification, qui repose sur des tests standardisés au spectre très large (ex. le « Woodcock-Johnson »). Ces tests ne permettent pas d'effectuer une distinction claire entre une « véritable dyscalculie » et des difficultés résultant d'autres causes (par exemple dues à l'enseignement). En Angleterre, un système similaire a été utilisé mais commence maintenant à être remplacé par une approche plus ciblée et basée sur de la recherche récente, avec l'introduction au niveau national d'un outil de détection (« dyscalculia screener ») développé par le cher-

Présentations récentes

Wilson, A. J., Revkin, S. K., Dehaene, S., Cohen, L., & Cohen, D. (July 2005). The number race : Remediation of dyscalculia using an adaptive game. Poster presented at NUMBRA Summer School, Erice, Italy.

Wilson, A. J., Dehaene, S., Cohen, L., & Cohen, D. (Apr 2005). Investigating the developmental plasticity of numerical cognition using an adaptive game remediation program. Poster presented at Annual Meeting of the Cognitive Neuroscience Society, New York.

Wilson, A. J., Dehaene, S., Cohen, L., & Cohen, D. (2004). Dyscalculia : Tools for Identification and Development of a Remediation Tool. Talk presented at workshop on computer supported assessment and training, Jyväskylä, Finland.

Wilson, A. J. (2003). Remediation Software for Developmental Dyscalculia. OECD Brain Research and Learning Sciences Mini-Symposium on the Development of Software for Dyscalculia, Paris.



cheur Brian Butterworth, expert mondialement reconnu de la dyscalculie (Butterworth, 2003). En France, la situation est plus compliquée, puisque le champ des troubles d'apprentissage reste toujours dominé par la théorie Piagétienne, qui possède sa propre définition de la dyscalculie. Traditionnellement, l'identification d'une dyscalculie est fondé sur les bases théorétiques piagésiennes, selon lesquelles la dyscalculie est considérée comme le résultat d'une mauvaise construction du concept du nombre, du développement des opérations logiques et de leur combinaisons (Grégoire, 2001 ; Meljac, 2001).

Cette approche a bien sûr une influence sur le diagnostic et la prise en charge rééducative de la dyscalculie. L'outil de UDN-II (Meljac & Lemmel, 1999), le plus utilisé, est basé sur le modèle Piagésien, et comporte des sous-tests classiques qui concernent davantage les opérations logiques que les opérations arithmétiques (classification, sériation, conservation, etc.). Il faut remarquer que la plupart de ces tests reposent sur un traitement verbal. Un des principaux organismes d'enseignement des principes de rééducation « logico-mathématique » est le GEPALM, dont la perspective est également Piagésienne (Meljac, 2001).

Le but principal de ce papier n'est pas de débattre en profondeur de la théorie Piagésienne dans le domaine du nombre, ce qui a été déjà fait par d'autres auteurs. Cependant, une discussion brève est utile pour souligner le contexte de l'approche neurocognitive.

Le modèle Piagésien en question

Dans les derniers vingt-cinq ans, le modèle Piagésien a été remis en cause par la mise en évidence de capacités numériques chez les animaux et chez les nourrissons. Utilisant des méthodologies non verbales, de nombreux travaux ont maintenant montré que non seulement animaux et nourrissons sont capables de représenter le nombre de manière approximative, mais que cette capacité met en jeu des structures cérébrales similaires entre espèces. De plus, des expériences sur la cognition numérique de l'adulte ont mis en évidence le rôle importante des processus non verbaux, et ont mon-

tré que la logique n'était pas l'aspect primordial de la représentation numérique.

Outre le défi qu'elles posent à la théorie Piagétienne, les nouvelles découvertes ont servi de bases à de nouveaux modèles de la cognition numérique (ex. Butterworth, 1999 ; Dehaene, 1992), et forment aujourd'hui les fondations de l'approche « neurocognitive » de la dyscalculie (Pour des revues récentes voir Ansari & Karmiloff-Smith, 2002 ; Dehaene, Molko, Cohen, & Wilson, 2004 ; Dehaene, Molko, & Wilson, 2004 ; Feigenson, Dehaene, & Spelke, 2004).

