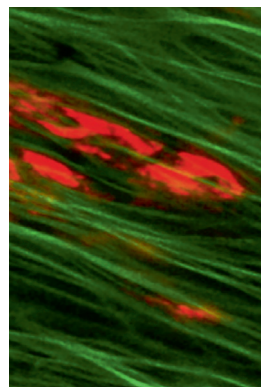


► Deux fonctions visuo-motrices jouent un rôle important dans le développement des compétences numériques : (1) le comptage sur les doigts ; (2) l'utilisation d'une ligne numérique mentale visuo-spatiale. Dans cet article, nous examinerons le rôle que joue la vision dans le développement des interactions entre doigts et nombres d'une part, entre espace et nombres d'autre part. De manière à aborder cette question, nous détaillerons des expériences menées auprès de participants voyants et non-voyants. Nous examinerons premièrement les connexions entre les nombres et les mouvements des doigts chez des enfants et des adultes non-voyants. Nous examinerons ensuite l'influence de la vision développementale sur la nature du cadre de référence spatial dans lequel les interactions entre nombres et espace se produisent. ◀

Cognition numérique : que peuvent nous apprendre les personnes non-voyantes ?

Virginie Crollen¹⁻², Olivier Collignon²⁻¹



¹ Centre for Mind/Brain Science, university of Trento, Via delle Regole 101, 38060 Mattarello, Italie ;

² Institut de Recherches en Sciences Psychologiques (IPSY), institut de Neurosciences (IoNS), université catholique de Louvain, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique.

virginie.crollen@uclouvain.be

La cognition numérique des enfants et des adultes non-voyants permet non seulement des avancées conceptuelles mais pourrait également éclairer les pratiques éducatives et les techniques de prise en charge des difficultés mathématiques.

Interactions entre le traitement du nombre et l'utilisation du comptage sur les doigts

Chez les voyants

Différentes études ont rapporté l'existence d'une interaction entre le traitement des nombres et la représentation des doigts de la main. Des études développementales et cross-culturelles¹ montrent que le comptage sur les doigts représente une stratégie basique d'apprentissage des nombres [1]. Les doigts permettent, en effet, de représenter les nombres dans le monde physique [2]. Par conséquent, beaucoup d'enfants les utilisent pour assimiler la suite des mots *nombres* (le comptage) et réaliser certaines opérations arithmétiques de base comme les additions [3, 4]. Plus particulièrement, il a été démontré que les doigts aidaient les enfants à : (1) se représenter les nombres de manière iconique [4] ; (2) garder la trace de ce qui a été compté/calculé [3, 5] ; (3) comprendre le système numérique en base 10 ; (4) assimiler le principe de la correspondance terme-à-terme (chaque item doit être énuméré une seule fois) [6] ; et (5) assimiler le principe de l'ordre stable (les labels numériques doivent être énumérés dans un ordre spécifique) [7, 8].

La vision joue un rôle fondamental dans le traitement des informations environnementales chez la personne voyante en permettant une analyse extrêmement précise de l'espace et des objets qui l'entourent. Depuis fort longtemps, les conséquences de la perte de la vision et les interrogations quant aux mécanismes pouvant pallier l'absence de celle-ci alimentent les débats et passionnent les chercheurs. Qu'arrive-t-il lorsque la vision n'est plus disponible et que nous devons modifier notre utilisation des autres modalités sensorielles afin d'en compenser la perte ? Quelles sont les incidences cognitives réelles de la cécité ? Telle est la question à laquelle nous allons essayer de répondre dans cette revue. Nous étudierons plus particulièrement la façon dont la privation visuelle influence la représentation que nous avons des nombres. Centré sur le développement et la compréhension du système numérique, cet article n'aborde pas tous les aspects de la cognition. Cependant, nous pensons qu'il peut être utile aux cliniciens et aux chercheurs en sciences cognitives. Étudier

Vignette (Photo © Inserm – Christophe Baudouin).

¹ Les études cross-culturelles, apparues dans les années 2000, consistent à interroger simultanément des habitants de plusieurs pays et de cultures différentes.

