

Aux racines de la cognition mathématique : comment les quantités numériques sont liées à l'espace dans l'esprit humain

- M.-L. GARDES
- J. PRADO

Pourquoi certaines personnes arrivent à résoudre des problèmes mathématiques très complexes alors que d'autres ont des difficultés à calculer des opérations arithmétiques très simples ? En d'autres termes, qu'est-ce qui détermine que certains individus ont des capacités en mathématiques supérieures à d'autres ? Cette question est fondamentale à l'étude de la cognition numérique, c'est-à-dire la discipline qui s'intéresse à la façon dont les quantités numériques (et plus généralement certains concepts mathématiques liés au nombre) sont représentées et traitées dans notre esprit.

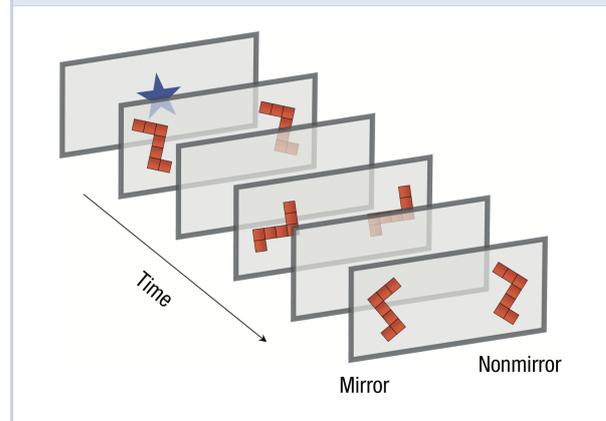
Récemment, pour essayer de répondre à cette question, des chercheurs de l'université d'Oxford au Royaume-Uni ont mené une expérience tout à fait originale [15]. Le but était de déterminer quelles compétences de base sous-tendent les capacités mathématiques les plus avancées, notamment chez des individus experts en mathématiques. Pour ce faire, les chercheurs ont demandé à des étudiants en doctorat des départements de Mathématiques et de Sciences Humaines de l'université de se prêter à une expérience. Les participants devaient effectuer trois tâches. La première tâche visait à comparer les compétences mathématiques avancées des étudiants des deux départements. Les participants devaient estimer le résultat d'opérations arithmétiques complexes (par exemple $546 \div 33,5$) dans un temps imparti. La deuxième tâche était beaucoup plus simple et consistait à placer un nombre sur une droite dont seules les extrémités étaient indiquées. Par exemple, les participants devaient placer le nombre 689 sur une droite dont une extrémité indiquait 0 et l'autre 1000. La précision des placements sur cette ligne numérique était systématiquement mesurée en évaluant la différence de positions entre celle du nombre placé par le participant et celle où le nombre se trouve réellement. La

dernière tâche s'apparentait au jeu du Tangram et consistait à reproduire des motifs donnés au moyen de 16 cubes colorés dans un temps limité. Cette tâche est souvent utilisée en psychologie pour mesurer ce qui est dénommé « capacité spatiale » dans les tests d'intelligence, c'est-à-dire la capacité d'imaginer et de manipuler des formes et des relations dans l'espace. Les résultats montrent plusieurs éléments intéressants. Premièrement, et de façon peu surprenante, les performances des doctorants du département de Mathématiques étaient significativement supérieures à celles des étudiants du département de Sciences Humaines sur la tâche de mathématiques avancées. Deuxièmement, et de façon peut-être plus surprenante étant donnée la simplicité de la tâche, les étudiants du département de Mathématiques étaient en moyenne significativement plus précis à placer les nombres sur la ligne numérique que les étudiants du département de Sciences Humaines. En fait, les performances des participants sur cette tâche étaient un très bon prédicteur statistique de l'appartenance des participants au département (Mathématiques versus Sciences Humaines). Mais le résultat le plus important est sans nul doute que la différence de performance entre étudiants des deux départements sur la ligne numérique n'était plus statistiquement significative lorsque les performances sur la tâche spatiale étaient prises en compte. En d'autres termes, les différences de performance sur la ligne numérique semblaient être principalement déterminées par des différences de capacités spatiales, les étudiants en Mathématiques ayant des capacités spatiales supérieures en moyenne aux étudiants en Sciences Humaines.