Des compétences non verbales

Nous savons maintenant que même les animaux, contrairement à ce que pensaient les behavioristes au milieu du siècle dernier, sont capables de représenter et manipuler les nombres, mais seulement de manière approximative (voir Gallistel & Gelman, 2000 pour un compte-rendu).

Les mêmes capacités semblent être présentes chez les humains dès les premiers jours de la vie. Des expériences d'habituation², qui permettent d'étudier la cognition sans recours au langage chez le bébé ou le jeune enfant, ont montré que dans leur première année de vie, les bébés peuvent représenter les petites et les grandes numérosités (Starkey & Cooper, 1980 ; Wynn, 1992 ; Xu & Spelke, 2000)³. Les bébés peuvent aussi faire des opérations approximatives (additions, soustractions), et ces capacités continuent à être présentes chez les adultes humains, (Barth, Kanwisher & Spelke, 2003).

Comment sait-on que cette représentation est approximative et non verbale ? Chez les animaux et les enfants on observe que leur réussite dans ces tâches dépend du ratio de la différence entre les deux numérosités par rapport à leur taille (un paramètre appelé fraction de weber). Le plus petit ratio susceptible d'être discriminé s'améliore pendant le développement (Huntley-Fenner, 2001). L'aspect non verbal de ces capacités est bien sûr évident chez les bébés, qui n'ont pas acquis le langage, et chez les animaux. Il a aussi été montré élégamment par une étude récente (Pica,

Lemer, Izard, & Dehaene, 2004) sur un peuple d'Amazonie (les Mundurucus), qui ont un vocabulaire numérique très limité. La langue Mundurucu n'a aucun mot exact pour les numérosités au delà de cinq. Pourtant, ces personnes sont capables de comparer des grandes quantités avec les mêmes performances que les sujets français. Ils peuvent également additionner et soustraire de façon approximative.

Quelles sont les conséquences de tout ceci pour la dyscalculie ? Maintenant que nous connaissons l'existence de ce « sens du nombre » non verbal, est-il possible qu'il fonctionne mal ou se développe mal ? Est-ce que ceci pourrait être une cause de la dyscalculie ? Et si oui, quelles en seraient les conséquences pour les évaluations et rééducations qu'on devrait utiliser en clinique ?

Nous retournerons à ces questions plus tard, mais d'abord discutons quelques données qui suggèrent que ces hypothèses pourraient être correctes...

Fondations neurologiques du sens du nombre

Ce « sens du nombre » est-t-il associé à des circuits corticaux spécifiques ? Nous pouvons maintenant dire avec assez de confiance que « oui ». De nombreuses étu-

2) Dans ces expériences on mesure le temps de regard pendant qu'on présente une série de stimuli d'« habituation » de la même numérosité. Ce temps diminue puisque l'enfant commence à s'ennuyer, mais dès l'apparition d'un nouveau stimulus (de numérosité suffisamment différente), il réaugmente de façon significative.

3) Les premières expériences ont été critiquées pour leur manque de contrôles des paramètres non numériques dans les stimuli, mais le développement de plusieurs méthodes de contrôle de ces paramètres rend difficile une explication de tous les résultats par autre chose que la numérosité. En plus, des investigations récentes ont montré la source d'une partie de la controverse : Les enfants sont non seulement capables de représenter la numérosité de façon approximative, mais ils sont aussi capables de représenter des numérosités de 1-3 de façon exacte par un système visuo-spatial servant au suivi des objets (Feigenson et al., 2004 ; Xu, 2003). Le conflit entre les deux systèmes peut amener les enfants à négliger la numérosité comme critère de sélection lorsque des petits nombres sont présentés.

des en imagerie cérébrale ont montré le rôle d'une partie du cortex pariétal, le sillon intra pariétal, qui est actif dans les tâches qui font appel à cette représentation approximative. (voir Dehaene et al., 2004, ou Dehaene, Piazza, Pinel et Cohen, 2003.) Ces tâches incluent des comparaisons de chiffres, des estimations de numérosité, des soustractions, et des additions approximatives⁴. Son activation est modulée par des facteurs qui sont liés au sens du nombre, tels que la taille des nombres ou la distance entre les nombres à comparer, et elle joue un rôle dans la représentation des quantités numériques quelle que soit la notation et la modalité dans lesquelles les nombres sont présentés.