En accord avec toutes ces observations, il a été démontré que les gnosies digitales (c'est-à-dire la capacité à reconnaître, sans regarder, quel doigt a été touché par l'expérimentateur) pouvaient prédire les performances arithmétiques futures des enfants : les enfants avec de faibles gnosies digitales sont en effet moins performants dans les tâches arithmétiques que les enfants présentant de bonnes performances dans les tâches de gnosies digitales [9]. Par ailleurs, les interactions entre doigts et nombres sont tellement présentes durant l'enfance qu'elles semblent influencer la manière dont les humains se représentent et traitent les nombres plus tard, à l'âge adulte. Au niveau comportemental, un individu identifiera les nombres arabes allant de 1 à 10 plus rapidement et de manière plus précise lorsque le doigt utilisé pour presser le bouton réponse correspond à l'association doigt-nombre qu'il utilise de manière prototypique [10]. De plus, le comptage oral et l'arithmétique peuvent être perturbés par la réalisation de mouvements passifs (mouvements des mains du sujet réalisés par l'expérimentateur et non conformes aux procédures de comptage sur les doigts) [11] et actifs [12] des mains. Au niveau neuronal, des études en IRMf (imagerie par résonance magnétique fonctionnelle) ont prouvé que les mouvements digitaux et le traitement numérique activaient une même région cérébrale : le gyrus angulaire² [13]. La présence d'une lésion naturelle (par exemple dans le syndrome de Gerstmann³) [14] ou transitoire (suite à une stimulation magnétique transcrânienne en rTMS, *repetitive transcranial magnetic stimulation*) [15] de cette région provoque par conséquent une association fréquente de 2 symptômes : l'agnosie digitale et la dyscalculie. Enfin, une étude de stimulation magnétique transcrânienne a démontré que la réalisation d'une tâche de comptage sous-vocale entraînait, chez l'adulte, une augmentation de l'excitabilité cortico-spinale (CS) des muscles de la main [16]. Étant donné qu'aucune augmentation d'excitabilité CS n'a été observée pour les muscles du pied, cette étude suggère que les circuits moteurs de la main sont spécifiquement impliqués dès que des items doivent être mis en correspondance avec les éléments d'une série ordonnée.

Ces études suggèrent donc que les doigts jouent un rôle important dans l'acquisition des procédures de comptage. Cependant, bien que de nombreuses interactions entre doigts et nombres aient été observées dans la littérature, les raisons pour lesquelles une telle relation existe demeurent inconnues. Selon une première hypothèse (l'hypothèse fonctionnaliste), les interactions entre doigts et nombres émergent au cours du développement ontogénique [1, 17, 18]. Selon cette hypothèse, l'utilisation des doigts durant le développement numérique est l'élément indispensable à la création des interactions entre doigts et nombres. Ces interactions ne devraient, par conséquent, pas se manifester chez les personnes qui n'ont pas utilisé le comptage sur les doigts pendant l'enfance. Selon une hypothèse alternative (l'hypothèse du redéploiement), les interactions entre doigts et nombres ont émergé au cours du développement phylogénétique : les

circuits neuronaux initialement dédiés à la représentation des doigts ont été réutilisés pour le traitement des nombres parce qu'il s'est avéré, au cours de la phylogénèse, que la représentation digitale possédait des ressources fonctionnelles pertinentes pour développer le concept du nombre [19, 20]. Selon cette hypothèse, les individus qui ne présentent pas d'agnosie digitale mais qui, malgré tout, n'utilisent pas les stratégies de comptage sur les doigts durant l'enfance, devraient néanmoins présenter les traces d'une représentation numérique digitale à l'âge adulte.

Chez les non-voyants⁴

Comme la plupart des hommes partagent la majorité de leurs gènes et d'importants aspects de leur environnement, il est très difficile de séparer la contribution des contraintes biologiques de celles issues de l'expérience. Les individus qui grandissent dans des conditions atypiques peuvent néanmoins fournir des informations importantes sur les mécanismes qui forment la cognition. En accord avec cette idée, nous avons examiné comment la cécité précoce pouvait façonner le développement des interactions entre les doigts et les nombres. Dans une première étude, nous avons demandé à des enfants aveugles de naissance et à des enfants voyants (entre 7 et 13 ans) de réaliser trois batteries de tests comportementaux [21]. La première batterie impliquait l'examen de certaines capacités cognitives de base comme la mémoire de travail, le quotient intellectuel, les discriminations digitales, la résolution d'additions simples et la connaissance des séquences ordonnées (les mois de l'année, les lettres de l'alphabet, etc.). Cette batterie était essentiellement destinée à vérifier que les enfants possédaient toutes les compétences nécessaires à la réalisation de la deuxième batterie. Cette seconde batterie était composée de différentes tâches de comptage verbal et était destinée à évaluer l'utilisation spontanée des doigts pour compter et montrer des quantités. En aucun cas, l'expérimentateur ne faisait allusion à l'efficacité de la stratégie du comptage sur les doigts. Le comportement spontané des enfants était donc observé. La dernière batterie était destinée à évaluer la typicité des stratégies de comptage sur les doigts. Il était donc explicitement demandé aux enfants de compter et de montrer des quantités avec leurs doigts. Les résultats

² Le gyrus (circonvolution) angulaire est un gyrus du lobe pariétal du cortex cérébral.