Des liens forts entre espace et capacités numériques

Ce résultat est peut-être l'un des plus récents d'une longue série d'études mettant en relation capacités spatiales et performances en mathématiques. En effet, il est maintenant relativement bien établi que les capacités spatiales sont un bien meilleur prédicteur statistique de l'apprentissage des mathématiques que les capacités verbales (représentées par exemple par le vocabulaire ou la capacité de faire des analogies entre différents mots) [19, 1]. Comme reflété dans l'étude décrite ci-dessus, les individus qui font des études supérieures dans le domaine des mathématiques ont également tendance à avoir des capacités spatiales supérieures à la moyenne de la population [1]. En fait, ce lien entre capacités spatiales et apprentissage des mathématiques s'observe dès les premières années de la vie. Une expérience intéressante en donne un exemple. Des chercheurs américains ont tenté de mesurer des différences d'aptitudes spatiales chez des bébés âgés de 6 à 13 mois [10]. Pour ce faire, les chercheurs ont montré aux bébés une série de flux vidéo mis côte à côte. Les deux flux présentaient une pièce de Tetris qui changeait d'orientation au cours de chaque présentation (Figure 1). Dans l'un de ces flux, la forme pouvait parfois devenir une image miroir. Dans l'autre flux, la forme n'était jamais une image miroir. L'expérience visait à déterminer le temps que chaque bébé passait à regarder l'un ou l'autre des flux. L'idée était que les bébés qui avaient les meilleures capacités spatiales étaient sûrement ceux qui pouvaient détecter le plus facilement que l'un des flux avait une image en miroir, et donc passer plus de temps à regarder ce flux par rapport à l'autre. Les chercheurs ont ainsi pu observer qu'effectivement il y avait une variabilité importante dans le temps que chaque bébé passait à regarder le flux avec l'image en miroir, certains le regardant beaucoup plus que d'autres. Mais le résultat le plus impressionnant réside dans ce que les chercheurs ont découvert lorsqu'ils ont rappelé ces mêmes enfants au laboratoire trois ans plus tard. Le temps passé à regarder le flux avec l'image miroir lors de la première visite au laboratoire était corrélé aux apprentissages numériques (comme le comptage, la lecture de nombres en écriture chiffrée ou l'arithmétique simple) des enfants lorsqu'ils avaient 4 ans ! En d'autres termes, les capacités spatiales des enfants en tant que bébés prédisaient statistiquement leurs capacités en mathématiques plus tard à l'école maternelle.

FIGURE 1 – Stimuli utilisés pour mesurer les capacités spatiales des bébés. D'après [10].



Pourquoi ce lien entre espace et mathématiques ? Bien sûr, il existe des explications plus ou moins triviales. Clairement, les compétences spatiales jouent un rôle évident en géométrie, où des modèles en deux ou trois dimensions doivent par exemple être créés et manipulés dans l'espace. Comprendre la notation positionnelle dans le système numérique hindou-arabe nécessite également de traiter des informations spatiales. Ajouter, soustraire, multiplier et diviser des nombres à plusieurs chiffres sur une feuille de papier implique également de positionner les nombres dans l'espace. Mais la contribution des capacités spatiales à la cognition numérique pourrait ne pas se limiter à ces exemples. En fait, il est probable que les capacités spatiales soient au cœur même du développement de la pensée mathématique chez l'enfant. En effet, de plus en plus de recherches indiquent qu'un codage spatial semble sous-tendre la représentation des quantités numériques. Cela pourrait expliquer pourquoi les enfants ayant de faibles habiletés spatiales ont souvent des difficultés avec les mathématiques et pourquoi une faible capacité spatiale est une caractéristique des enfants ayant des difficultés d'apprentissage des mathématiques (un trouble appelé dyscalculie) [18].

La représentation spatiale des grandeurs numériques

L'une des premières études démontrant que les nombres sont encodés de façon spatiale dans le cerveau humain provient d'une expérience menée en 1993 par Stanislas Dehaene et ses collaborateurs [2]. Les chercheurs voulaient étudier la façon dont les adultes traitent les nombres pairs et