Premiers liens avec la dyscalculie

Est-il possible que cette région du cerveau soit altérée chez les dyscalculiques ? Chez l'adulte, cette région est effectivement fréquemment affectée lors d'accidents vasculaires qui conduisent à une dyscalculie acquise (Butterworth, 1999 ; Dehaene, Dehaene-Lambertz, & Cohen, 1998). Pour la dyscalculie développementale nous avons besoin de plus de données pour répondre à cette question, mais les premières, qui viennent de populations pédiatriques particulières, suggèrent que c'est peut-être le cas. Isaacs, Edmonds, Lucas et Gadian (2001) ont en effet étudié un groupe d'adolescents nés prématurément, et ont observé que ceux qui avaient une dyscalculie avaient aussi une diminution de la matière grise dans le sillon intra pariétal. Dans une étude avec des adultes ayant un syndrome Turner (associé à une dyscalculie), Molko et al. (2003) ont aussi trouvé des anomalies structurales et fonctionnelles dans le sillon intra pariétal.

Quelles implications pour l'évaluation de la dyscalculie ?

Il reste encore du travail pour établir un lien causal entre la représentation approximative des nombres localisée dans le sillon intra pariétal et la dyscalculie. Mais nous avons déjà assez d'informations pour envisager une modification des stratégies d'évaluation et de rééducation.

Ces nouvelles connaissances mettent en question le lien évoqué par la théorie Piagétienne entre représentation du nombre et capacités de langage et de logique. Personne ne prétend qu'une déficience générale du raisonnement logique n'entraînerait pas des troubles secondaires du calcul. Mais elle devrait entraîner également d'autres troubles plus généraux. La question de savoir si les troubles de calcul dans ce contexte doivent être appelés « dyscalculie » est à débattre, et dépend peut-être de l'importance des autres troubles ; mais nous devrions au moins lui assigner un sous-type de dyscalculie sans supposer que tout enfant ayant des troubles de calcul a forcément un problème dans la pensée logique.

Nous devrions également définir un sous-type de dyscalculie lié au sens du nombre. On pourrait proposer que si un tel déficit existait, les psychologues l'auraient déjà décrit. Néanmoins, les évaluations piagésiennes sont verbales et n'incluent guère de tests qui s'appuient sur le sens du nombre, comme par exemple la comparaison des grandeurs, l'estimation de grandeur ou des tests non symboliques tels que la comparaison de nuages de points. Ainsi les « symptômes » que nous attendrions à voir avec une dyscalculie de ce type ne sont pas toujours détectés.

C'est pourquoi je suggère de combiner systématiquement dans les évaluations des enfants présentant des troubles du calcul, des tests piagésiens comme le UDN-II et des tests testant les représentations numériques non verbales, comme le TEDIMATH (Van Nieuwenhoven, Grégoire, & Noël, 2001). Ce dernier inclut l'estimation des grandeurs, et la comparaison de grandeurs sous forme symbolique et non symbolique.

4) Il faut souligner que cette région n'est pas la seule région utilisée dans ces tâches, il est fréquemment le cas que d'autres régions liées à la représentation verbale des nombres sont actives. Ainsi il semble qu'il y a peu de tâches symboliques qui sont purement non verbales, mais il y a des tâches qui s'appuient plus sur la représentation approximative que d'autres. Il se peut que certaines tâches non symboliques, qui commencent à être explorées, produiront une mesure plus « pure » de la représentation approximative (Piazza et al., 2004).

Il serait nécessaire dans le futur d'introduire des évaluations informatisées, qui permettront la mesure du temps de réaction. Dans les processus élémentaires en mathématiques, la vitesse est très importante, parce qu'elle détermine la quantité de ressources mentales qui restent pour comprendre ou résoudre un problème, ou maintenir une liste des étapes à exécuter. Ainsi un ralentissement dans un processus élémentaire peut entraîner des déficits lors de processus plus compliqués, par effet « domino ». Nous avons déjà quelques indications que des déficits de ces processus élémentaires peuvent être mesuré par cette méthode chez les dyscalculiques. La mesure des temps de réaction a ainsi permis de mettre en évidence que des sujets atteints d'un syndrome de Turner, bien qu'ayant des performances normales, sont plus lents que les sujets contrôles (Molko et al., 2003). Une autre étude récente (Landerl, Bevan, & Butterworth, 2004) a montré que les enfants dyscalculiques sont plus lents dans des tâches de comparaison de grandeur, dans les opérations de calcul, et dans le comptage.