³ Il se caractérise principalement par une agnosie digitale (le sujet ne ressent pas les stimulus et ne reconnaît pas ses doigts), une agraphie (trouble de l'écriture), une acalculie (impossibilité de calculer ou de former des chiffres) et une confusion entre la gauche et la droite.

⁴ La cécité est définie comme une acuité visuelle inférieure à 3/60 (0,05) ou une perte de champ visuel correspondante du meilleur œil avec la meilleure correction possible (d'après l'Organisation mondiale de la santé). Pour que la cécité soit qualifiée de précoce, la personne doit avoir souffert de troubles visuels massifs depuis la naissance et être devenue complètement aveugle à partir de 5 ans au maximum. En ce qui concerne la cécité tardive, elle devra être apparue après 5 ans.

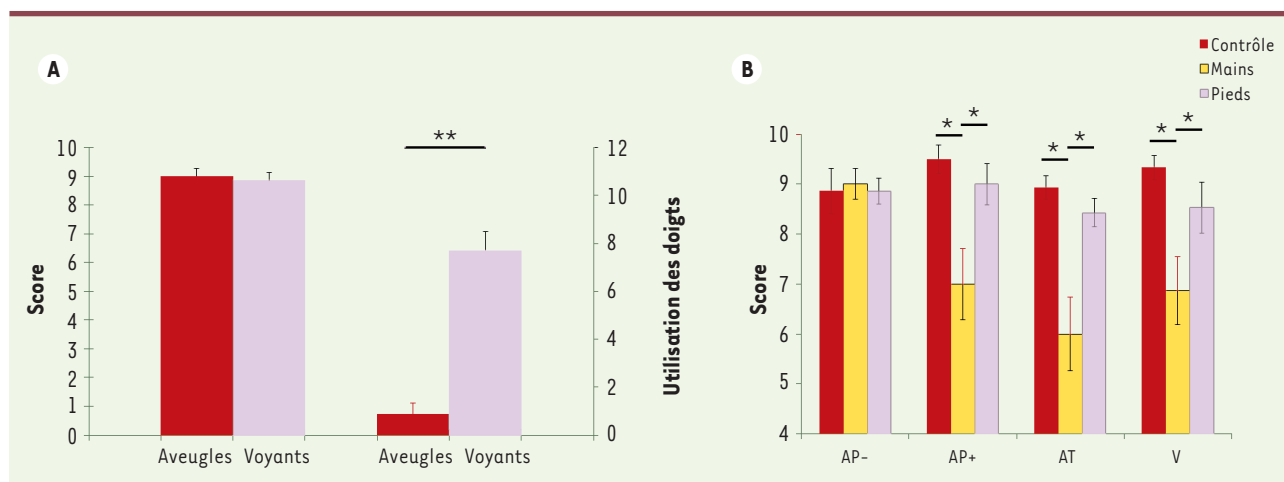


Figure 1. A. Performance des enfants aveugles et voyants dans une tâche d'énumération impliquant de citer un nombre particulier d'exemplaires d'une même catégorie (par exemple, « peux-tu me donner le nom de 8 filles ? »). Les enfants aveugles utilisent moins fréquemment leurs doigts pour réaliser cette tâche mais obtiennent néanmoins des scores comparables aux enfants voyants. **B.** Performance d'adultes voyants (V) et non-voyants (précoces et n'utilisant pas leurs doigts : AP- ; précoces et utilisant leurs doigts : AP+ ; tardifs : AT) dans la même tâche d'énumération. La condition impliquant des mouvements interférents des mains (représentée en jaune) perturbe la performance de tous les participants utilisant leurs doigts (V, AT, AP+) et ne perturbe pas la performance des participants n'utilisant pas le comptage sur les doigts (AP-). La condition contrôle est représentée en rouge ; la condition impliquant des mouvements interférents des pieds est représentée en mauve. Elles sont toutes deux mieux réussies que la condition impliquant des mouvements interférents des mains (figure adaptée avec permission de [21] et [22]). Les astérisques représentent la significativité statistique.

de cette étude ont montré que le comptage sur les doigts était moins fréquent et moins typique chez les enfants aveugles. Malgré cette différence qualitative, le niveau de performance des deux groupes était équivalent dans les différentes tâches (Figure 1A).