impairs. Ainsi, ils ont présenté à des participants adultes des nombres de 0 à 9 sur un écran d'ordinateur. Les participants devaient décider si le nombre était pair ou impair. Dans une partie de l'expérience, les participants appuyaient sur une touche située à gauche du clavier si le nombre était impair et sur une touche située à droite du clavier si le nombre était pair. Ceci était inversé au cours de la deuxième moitié de l'expérience, de sorte que la touche impaire était située sur le côté droit et la touche paire sur le côté gauche. Les chercheurs ont fait une découverte frappante qui n'avait en fait pas grand-chose à voir avec la parité : les petits nombres (par exemple 1, 2 ou 3) étaient traités significativement plus rapidement lorsque les participants appuyaient sur la touche gauche que sur la touche droite du clavier alors que les grands nombres (par exemple 7, 8 ou 9) étaient traités significativement plus rapidement lorsque les participants appuyaient sur la touche droite que sur la touche gauche du clavier. Tout se passe donc comme si les participants imaginaient que les petits nombres étaient à gauche de l'espace et les grands nombres à droite. Cette expérience a été la première à suggérer que les nombres pouvaient être organisés spatialement dans l'esprit humain, avec des quantités de taille croissante allant de gauche à droite. Cette idée est théorisée dans la littérature par le concept de « ligne mentale numérique » [7].

L'une des questions majeures que l'on peut se poser est de savoir si cette organisation spatiale des nombres dans l'esprit de participants adultes résulte simplement de facteurs culturels, comme le fait de lire de gauche à droite. Beaucoup d'études se sont donc intéressées à mesurer les associations entre nombres et espace dans différents types de populations (dont certaines lisant de droite à gauche). Même s'il apparaît clairement que les facteurs culturels influencent les associations entre nombres et espace (par exemple certaines études ont montré que les individus lisant de droite à gauche ont une tendance à davantage associer les petites quantités à l'espace droit [4]), des études récentes suggèrent que cette organisation spatiale est aussi (du moins en partie) indépendante de la culture. En d'autres termes, il se pourrait que l'on naisse au monde avec des quantités numériques organisées de gauche à droite dans notre esprit. Deux expériences supportent notamment cette hypothèse. Dans la première expérience, les chercheurs se sont demandés si des nouveau-nés, âgés d'à peine 45 heures en moyenne, avaient déjà une association entre quantités numériques et espace [6]. L'expérience comportait deux parties.

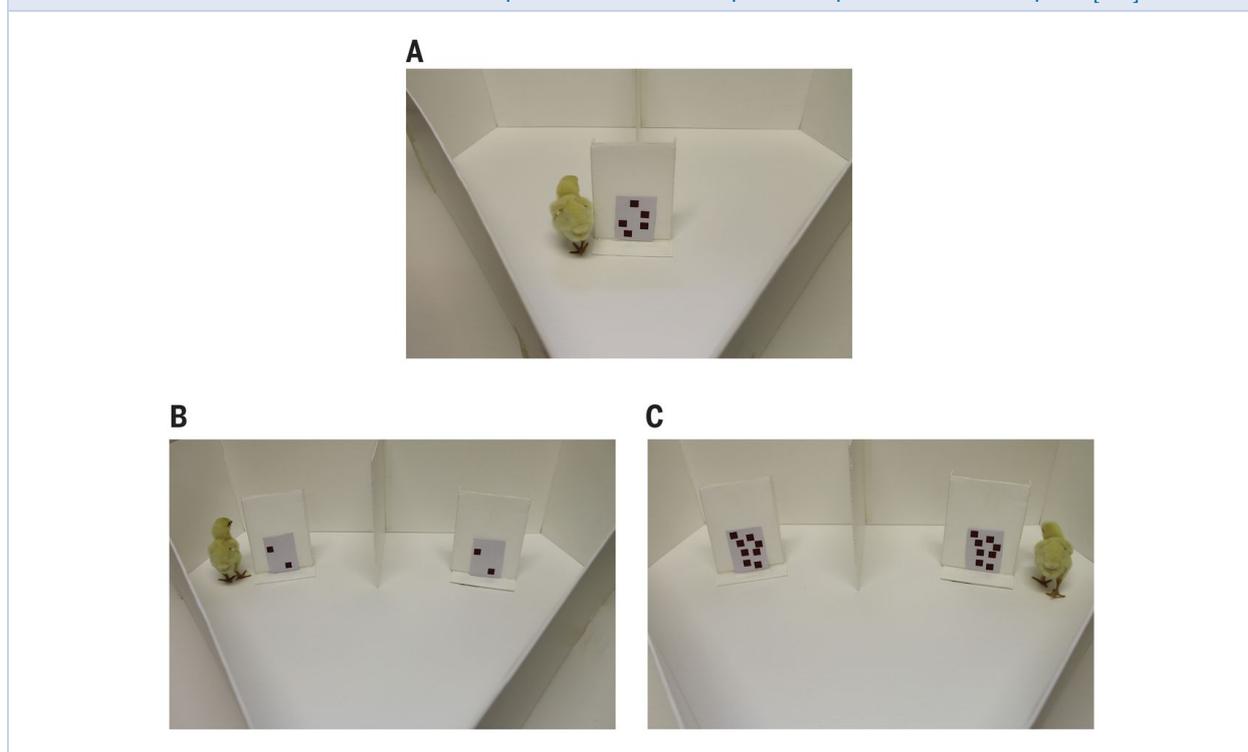
Dans la première partie, les chercheurs ont présenté à ces nouveau-nés des extraits sonores de syllabes répétées, tels que « ba » ou « ta ». Certains bébés en écoutaient 6 et d'autres 18. Les nourrissons voyaient ensuite des lignes de tailles différentes sur un écran. Ceux qui avaient entendu 6 syllabes voyaient une ligne courte, alors que ceux qui en avaient entendu 18 voyaient une ligne plus longue. Dans la deuxième partie de l'expérience, les chercheurs présentaient 18 syllabes aux nourrissons qui avaient précédemment entendu 6 syllabes. Puis ils leur montraient successivement deux lignes longues, l'une située à gauche et l'autre à droite de l'écran (l'ordre de présentation était aléatoire). Les chercheurs se sont aperçus que les nourrissons accordaient en moyenne une attention plus longue à la ligne située à droite que celle située à gauche de l'écran (de manière statistiquement significative). L'expérience était répétée sur les nourrissons qui avaient au départ entendu 18 syllabes. On leur présentait maintenant 6 syllabes et deux lignes courtes, l'une à gauche et à droite de l'écran. Ces nourrissons accordaient en moyenne une attention plus longue à la ligne située à gauche que celle située à droite de l'écran. En clair, tout se passe comme si les nourrissons associaient les petites quantités avec l'espace gauche et les grandes quantités avec l'espace droit. Ce résultat peut paraître surprenant mais il est en fait cohérent avec une autre étude, menée cette fois-ci chez le poussin [14].