Avec le soutien de la Fondation Fyssen, nous avons développé et piloté une batterie informatisée permettant d'obtenir un profil des compétences basiques de l'enfant testé. Cette batterie inclut des tâches non symboliques, et des mesures de temps de réaction. Actuellement la batterie est conçue pour la recherche, mais nous travaillons avec des collaborateurs pour en établir une version étalonnée qui permette son utilisation en clinique par des orthophonistes et des neurologues.

Rééducation basée sur l'approche neurocognitive : un exemple

Comment peut-on rééduquer une dyscalculie qui serait secondaire à un sens du nombre déficient ? Tel est le projet sur lequel j'ai travaillé avec le soutien de la fondation Fyssen. Notre équipe (Anna Wilson, Stanislas Dehaene, Laurent Cohen et David Cohen) a développé un logiciel de rééducation, « La Course aux Nombres ». La conception du logiciel est inspirée de logiciels similaires qui ont été employés dans le cadre de la dyslexie et des troubles du langage. (Merzenich

et al., 1996 ; Tallal et al., 1996 ; Temple et al., 2003). Ces logiciels, basés sur des entraînements très basiques (par exemple la distinction entre des phonèmes) produisent non seulement une amélioration dans la lecture, mais aussi des changements dans les activations cérébrales liées à la lecture (Temple et al., 2003).

Comme ces programmes, le notre est un « jeu adaptatif », c'est-à-dire un exercice sous forme de jeu, qui entraîne des enfants avec des tâches répétitives mais présentées dans un cadre ludique et gratifiant. La figure 1a montre un exemple des écrans du programme : l'enfant apprend à choisir le plus grand de deux nombres, une opération qui fait appel au sens des

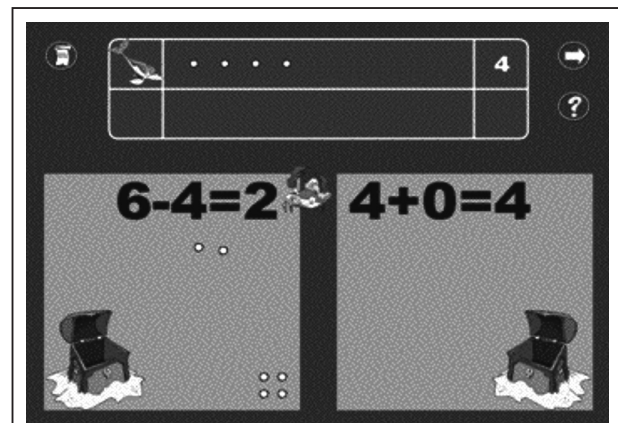


Figure a

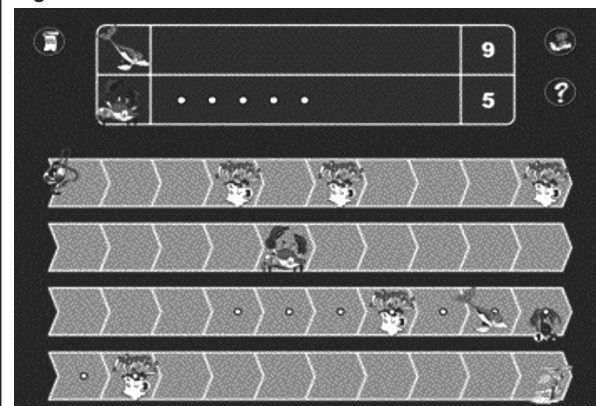


Figure b

Figure 1 : Le logiciel « La Course Aux Nombres », conçue et développé par Anna Wilson et Stanislas Dehaene pour la rééducation de la dyscalculie.