Nous avons ensuite testé l'impact d'une interférence manuelle sur les capacités de comptage des non-voyants [22]. Dans cette étude, des adultes aveugles précoces³, aveugles tardifs³ et des adultes voyants étaient invités à réaliser deux tâches d'énumération dans trois conditions différentes : (1) une condition n'impliquant aucun mouvement ; (2) une condition impliquant la réalisation de mouvements actifs des mains (pression d'une balle) et empêchant par conséquent l'utilisation du comptage sur les doigts ; (3) une condition impliquant la réalisation de mouvements actifs des pieds. Alors que l'ensemble des participants voyants et aveugles tardifs utilisaient leurs doigts dans la condition contrôle, seuls quatre participants aveugles précoces (sur onze) utilisaient cette stratégie. Comme déjà observé chez les enfants, le niveau de performance des différents groupes était cependant équivalent. La condition d'interférence manuelle induisait par ailleurs une détérioration sélective de la performance des participants ayant utilisé leurs doigts (voyants, aveugles tardifs et quatre aveugles précoces). Aucune détérioration de la performance n'était observée chez les participants qui n'utilisaient pas leurs doigts (sept aveugles précoces) (Figure 1B). Selon nous, ces résultats ont des implications importantes. Ils suggèrent que, bien que la vision joue un rôle important dans la mise en place des interactions entre les doigts et les nombres, l'utilisation des doigts n'est pas obligatoire pour un développement optimal des capacités de comptage verbal. Ils suggèrent également que le déve-

loppement de l'interaction doigts-nombres dépend de l'expérience et n'est probablement pas le produit du redéploiement inné d'une fonction.

Interactions entre les nombres et l'espace

Chez les voyants

L'existence d'une interaction entre l'espace et les nombres est largement acceptée dans la littérature scientifique. En effet, une multitude de paradigmes ont permis de mettre en évidence cette association. Parmi ceux-ci, les paradigmes mettant en évidence l'effet SNARC (*spatial-numerical association of response codes*) sont probablement les plus connus. L'effet SNARC suggère que le temps nécessaire pour traiter un stimulus numérique est plus court lorsque la magnitude du stimulus (petit *versus* grand) est compatible avec le côté de la réponse (gauche *versus* droite) [24]. Ainsi, lorsqu'il est demandé à des participants de juger si un nombre est plus petit ou plus grand que 5, les réponses sont plus rapides lorsque les petits stimulus sont associés à une réponse gauche et les grands stimulus à une réponse droite. L'effet SNARC a souvent été interprété comme reflétant l'organisation spatiale des nombres sous forme d'une ligne numérique mentale, orientée de gauche à droite [24]. Par ailleurs, la main de réponse importe peu. Lorsqu'un participant répond les

maines croisées, les petits nombres restent associés au côté gauche de l'espace, même si la réponse est donnée avec la main droite (et inversement pour les grands nombres). Étant donné que l'effet SNARC apparaît chez des participants voyants lorsque ceux-ci croisent leurs mains pour répondre, il a été suggéré que les nombres étaient associés à un cadre de référence externe [23].

Parmi les paradigmes qui permettent de mettre en évidence les interactions entre les nombres et l'espace, il faut encore citer les tâches impliquant la bissection d'intervalles numériques. La tâche de bissection de nombres correspond à l'équivalent numérique de la tâche de bissection de lignes [24]. Cette dernière tâche a été largement utilisée dans la littérature pour étudier l'attention spatiale et requiert de couper une ligne en deux parties d'égale longueur. Les personnes droitières ont en général tendance à couper la ligne légèrement à gauche de son milieu réel (biais vers la gauche ou effet de pseudonégligence) [25]. Ce biais vers la gauche reflète le rôle dominant de l'hémisphère droit sur le contrôle attentionnel. De manière intéressante, plusieurs études ont démontré que des biais spatiaux similaires apparaissaient dans des tâches de bissection de nombres [26, 27]. Lorsque des participants contrôles sont tenus d'indiquer (sans calculer) le nombre qui se trouve au milieu d'un intervalle numérique donné (quel est le nombre qui se situe au milieu de 15 et 29 ?), ils ont tendance à donner des nombres plus petits que le milieu réel [26, 27]. Cette sous-estimation est accentuée lorsque les participants bougent une main dans leur espace péripersonnel⁵ gauche (quelle que soit la main utilisée) alors qu'elle diminue lorsque les participants effectuent des mouvements dans leur espace péripersonnel droit [28].