Dans cette deuxième expérience, des chercheurs entraînaient des poussins dans une cage à chercher de la nourriture derrière un cache sur lequel étaient indiqués 5 points (Figure 2). Une fois cet entraînement terminé, les poussins étaient mis dans une cage différente au sein de laquelle deux caches étaient disposés, l'un à gauche et l'autre à droite. Sur ces caches était indiqué un nombre de points différent de celui que les poussins avaient pu voir lors de l'entraînement. Dans une condition, les caches montraient 2 points (ce qui représentait donc une quantité plus petite que 5) et dans l'autre 8 points (ce qui représentait donc une quantité plus grande que 5). L'idée était d'observer si, dans ce choix forcé, les poussins allaient en moyenne plutôt dans une direction que dans une autre. Et c'est effectivement ce qui a été observé. Les poussins (entraînés avec 5 points) allaient plus souvent (de façon statistiquement significative) à gauche dans la cage avec 2 points alors qu'ils allaient plus souvent (de façon statistiquement significative) à droite qu'à gauche dans la cage avec 8 points. L'expérience a ensuite été répétée en entraînant les poussins à

aller chercher de la nourriture derrière un cache comprenant 20 points. Cette fois-ci, ils étaient ensuite mis dans une cage avec des caches sur lesquels étaient inscrits 8 points (ce qui représentait une quantité plus petite que 20) ou 32 points (ce qui représentait une quantité plus grande que 20). Dans ce contexte, les poussins allaient plus souvent à gauche dans la cage avec 8 points alors

qu'ils allaient plus à droite qu'à gauche dans la cage avec 32 points. En d'autres termes, tout comme les nouveau-nés, les poussins semblent associer de petites et grandes quantités à gauche et à droite de l'espace (respectivement). Ainsi, l'organisation spatiale des nombres (de gauche à droite) dans l'esprit humain pourrait être très primitive et ne pas avoir grand-chose à voir avec la culture.

FIGURE 2 – L'association entre espace et quantités numériques chez le poussin. (A) Un poussin est entraîné à chercher de la nourriture derrière la quantité « 5 ». (B) Le poussin choisi d'aller chercher de la nourriture à gauche lorsque les caches indiquent la quantité « 2 ». (C) Le poussin choisi d'aller chercher de la nourriture à droite lorsque les caches indiquent la quantité « 8 ». D'après [14].



