

Bases neuronales des « prédispositions » mathématiques : évaluation des études chez le primate non-humain

Par Laurent GOFFART

Aix-Marseille Université, CNRS, Centre Gilles Gaston Granger, UMR 7304

Dans cet article, nous évaluons la thèse d'une compréhension innée des quantités chez le nourrisson, supposée ancrée dans des neurones du cortex pariétal et mise en avant par des études menées chez le primate non-humain. Après un entraînement préalable dont on ignore totalement ce qu'il engendre dans le cerveau, des singes macaques distinguent des quantités de disques qui leur sont présentées visuellement.

Des neurones « comptables » sont identifiés mais les potentiels d'action qu'ils émettent sont peu nombreux ou peu discriminants. Leur inactivation pharmacologique n'altère pas les performances numériques ou de discrimination visuelle.

Nous soulignons plusieurs manques de rigueur méthodologique : absence de lien causal entre activité neuronale et comportement, confusion entre données hémodynamiques et activité neuronale. La popularité d'une thèse ne garantit pas sa validité. Les mathématiques, en tant que construction sociale et historique, ne sauraient se réduire à une base biologique innée.

Dans le domaine des neurosciences cognitives, une multitude d'études défendent la thèse selon laquelle les nourrissons sont dotés d'une compréhension innée des quantités et que cette capacité est ancrée dans une sensibilité de certaines cellules du cerveau, présumées présentes dès le plus jeune âge, mais aussi chez d'autres espèces animales. Pour certains auteurs, ces découvertes impliqueraient la nécessité que « les éducateurs de la petite enfance sachent que se concentrer sur les nombres est aussi naturel pour les enfants que de se concentrer sur les couleurs ou les sons »¹ et qu'à l'école maternelle, la pensée mathématique serait un « prolongement naturel de leur besoin de se connecter au monde en termes mathématiques »². En raison de la notoriété académique de ses promoteurs, cette thèse est diffusée par une multitude d'articles publiés dans plusieurs journaux. Nous allons démontrer qu'elle dépend d'un manque de vigilance et d'esprit critique dans l'évaluation des articles.

¹ ELGAVI O. & HAMO P. (2025), "Math on the brain: seven principles from neuroscience for early childhood educators", *Early Childhood Education Journal*, 53(8), pp. 2837-2848.

² *Ibid.*

UNE THÈSE MATÉRIALISTE ET ÉVOLUTIONNISTE

Dans un échange avec le mathématicien Alain Connes, Jean-Pierre Changeux affirme que « les objets mathématiques s'identifient à des états physiques de notre cerveau de telle sorte qu'on devrait en principe pouvoir les observer de manière extérieure grâce à des méthodes d'imagerie médicale »³. Cette affirmation serait restée spéculative si elle n'était pas accompagnée d'une incitation académique : « la tâche du neurobiologiste consiste donc, pour réaliser une épistémologie matérialiste forte, à décrire en particulier comment le cerveau de l'homme engendre les objets parmi lesquels se rangent entre autres les objets mathématiques »⁴. Un peu plus tard, Stanislas Dehaene explique que « les nombres, comme tous les objets mathématiques, sont des constructions mentales dont les racines plongent... dans l'adaptation du cerveau humain aux régularités de l'Univers »⁵. En déclarant que « tous les cerveaux humains reçoivent, dès la naissance, des représentations mentales sophistiquées, indépendantes du langage, que l'on peut qualifier de "proto-mathématiques" » et qu'« au cours de son évolution, notre cerveau s'est doté de représentations élémentaires de l'espace, du temps et du nombre, que nous partageons avec de nombreuses autres espèces animales et qui sont à la base de nos intuitions mathématiques »⁶, il promeut la thèse de l'épistémologie évolutionniste⁷.

Des psychologues ont alors déclaré possible « l'exploration des fondements neuronaux de la cognition logique et mathématique » et de « répondre à certaines des plus anciennes questions sur ce que sont la logique et les mathématiques »⁸. Cet enthousiasme repose sur une confusion entre les données fournies par l'imagerie cérébrale et l'activité des neurones. Ces données ne sont pas un indicateur fiable des activités neuronales ; les mesures hémodynamiques ne témoignent pas de l'émission de potentiels d'action⁹. Lippert *et al.* (2010) montrent remarquablement, chez le singe, un signal hémodynamique augmenté dans une zone spécifique du cortex cérébral alors que l'activité de ses neurones n'augmente pas, voire diminue¹⁰.