Chez les non-voyants

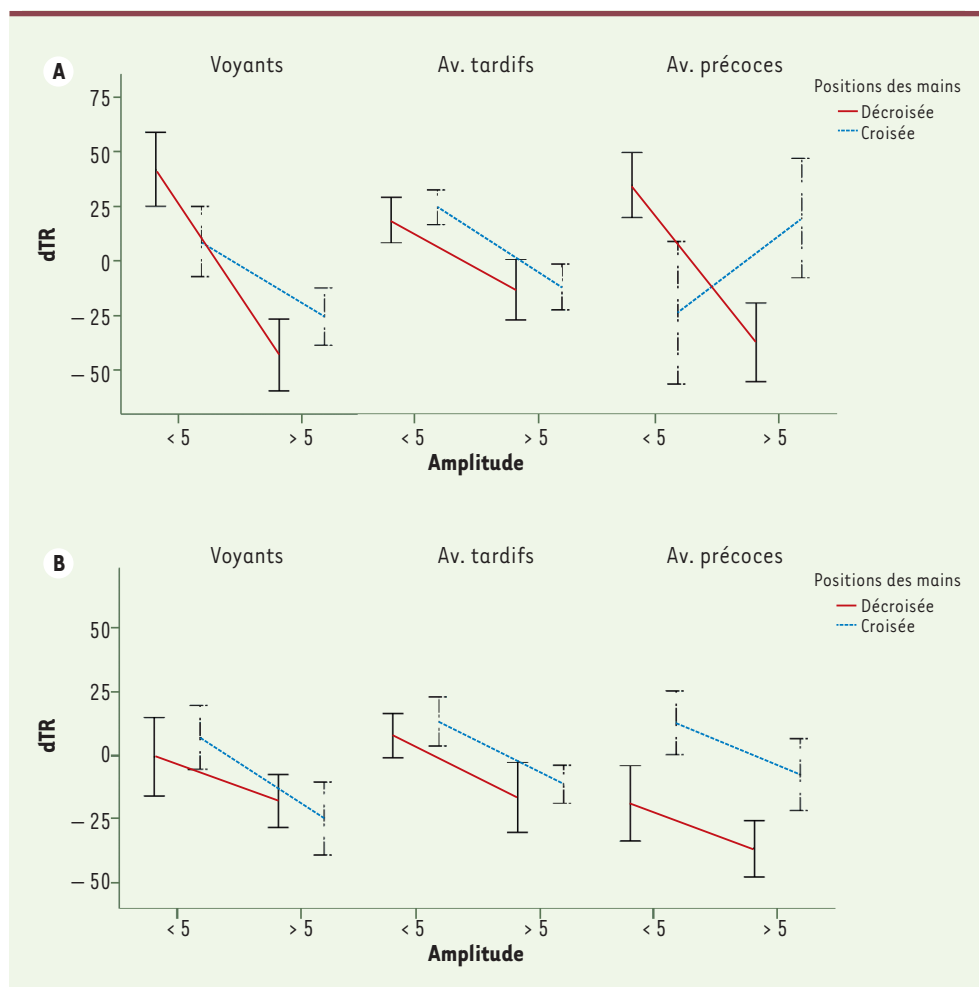
Comme le système visuel fournit les informations spatiales les plus précises et les plus fiables sur notre environnement [29], il a été suggéré que les interactions entre nombres et espace pouvaient provenir de l'expérience que nous avons des nombres dans la modalité visuelle [30, 31]. Une nouvelle vague de recherches est apparue récemment pour tenter de répondre à cette question. Castronovo et Seron [32] ont tout d'abord constaté que les aveugles de naissance présentaient un effet SNARC similaire à celui des voyants (voir aussi [33]). Dans cette étude, les participants devaient réaliser deux tâches de comparaison de nombres (décider si un nombre est plus petit ou plus grand que 5 ou 55) et une tâche de jugement de parité (décider si un nombre est pair ou impair) avec les mains positionnées parallèlement l'une à l'autre. Dans toutes ces tâches, les participants étaient plus rapides lorsque les petits stimulus étaient associés au bouton réponse gauche et les grands stimulus au bouton réponse situé à droite.