quantités. L'enfant effectue plusieurs centaines de choix, dont la difficulté est croissante et ajustée en permanence en fonction du taux de réussite. L'exemple présenté ici montre un essai particulièrement difficile, où l'enfant doit choisir entre deux opérations présentées en chiffres arabes, $4 + 3$ et $8 - 6$. Immédiatement après son choix, l'enfant voit chaque opération se réaliser avec des pièces d'or. Il peut donc constater *de visu* ce que signifient ces opérations, et à quelle quantité elles correspondent. Dans une seconde étape, l'enfant utilise ses gains pour déplacer son personnage sur un plateau, en tentant d'éviter les pièges et de battre un ennemi piloté par l'ordinateur. Cette étape de déplacement donne un sens concret aux nombres choisis dans l'étape de comparaison, et renforce encore les liens entre les nombres cardinaux, les nombres ordinaux, et l'espace de la « ligne numérique ».

Ce programme est développé dans le cadre d'un projet international de l'OCDE, qui vise à mettre des outils informatiques de rééducation sur internet pour une distribution gratuite partout dans le monde.

La première étude visant à tester ce logiciel a été réalisée pendant l'année scolaire 2004-2005. Neuf enfants dyscalculiques ont participé en travaillant avec le logiciel de rééducation pendant une demi-heure chaque jour pendant cinq semaines. Les enfants étaient testés avant et après leur rééducation en utilisant la batterie décrite ci-dessus. Les résultats obtenus sont très encourageants ; les enfants ont amélioré leurs performances dans des tâches numériques de base tels que le subitisation (évaluation rapide des

petits nombres), la comparaison de chiffres et de nuages de points, et la soustraction.

Conclusion

Le programme décrit ci-dessus n'est qu'un exemple des possibilités de rééducation du sens du nombre. Il reste à prouver son efficacité en faisant une seconde étude avec un groupe contrôle. S'il s'avère efficace, il serait alors possible, de façon préventive, de proposer un tel programme chez de jeunes enfants pour développer leur sens du nombre et éviter ainsi des troubles de calcul à l'école. Cette action préventive permettrait également d'éviter l'effet « domino ».

Actuellement, les enfants dyscalculiques sont identifiés en France très tard, normalement après l'âge de 10 ans. Les rééducations proposées ne sont pas homogènes (Meljac, 2001), et n'ont pas nécessairement été évaluées. Cette situation, (qui n'est pas si différente de ce qui se passe dans la plupart des autres pays), peut et devrait être améliorée. Il n'est pas sûr que l'approche neurocognitive soit la seule solution. Néanmoins, avec l'augmentation de nos connaissances sur les bases cérébrales de la représentation du nombre, il est nécessaire que les évaluations et rééducations de la dyscalculie tiennent compte de ces nouvelles données.

Remerciements

L'auteur était soutenu d'une bourse de la fondation Fyssen pendant l'année 2003-2004. Merci à Ghislaine Dehaene, Lionel Naccache et Stanislas Dehaene pour leurs commentaires et corrigés.