L'APPORT DES ÉTUDES CHEZ LE SINGE

Désireux de prouver que « la faculté de raisonner avec des nombres est ancrée dans notre héritage biologique »¹¹ ou que « l'espace, le temps et le nombre font partie d'un

³ CHANGEUX J.P. & CONNES A. (1989), *Matière à pensée*, Paris, Odile Jacob.

⁴ *Ibid.*

⁵ DEHAENE S. (2010), *La bosse des maths : quinze ans après*, Paris, Odile Jacob.

⁶ DEHAENE S. (2012), « Les formes de la géométrie et l'universalité des intuitions mathématiques », in CHANGEUX J.-P. (éd.), *La vie des formes et les formes de la vie*, Paris, Odile Jacob.

⁷ GOFFART L. (2022), *Le cerveau en trompe-l'œil des sciences cognitives*, thèse de doctorat, Aix Marseille Université, 178 pages.

⁸ HOUDE O. & TZOURIO-MAZOYER N. (2003), "Neural foundations of logical and mathematical cognition", *Nature Reviews Neuroscience*, 4(6), pp. 507-514.

⁹ LOGOTHETIS N.K., PAULS J., AUGATH M., TRINATH T. & OELTERMANN A. (2001), "Neurophysiological investigation of the basis of the fMRI signal", *Nature*, 412, pp. 150-157.

¹⁰ LIPPERT M.T., STEUDEL T., OHL F., LOGOTHETIS N.K. & KAYSER C. (2010). "Coupling of neural activity and fMRI-BOLD in the motion area MT", *Magnetic Resonance Imaging*, 28(8), pp. 1087-1094.

¹¹ NIEDER A. (2017), "Number faculty is rooted in our biological heritage", *Trends in Cognitive Sciences*, 21(6), pp. 403-404.

ensemble d'outils que les humains partagent avec d'autres animaux non-humains »¹², certains neurophysiologistes sont partis à la recherche de « neurones comptables » dans le cerveau des macaques¹³. Nous allons évaluer ces données car elles sont considérées comme étayant la thèse d'un « précurseur évolutif de l'aptitude humaine à extraire et manipuler des quantités numériques »¹⁴.

Un entraînement préalable nécessaire

Des singes ont été entraînés à détecter si deux échantillons affichés successivement sur un écran vidéo contenaient le même nombre d'éléments. Pendant leur entraînement, chaque session consistait en une série d'essais qui débutaient lorsque les singes saisisaient un levier et dirigeaient leur regard vers un point au centre de l'écran. Après un bref intervalle de fixation, le premier échantillon apparaissait brièvement autour de la cible centrale. Les singes devaient maintenir leur regard dirigé vers le point central pour que le second échantillon apparaisse. Ils furent récompensés s'ils relâchaient le levier lorsque le nombre d'éléments était identique entre les deux échantillons. Dans le cas contraire, ils devaient maintenir le levier jusqu'à l'apparition d'un échantillon contenant le même nombre d'éléments que le premier. À chaque essai, les éléments étaient positionnés de manière aléatoire à l'intérieur d'une zone circulaire au centre de l'écran. L'entraînement terminé, l'enregistrement des neurones du cortex pariétal commença pour vérifier une modulation de leur activité par le nombre d'éléments visuels.