Il a par ailleurs été démontré que les personnes aveugles et voyantes présentaient les mêmes effets de pseudonégligence [34, 35]. En effet, dans une première étude [34], des adultes voyants et non-voyants étaient invités à explorer tactilement des tiges de différentes longueurs afin d'en indiquer le centre. Au cours de certains essais, un petit (2) ou un grand (8) nombre était présenté oralement. Lorsqu'au-

cun nombre n'était présenté, les participants avaient tendance à sous-estimer le milieu réel de la tige, en accord avec la notion de pseudonégligence. Dans les deux groupes, ce biais était significativement augmenté par la présentation d'un petit nombre et était significativement réduit par la présentation d'un grand nombre. Dans une seconde étude [35], des adultes voyants et non-voyants étaient invités à réaliser une tâche de bissection de nombres tout en bougeant une de leurs mains dans leur espace péripersonnel gauche ou droit. De manière générale, les mêmes biais spatiaux étaient observés dans les deux groupes de participants. Pour les intervalles présentés en ordre croissant, les auteurs décrivent une tendance générale à sous-estimer le milieu des intervalles présentés, une exagération de cette sous-estimation suite à la réalisation de mouvements dans l'hémi-espace gauche et une atténuation de la sous-estimation suite à la réalisation de mouvements dans l'hémi-espace droit (quelle que soit la main utilisée). Pour les intervalles présentés en ordre décroissant, les auteurs décrivent une exagération de la sous-estimation suite aux mouvements de la main gauche et une atténuation des biais spatiaux suite aux mouvements de la main droite (quel que soit l'hémi-espace dans lequel étaient réalisés ces mouvements). Les études décrites jusqu'ici suggèrent donc que l'expérience visuelle n'est pas indispensable au développement des relations entre nombres et espace. Pourtant, alors que les voyants et les aveugles tardifs manifestent un effet SNARC classique dans les tâches de comparaison de nombres et de jugement de parité, les personnes aveugles précoces manifestent un effet SNARC classique dans la tâche de jugement de parité (Figure 2B), mais un effet SNARC inversé lorsqu'ils réalisent la tâche de comparaison de nombres avec les mains croisées (Figure 2A) [36]. Cette nuance par rapport à l'étude de Castronovo et Seron [32] est importante dans la mesure où elle soutient l'idée selon laquelle différentes informations spatiales pourraient être engagées dans des tâches numériques spécifiques [37, 38] : une information *visuo*-spatiale dans la tâche de comparaison de nombres *versus* une information *verbale*-spatiale dans la tâche de jugement de parité. En accord avec ce cadre théorique, la privation visuelle précoce aurait un impact sur la nature du cadre de référence *visuo*-spatial impliqué dans la tâche de comparaison de nombre mais n'aurait, au contraire, aucun impact sur la nature du cadre de référence *verbale*-spatial impliqué dans la tâche de jugement de parité (voir aussi [39] pour des résultats similaires avec une tâche de congruité espace-temps).

Salillas, Grana, El-Yagoubi et Semenza [40] ont par ailleurs démontré que l'orientation spatiale de l'attention avait

⁵ L'espace péripersonnel correspond à la portion de l'espace entourant un individu et dont la limite est généralement définie par le périmètre dans lequel l'individu peut directement agir avec le bras et la main.



des corrélats électrophysiologiques différents chez les personnes aveugles et voyantes. Dans cette étude, les participants devaient détecter une cible auditive latéralisée après la présentation d'un grand (8 ou 9) ou d'un petit nombre (1 ou 2). Tandis que l'amplitude de la composante N100⁶ était modulée par la congruence dans le groupe des voyants, seule l'amplitude de la P300⁷ l'était dans le groupe des aveugles. La modulation de la composante N100 correspond probablement à un mécanisme « *top-down* »⁸ d'amplification des processus sensoriels auditifs : le nombre présenté active une position sur la ligne numérique mentale qui, à son tour, exerce une orientation de l'attention dans l'espace auditif. La P300, en revanche, est décrite comme reflétant des processus cognitifs de haut-niveau tels que l'extraction et le maintien d'une représentation en mémoire de travail. La privation visuelle précoce pourrait par conséquent conduire les personnes aveugles à traiter les nombres de manière plus cognitive, en utilisant davantage la mémoire de travail verbale que les processus sensoriels (voir [21, 22] pour des conclusions similaires).

Conclusions

En examinant la façon dont certaines expériences atypiques (privation visuelle précoce) façonnent la représentation numérique mentale, nous pouvons augmenter de manière significative nos connaissances de la cognition numérique normale. En effet, l'étude des personnes aveugles nous a permis de nuancer l'idée selon laquelle les doigts étaient indispensables au développement numérique. Malgré une utilisation moins fréquente du comptage sur les doigts, les enfants et les adultes non-voyants parviennent en effet à développer un système de comptage efficace. L'étude des personnes aveugles nous a également permis de mettre en évidence un effet de la privation visuelle sur le format de la représentation numérique mentale. Alors que plusieurs études évaluant l'impact de la cécité sur la cognition numérique suggèrent que les personnes voyantes et non-voyantes présentent une organisation spatiale similaire de leur ligne numérique mentale, d'autres expériences suggèrent que les personnes aveugles pourraient manipuler les nombres en utilisant une représentation ou des

⁶ La N 100 est un potentiel évoqué et correspond à une onde d'amplitude négative survenant 100 ms après le début d'une stimulation.