Espace et arithmétique élémentaire

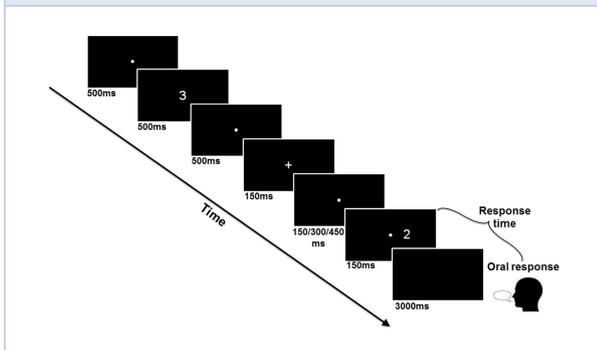
À première vue, il n'est pas évident de voir dans quelle mesure cette organisation spatiale des quantités numériques pourrait affecter la manipulation de ces quantités chez les adultes. Par exemple, nous n'avons certainement pas le sentiment de manipuler les nombres dans l'espace si nous devons calculer $2 + 3$ ou $7 - 3$. Pourtant, des études suggèrent que notre cerveau pourrait s'appuyer sur des intuitions spatiales pour résoudre ce type de problèmes arithmétiques. Par exemple, grâce à la technique de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

(IRMf), des chercheurs ont mesuré l'activité cérébrale de participants adultes pendant qu'ils résolvait des additions et des soustractions [8]. Ils ont découvert que les régions du cerveau qui étaient activées lors de la résolution d'additions étaient semblables aux régions du cerveau qui étaient activées lorsque les mêmes participants déplaçaient leurs yeux vers le côté droit de l'espace. Inversement, les régions cérébrales qui étaient activées pendant la résolution de soustractions étaient semblables aux régions cérébrales qui étaient activées lorsque les participants déplaçaient leurs yeux vers le côté gauche de l'espace. Par conséquent, pour

notre cerveau, résoudre une addition pourrait être comparable à déplacer son attention vers le côté droit d'une ligne mentale numérique, alors que résoudre une soustraction pourrait évoquer un mouvement vers la gauche le long de cette ligne. Par exemple, la résolution de $5 + 3$ ou de $5 - 3$ peut être conceptualisée comme un déplacement de 3 unités à droite ou à gauche du nombre 5.

Cette hypothèse a été confirmée par d'autres études conduites dans notre laboratoire. Dans une étude récente, nous avons demandé à des adultes de résoudre à voix haute des opérations arithmétiques simples présentées sur un écran d'ordinateur [11]. Ces opérations étaient présentées de façon séquentielle, avec tout d'abord le premier opérande, puis l'opérateur, et enfin le second opérande. Alors que le premier opérande et l'opérateur étaient présentés au centre de l'écran, nous présentions le second opérande soit à gauche soit à droite du centre de l'écran (Figure 3). Nous avons pu constater que les additions simples comme $2 + 3$ tendaient à être résolues plus rapidement (en moyenne) lorsque le deuxième opérande était présenté à droite qu'à gauche du centre de l'écran. L'effet inverse était observé pour les soustractions simples, avec une résolution plus rapide lorsque le deuxième opérande était présenté à gauche qu'à droite. Par conséquent, l'organisation spatiale des quantités numériques dans le cerveau pourrait avoir de profondes conséquences sur de nombreux aspects des compétences mathématiques, et y compris sur la façon dont nous résolvons les opérations arithmétiques les plus simples.

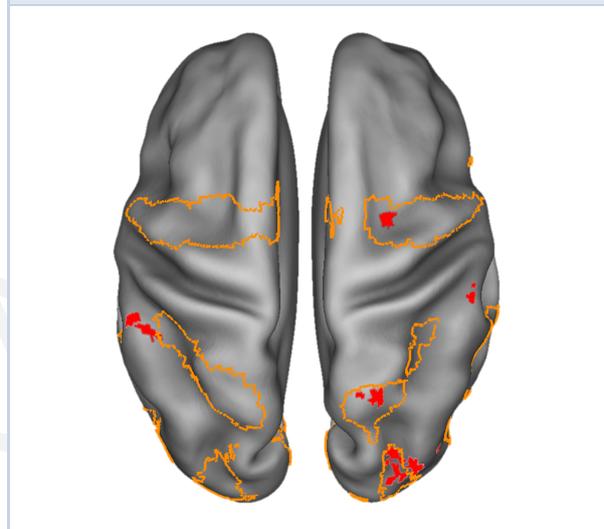
FIGURE 3 – Exemple de présentation d'une opération arithmétique dans l'expérience de [11].