BIBLIOGRAPHIE

- AMERICAN PSYCHIATRIC ASSOCIATION. (1994). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders DSM-IV* : American Psychiatric Pub.
- ANSARI, D., & KARMILOFF-SMITH, A. (2002). Atypical trajectories of number development : A neuroconstructivist perspective. *Trends in Cognitive Sciences*, 6 (12), 511-516.
- BARTH, H., KANWISHER, N., & SPELKE, E. (2003). The construction of large number representations in adults. *Cognition*, 86 (3), 201-221.
- BUTTERWORTH, B. (1999). *The Mathematical Brain*. London : Macmillan.
- BUTTERWORTH, B. (2003). *Dyscalculia Screener*. London : nferNelson.
- DEHAENE, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44 (1-2), 1-42.
- DEHAENE, S. (1997). *La Bosse des Maths*. Paris : Éditions Odile Jacob.
- DEHAENE, S., DEHAENE-LAMBERTZ, G., & COHEN, L. (1998). Abstract representations of numbers in the animal and human brain. *Trends in Neurosciences*, 21 (8), 355-361.
- DEHAENE, S., MOLKO, N., COHEN, L., & WILSON, A. J. (2004). Arithmetic and the brain. *Current Opinion in Neurobiology*, 14, 1-7.
- DEHAENE, S., MOLKO, N., & WILSON, A. J. (2004). Dyscalculie : Le sens perdu des nombres. *La Recherche*, 379, 42-47.
- DEHAENE, S., PIAZZA, M., PINEL, P., & COHEN, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology* (20), 487-506.
- FEIGENSON, L., DEHAENE, S., & SPELKE, E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*, 8 (7), 307-314.
- GALLISTEL, C. R., & GELMAN, R. (2000). Non-verbal numerical cognition : from reals to integers. *Trends in Cognitive Sciences*, 4 (2), 59-65.
- GRÉGOIRE, J. (2001). Evaluer les troubles du calcul. In A. Van Hout & C. Meljac (Eds.), *Troubles du calcul et dyscalculies chez l'enfant*. Paris : Masson.
- HABIB, M. (2000). The neurological basis of developmental dyslexia : An overview and working hypothesis. *Brain*, 123 (12), 2373-2399.
- HUNTLEY-FENNER, G. (2001). Children's understanding of number is similar to adults' and rats' : numerical estimation by 5-7-year-olds. *Cognition*, 78 (3), B27-B40.
- ISAACS, E. B., EDMONDS, C. J., LUCAS, A., & GADIAN, D. G. (2001). Calculation difficulties in children of very low birthweight : a neural correlate. *Brain*, 124 (9), 1701-1707.
- KOSC, L. (1974). Developmental Dyscalculia. *Journal of Learning Disabilities*, 7 (3), 164-177.
- LANDERL, K., BEVAN, A., & BUTTERWORTH, B. (2004). Developmental dyscalculia and basic numerical capacities : a study of 8-9-year-old students. *Cognition*, 93(2), 99-125.
- MELJAC, C. (2001). Le diagnostic, et après ? Remédiations et prises en charge. In A. Van Hout & C. Meljac (Eds.), *Troubles du calcul et dyscalculies chez l'enfant*. Paris : Masson.
- MELJAC, C., & LEMMEL, G. (1999). *Batterie UDN 2 : Manuel d'utilisation et matériel*. Paris : ECPA.

MERZENICH, M. M., JENKINS, W. M., JOHNSTON, P., SCHREINER, C., MILLER, S. L., & TALLAL, P. (1996). Temporal Processing Deficits of Language-Learning Impaired Children Ameliorated by Training. *Science*, 271 (5245), 77-81.

MOLKO, N., CACHIA, A., RIVIERE, D., MANGIN, J. F., BRUANDET, M., LE BIHAN, D., COHEN, L., & DEHAENE, S. (2003). Functional and structural alterations of the intraparietal sulcus in a developmental dyscalculia of genetic origin. *Neuron*, 40 (4), 847-858.

PICA, P., LEMER, C., IZARD, V., & DEHAENE, S. (2004). Exact and approximate arithmetic in an Amazonian indigene group. *Science*, 306, 499-503.

STARKEY, P., & COOPER, R. G. (1980). Perception of numbers by human infants. *Science*, 210, 1033-1035.

TALLAL, P., MILLER, S. L., BEDI, G., BYMA, G., WANG, X., NAGARAJAN, S. S., SCHREINER, C., JENKINS, W. M., & MERZENICH, M. M. (1996). Language comprehension in language-learning impaired children improved with acoustically modified speech. *Science*, 271 (5245), 81-84.

TEMPLE, E., DEUTSCH, G. K., POLDRACK, R. A., MILLER, S. L., TALLAL, P., MERZENICH, M. M., & GABRIELI, J. D. (2003). Neural deficits in children with dyslexia ameliorated by behavioral remediation : evidence from functional MRI. *Proc Natl Acad Sci USA*, 100 (5), 2860-2865.

VAN NIEUWENHOVEN, C., GRÉGOIRE, J., & NOËL, M.-P. (2001). TEDI-MATH : Test Diagnostique des Compétences de Base en Mathématiques. Paris, France : Les Éditions du Centre de Psychologie Appliquée.

WYNN, K. (1992). Addition and subtraction by human infants. *Nature*, 358, 749-750.

XU, F. (2003). Numerosity discrimination in infants : Evidence for two systems of representations. *Cognition*, 89 (1), B15-B25.

XU, F., & SPELKE, E. S. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition*, 74 (1), B1-B11.