⁷ La P300 est un potentiel évoqué et correspond à une onde d'amplitude positive apparaissant 300 ms après le début d'une stimulation.

⁸ Mécanismes de traitement de l'information : traitement descendant ou *top-down*, ou ascendant, *bottom-up*.

processus sous-jacents différents de ceux utilisés par les voyants. Dans le futur, nous devrions évaluer le développement numérique des enfants aveugles au cours du temps : acquièrent-ils les concepts mathématiques de la même manière et selon le même déroulement temporel ? Comment est-il possible d'acquérir le concept du nombre sans utiliser le comptage sur les doigts et les indices visuo-spatiaux ? Ces stratégies non-visuelles peuvent-elles être apprises à des enfants *tout-venant* et peuvent-elles améliorer les compétences des enfants présentant des difficultés en mathématiques ? Ces questions sont importantes étant donné que les méthodes d'enseignement des mathématiques ont reçu un intérêt considérable au cours des 10 dernières années. ♦

SUMMARY

Numerical cognition: what can we learn from blind people?

The representation of numbers is assumed to interact with two visuo-motor functions. On the one hand, following the observation that children often use their fingers to learn the counting sequence and basic arithmetic operations, numbers were assumed to interact with finger movements. On the other hand, following the recurrent observation that small numbers are preferentially associated with the left side of space while large numbers are preferentially associated with the right side of space, numbers were assumed to interact with space. In this paper, we will examine the role vision plays in shaping these interactions between fingers and numbers and between numbers and space. To this aim, different experiments with blind and sighted people will be detailed. The role of developmental vision on the development of the finger-numeral representation will first be examined. Then we will investigate the influence of developmental vision on the visuo-spatial representation of numbers. ♦

LIENS D'INTÉRÊT

Les auteurs déclarent n'avoir aucun lien d'intérêt concernant les données publiées dans cet article.