La force de ce lien entre arithmétique et espace est également observable dans le cerveau. Dans une autre expérience récente, nous avons par exemple voulu savoir si ces associations entre opérations arithmétiques et espace avaient pour conséquence que les opérateurs arithmétiques eux-

mêmes puissent activer automatiquement des régions cérébrales impliquées dans l'attention spatiale [12]. Nous avons donc présenté à des participants des opérateurs arithmétiques comme le signe de l'addition alors que leur activité cérébrale était mesurée par la technique de l'IRMf. Nous avons pu voir que la simple perception du signe de l'addition activait un réseau de régions cérébrales normalement impliquées dans l'attention spatiale (Figure 4). Plus précisément, tout se passe un peu comme si, pour notre cerveau, le signe de l'addition représente un indice indiquant la nécessité de déplacer son attention sur la droite d'une ligne mentale numérique.

FIGURE 4 – Régions cérébrales activées lors de la perception du signe « + » (tâches rouges) et régions cérébrales activées lors d'un déplacement des yeux (lignes oranges) D'après [12].

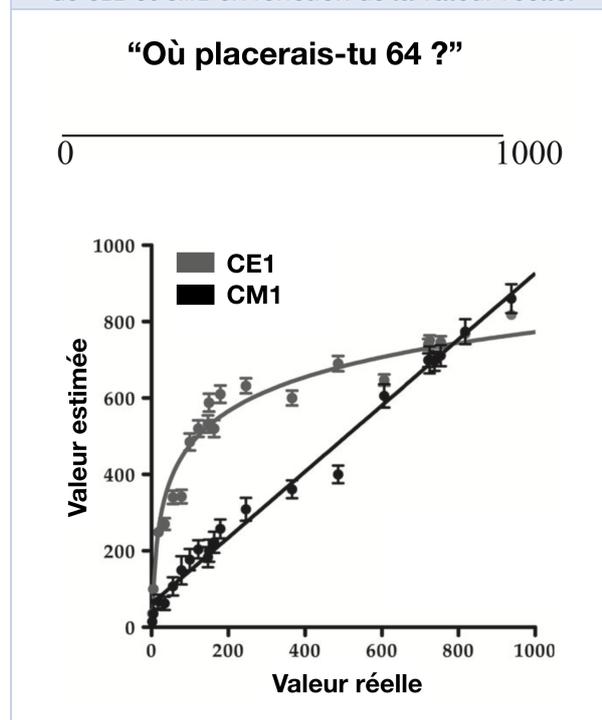


L'importance des associations entre nombres et espace pour l'apprentissage des mathématiques

Plusieurs études indiquent que la qualité des associations entre nombres et espace est essentielle à l'apprentissage des mathématiques dès le plus jeune âge chez les enfants. Par exemple, à mesure que les enfants se familiarisent avec les symboles numériques à l'école primaire, ils augmentent la précision de leur représentation des nombres dans l'espace [16]. Ceci est généralement évalué avec des tâches dans lesquelles on demande aux enfants de positionner un nombre donné sur une ligne tracée sur une feuille de papier, avec 0 ou 1 à une extrémité et un nombre plus grand (généralement

variant de 10 à 1 000) à l'autre extrémité (Figure 5). Les enfants plus jeunes ont tendance à surestimer la position des nombres relativement petits, les plaçant trop à droite (par exemple, ils ont tendance à mettre 8 à la place de 30). Ceci a pour effet de pousser les grands nombres vers la fin de la ligne. On parle donc de représentation logarithmique des nombres sur la ligne. Avec l'âge et l'expérience, ces erreurs disparaissent et les enfants vont progressivement adopter une représentation plus linéaire et plus précise sur toute la ligne. On parlera donc de représentation linéaire des nombres sur la ligne. Il est intéressant de noter que la « linéarité » de la ligne numérique est non seulement un très bon prédicteur statistique des capacités spatiales des enfants mais est aussi corrélée à leurs compétences numériques [16].