RÉFÉRENCES

- Butterworth B. *The mathematical brain*. London : Nelson, 1999 : 480 p.
- Andres M, Di Luca S, Pesenti M. Finger-counting : the missing tool? *Behav Brain Sci* 2008 ; 31 : 642-43.
- Crollen V, Noël MP. The role of fingers in the development of counting and arithmetic skills. *Acta Psychol* 2015 ; 156 : 37-44.
- Fayol M, Seron X. About numerical representations : insights from neuropsychological, experimental and developmental studies. In : Campbell JID, ed. *Handbook of mathematical cognition*. New York : Psychology Press, 2005 : 3-22.
- Fuson KC, Richards J, Briars DJ. The acquisition and elaboration of the number word sequence. In : Brainerd CJ, ed. *Children's logical and mathematical cognition*. New York : Springer-Verlag, 1982 : 33-92.
- Alibali MW, DiRusso AA. The function of gesture in learning to count : more than keeping track. *Cogn Dev* 1999 ; 14 : 37-56.
- Wiese H. Iconic and non-iconic stages in number development : the role of language. *Trends Cogn Sci* 2003 ; 7 : 385-90.
- Wiese H. *Numbers, language, and the human mind*. Cambridge, MA : Cambridge University Press, 2003 : 360 p.
- Noël MP. Finger gnosis : a predictor of numerical abilities in children? *Child Neuropsychol* 2005 ; 11 : 413-30.
- Di Luca S, Granà A, Semenza C, et al. Finger-digit compatibility in Arabic numerical processing. *Q J Exp Psychol* 2006 ; 59 : 1648-63.
- Imbo I, Vandierendonck A, Fias W. Passive hand movements disrupt adults' counting strategies. *Front Psychol* 2011 ; 2 : 201.
- Michaux N, Masson N, Pesenti M, Andres M. Selective interference of finger movements on basic addition and subtraction problem solving. *Exp Psychol* 2013 ; 60 : 197-205.
- Pinel P, Piazza M, Le Bihan D, Dehaene S. Distributed and overlapping cerebral representations of number, size, and luminance during comparative judgments. *Neuron* 2004 ; 41 : 983-93.
- Gerstmann J. Zur symptomatologie der hirnläsionen im übergangsgebiet der unteren parietal- und mittleren occipitalwindung. *Nervenarzt* 1930 ; 3 : 691-5.
- Rusconi E, Walsh V, Butterworth B. Dexterity with numbers : rTMS over left angular gyrus disrupts finger gnosis and number processing. *Neuropsychologia* 2005 ; 43 : 1609-24.
- Andres M, Seron X, Olivier E. Contribution of hand motor circuits to counting. *J Cogn Neurosci* 2007 ; 19 : 563-76.
- Butterworth B. *What counts. How every brain is hardwired for math*. New York, NY : The Free Press, 1999 : 432 p.
- Butterworth B. The development of arithmetical abilities. *J Child Psychol Psychiatry* 2005 ; 46 : 3-18.
- Anderson ML. Neural reuse : a fundamental organizational principle of the brain. *Behav Brain Sci* 2010 ; 33 : 245-313.
- Penner-Wilger M, Anderson ML. The relation between finger gnosis and mathematical ability : why redeployment of neural circuits best explains the finding. *Front Psychol* 2013 ; 4 : 877.
- Crollen V, Mahe R, Collignon O, Seron X. The role of vision in the development of finger-number interactions : finger-counting and finger-monitoring in blind children. *J Exp Child Psychol* 2011 ; 109 : 525-39.
- Crollen V, Noël MP, Seron X, et al. Visual experience influences the interactions between fingers and numbers. *Cognition* 2014 ; 133 : 91-6.
- Dehaene S, Bossini S, Giraux P. The mental representation of parity and number magnitude. *J Exp Psychol Gen* 1993 ; 122 : 371-96.
- Calabria M, Rossetti Y. Interference between number processing and line bisection : a methodology. *Neuropsychologia* 2005 ; 43 : 779-83.
- Jewell G, McCourt ME. Pseudoneglect : a review and meta-analysis of performance factors in line bisection tasks. *Neuropsychologia* 2000 ; 38 : 93-110.
- Longo MR, Lourenco SF. Spatial attention and the mental number line : evidence for characteristic biases and compression. *Neuropsychologia* 2007 ; 45 : 1400-7.
- Longo MR, Lourenco SF. Bisection of the mental number line in near and far space. *Brain Cogn* 2010 ; 72 : 362-67.
- Cattaneo Z, Fantino M, Silvanto J, et al. Tapping effects on numerical bisection. *Exp Brain Res* 2011 ; 208 : 21-8.
- Charbonneau G, Véronneau M, Boudrias-Fournier C, et al. The ventriloquist in periphery : impact of eccentricity-related reliability on audio-visual localization. *J Vis* 2013 ; 13 : 20.
- Cooper RG. Early number development : discovering number space with addition and subtraction. In : Sophian C, ed. *Origins of cognitive skills*. Hillsdale, NJ : Erlbaum, 1984 : 157-92.
- Simon TJ. Reconceptualizing the origins of number knowledge : a non-numerical account. *Cogn Dev* 1997 ; 12 : 349-72.
- Castronovo J, Seron X. Semantic numerical representation in blind subjects : the role of vision in the spatial format of the mental number line. *Q J Exp Psychol* 2007 ; 60 : 101-19.
- Szücs D, Csépe V. The parietal distance effect appears in both the congenitally blind and matched sighted controls in an acoustic number comparison task. *Neurosci Lett* 2005 ; 384 : 11-6.
- Cattaneo Z, Fantino M, Silvanto J, et al. Blind individuals show pseudoneglect in bisecting numerical intervals. *Atten Percept Psychophys* 2011 ; 73 : 1021-28.
- Rinaldi L, Vecchi T, Fantino M, et al. The effect of hand movements on numerical bisection judgments in early blind and sighted individuals. *Cortex* 2015 ; 71 : 76-84.
- Crollen V, Dormal G, Seron X, et al. Embodied numbers : the role of vision in the development of number-space interactions. *Cortex* 2013 ; 49 : 276-83.
- Herrera A, Macizo P, Semenza C. The role of working memory in the association between number magnitude and space. *Acta Psychol* 2008 ; 128 : 225-37.
- van Dijck JP, Gevers W, Fias W. Numbers are associated with different types of spatial information depending on the task. *Cognition* 2009 ; 113 : 248-53.
- Bottini R, Crepaldi D, Casasanto D, et al. Space and time in the sighted and blind. *Cognition* 2015 ; 141 : 67-72.
- Saillias E, El Yagoubi R, Semenza C. Sensory and cognitive processes of shifts of spatial attention induced by numbers : an ERP study. *Cortex* 2008 ; 44 : 406-13.

TIRÉS À PART

V. Crollen