FIGURE 5 – Performance d'enfants de CE1 et CM1 lors d'une tâche de ligne numérique. En haut, exemple de ligne numérique et de question. En bas, valeur estimée par des enfants de CE1 et CM1 en fonction de la valeur réelle.



Utiliser l'espace pour développer les compétences numériques

Le lien entre les associations nombres et espace et les compétences en mathématiques suggère naturellement qu'il pourrait être intéressant de sti-

muler les capacités spatiales des enfants pendant l'apprentissage des mathématiques. Par exemple, une étude a révélé une amélioration de la performance en arithmétique des enfants de 6 à 8 ans après la pratique d'une tâche s'assimilant à un jeu de Tangram [16]. L'amélioration était observée pour les problèmes « à trou », comme $2 + _ = 5$. D'autres études ont montré que l'amélioration de la représentation spatiale des nombres peut avoir plusieurs avantages pour les enfants. Par exemple, le fait de donner un feedback correctif aux enfants lorsqu'ils se trompent dans le placement d'un nombre sur une ligne numérique leur permet de recalibrer relativement rapidement les positions des nombres sur la ligne. L'entraînement à ce type de tâches est également associé à des réductions d'activité dans plusieurs régions du cerveau, ce qui pourrait indiquer une automatisation des processus impliqués dans les associations entre nombres et espace [9].

Mais il est important de noter que l'amélioration de cette représentation des nombres dans l'espace peut également se faire par des activités à la maison. Notamment, les jeux de société dans lesquels les enfants naviguent le long d'un agencement séquentiel de cases numérotées, comme le jeu de l'oie, peuvent être très bénéfiques. Par exemple, des chercheurs ont demandé à des enfants à la maternelle de jouer à un jeu de société dans lequel ils devaient déplacer un jeton de gauche à droite d'une séquence de cases numérotées [17] (Figure 6). Les chercheurs ont constaté que, par rapport à un jeu de plateau dans lequel les cases n'étaient pas numérotées mais simplement colorées, jouer à ce jeu de plateau numéroté conduisait à des améliorations statistiquement significatives dans diverses compétences comme le comptage, l'identification des nombres écrits, la comparaison de grandeurs et la linéarité de la ligne numérique dont nous parlions précédemment. Cela pourrait s'expliquer par le fait que jouer à des jeux de société dans lesquels les enfants déplacent un jeton le long d'une séquence de cases numérotées peut leur fournir plusieurs indices importants lorsqu'ils apprennent les grandeurs numériques. Ainsi, comme le dit l'un des chercheurs impliqués dans cette découverte, « plus grand est le nombre indiqué dans une case, plus grand est (a) le nombre de mouvements du jeton que l'enfant doit faire pour l'atteindre, (b) le nombre de mots-nombres que l'enfant dit avant de l'atteindre, (c) la distance parcourue à partir de l'origine pour l'atteindre, et (d) le temps que l'enfant met pour l'atteindre » [16]. Le fait que la représentation des nombres dans l'espace peut être stimulée de

façon explicite a également été démontré par une expérience récente. Dans cette expérience, les chercheurs ont demandé à des enfants de maternelle de comparer des quantités numériques tout en effectuant des mouvements harmonieux du corps sur un tapis de danse (par exemple déplacer leur pied vers la gauche pour les plus petits nombres et vers la droite pour les plus grands nombres) [5]. Par rapport à une activité dans laquelle aucun mouvement dans l'espace était requis, les chercheurs ont constaté que ce programme basé sur un entraînement sensoriel-moteur spatial a permis d'améliorer de façon statistiquement significative les compétences en mathématiques ainsi que la linéarité de la ligne numérique.

FIGURE 6 – Exemple de jeu de plateau menant à une amélioration des capacités numériques chez des enfants de maternelle. D'après [17].



Conclusion

En résumé, la recherche en psychologie et en neurosciences met en évidence un lien très clair entre les capacités spatiales et les habiletés numériques. Cela amène certains chercheurs à faire l'hypothèse que « les objets mathématiques peuvent trouver leur origine ultime dans des intuitions fondamentales sur l'espace, le temps et le nombre qui ont été intériorisées au cours de millions d'années d'évolution dans un environnement structuré et qui émergent tôt dans l'ontogénie, indépendamment de l'éducation » [3]. Même si cette hypothèse est débattue [13], il n'en reste pas moins que le lien entre le développement de la pensée mathématique chez l'enfant et les habiletés spatiales semble indéniable. Ceci offre de multiples pistes pour favoriser l'émergence et la construction des compétences en mathématiques grâce à l'utilisation d'activités faisant appel aux capacités spatiales des enfants. Plus généralement, les résultats de ces recherches fournissent aussi un bon exemple de la façon dont les sciences cognitives peuvent enrichir les recherches sur l'apprentissage des mathématiques.

Références

- [1] V. CROLLEN et M.-P. NOËL. « How Does Space Interact with Numbers? » In : *Visual-spatial Ability in STEM Education*. Springer, 2017, p. 241–263.
- [2] S. DEHAENE, S. BOSSINI et P. GIRAUX. « The mental representation of parity and number magnitude ». *Journal of Experimental Psychology: General* **122**, n° 3 (1993), p. 371.
- [3] S. DEHAENE et al. « Log or linear? Distinct intuitions of the number scale in Western and Amazonian indigene cultures ». *science* **320**, n° 5880 (2008), p. 1217–1220.
- [4] M. H. FISCHER et S. SHAKI. « Spatial associations in numerical cognition—From single digits to arithmetic ». *The Quarterly Journal of Experimental Psychology* **67**, n° 8 (2014), p. 1461–1483.
- [5] U. FISCHER et al. « Sensori-motor spatial training of number magnitude representation ». *Psychonomic bulletin & review* **18**, n° 1 (2011), p. 177–183.
- [6] M. D. de HEVIA et al. « At Birth, Humans Associate “Few” with Left and “Many” with Right ». *Current Biology* **27**, n° 24 (2017), p. 3879–3884.
- [7] E. M. HUBBARD et al. « Interactions between number and space in parietal cortex ». *Nature Reviews Neuroscience* **6**, n° 6 (2005), p. 435.
- [8] A. KNOPS et al. « Recruitment of an area involved in eye movements during mental arithmetic ». *Science* **324**, n° 5934 (2009), p. 1583–1585.
- [9] K. KUCIAN et al. « Mental number line training in children with developmental dyscalculia ». *NeuroImage* **57**, n° 3 (2011), p. 782–795.
- [10] J. E. LAUER et S. F. LOURENCO. « Spatial processing in infancy predicts both spatial and mathematical aptitude in childhood ». *Psychological science* **27**, n° 10 (2016), p. 1291–1298.

- [11] R. MATHIEU et al. « Running the number line: Rapid shifts of attention in single-digit arithmetic ». *Cognition* **146** (2016), p. 229–239.
- [12] R. MATHIEU et al. « What’s Behind a “+” Sign? Perceiving an Arithmetic Operator Recruits Brain Circuits for Spatial Orienting ». *Cerebral Cortex* (2017), p. 1–12.
- [13] R. E. NÚÑEZ. « Is there really an evolved capacity for number? » *Trends in cognitive sciences* **21**, n° 6 (2017), p. 409–424.
- [14] R. RUGANI et al. « Number-space mapping in the newborn chick resembles humans’ mental number line ». *Science* **347**, n° 6221 (2015), p. 534–536.
- [15] F. SELLA et al. « Basic and advanced numerical performances relate to mathematical expertise but are fully mediated by visuospatial skills. » *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* **42**, n° 9 (2016), p. 1458.
- [16] R. S. SIEGLER. « Magnitude knowledge: The common core of numerical development ». *Developmental science* **19**, n° 3 (2016), p. 341–361.
- [17] R. S. SIEGLER et G. B. RAMANI. « Playing linear numerical board games promotes low-income children’s numerical development ». *Developmental science* **11**, n° 5 (2008), p. 655–661.
- [18] D. SZÜCS et U. GOSWAMI. *Developmental dyscalculia: fresh perspectives*. 2013.
- [19] J. WAI, D. LUBINSKI et C. P. BENBOW. « Spatial ability for STEM domains: Aligning over 50 years of cumulative psychological knowledge solidifies its importance. » *Journal of Educational Psychology* **101**, n° 4 (2009), p. 817.



Marie-Line GARDES

Institut des Sciences Cognitives Marc Jeannerod, UMR 5304, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) & université de Lyon
marie-line.gardes@univ-lyon1.fr



Jérôme PRADO

Institut des Sciences Cognitives Marc Jeannerod, UMR 5304, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) & université de Lyon
jprado@isc.cnrs.fr

Nous tenons à remercier Raphaël Rossignol pour sa lecture critique de cet article.