Quelques bases neurophysiologiques

De la vision au mouvement

Entre la rétine de chaque œil et les muscles de la main, un réseau complexe de neurones est mobilisé dans le cerveau. Ce réseau transforme les images affichées à l'écran en un ensemble de contractions et de relâchements musculaires par lesquels le singe maintient ou relâche le levier. À l'origine des nerfs optiques, les cellules ganglionnaires de la rétine sont le siège de phénomènes électriques (appelés potentiels d'action). Ceux-ci se propagent le long de leur prolongement (appelé axone) et conduisent à la libération de molécules chimiques (neurotransmetteurs) au niveau de leurs extrémités. Là, les terminaisons axonales forment des zones de contact (synapses) avec les cellules innervées. Libérés dans l'espace synaptique, les neurotransmetteurs se fixent sur les récepteurs de la membrane des cellules postsynaptiques. Cette liaison chimique modifie la probabilité que celles-ci émettent des potentiels d'action qui, à leur tour, se propagent le long de leur axone et conduisent à la libération de neurotransmetteurs au niveau des synapses suivantes. Cette transmission se répète jusqu'aux neurones dont les axones relient le système nerveux aux fibres musculaires et contrôlent leur degré de contraction. Parmi l'ensemble des régions cérébrales ainsi recrutées, le cortex pariétal contient des neurones sensibles aux stimulations visuelles.

Les potentiels d'action

Tous les neurotransmetteurs n'ont pas une action excitatrice sur les neurones postsynaptiques ; certains les inhibent. L'action, excitatrice ou inhibitrice, dépend de l'identité

¹² BREMMER F. (2025), "Space perception", in GRAFMAN J.H. (éd.) *Encyclopedia of the Human Brain* (2nd Ed.), pp. 681-699.

¹³ NIEDER A. (2013), "Coding of abstract quantity by 'number neurons' of the primate brain", *Journal of Comparative Physiology*, A 199, pp. 1-16.

¹⁴ HABIB M. (2018), *La constellation des dys : bases neurologiques de l'apprentissage et de ses troubles*, Louvain-La-Neuve, De Boeck Supérieur, 368 pages.

neurochimique du neurone qui libère les neurotransmetteurs. Sa probabilité d'émettre des potentiels d'action (PA) dépend aussi de son état de sensibilité, de la chronologie des PA présynaptiques et des neurotransmetteurs libérés. Chaque neurone est en effet innervé par une multitude de neurones présynaptiques (en amont) tandis que son axone innerve une multitude de neurones postsynaptiques (en aval). Plus il reçoit de signaux excitateurs simultanés, plus il a de chances d'émettre des PA. À l'inverse, les neurotransmetteurs inhibiteurs diminuent cette probabilité.

Différences structurelles entre cerveau et machines actuelles

Dans le cerveau, la connectivité n'est pas comparable au câblage de nos appareillages électroniques ou photoniques. Sa structure est doublement arborescente, d'abord diffuente (explosive) puis confluyente. Les signaux neuronaux ne s'apparentent pas aux séries de valeurs ordonnées et continues. Ils consistent en des séquences d'événements unitaires : entre deux PA, il n'y a rien. Comme entre les lettres d'un mot. Les PA se propagent du corps cellulaire vers les terminaisons, le long d'un axone dont les ramifications contactent plusieurs neurones postsynaptiques. Ces derniers peuvent appartenir à différents groupes situés à des distances diverses. La vitesse de propagation n'est pas non plus uniforme ; elle varie d'un type de neurone à l'autre. Enfin, l'efficacité de la transmission des signaux est modulée par le nombre et l'action des synapses inhibitrices.

Ces contraintes ont pour conséquence que la notion de simultanéité, figeant les multiples éléments d'un événement physique dans un même plan, ne s'applique pas au fonctionnement cérébral¹⁵. Dans le cerveau, les flux de PA déclenchés par un ensemble de *stimuli* visuels ou par ceux qui bougent la main s'inscrivent dans une tranche beaucoup plus épaisse que leurs correspondances physiques.

À propos des neurones « comptables » chez le singe

Des études proposent la présence de neurones « comptables » dans deux aires de la région pariétale du cortex cérébral : l'aire intrapariétale ventrale (VIP) et l'aire intrapariétale latérale (LIP).

Les neurones « comptables » de l'aire VIP

Les figures illustrant l'activité des neurones de l'aire VIP révèlent que les taux d'émission de PA pour un nombre spécifique (dit préféré) d'éléments visuels sont très faibles¹⁶. Les activités étant estimées sur un intervalle de 0,6 seconde et leur différence, entre la quantité préférée et deux valeurs voisines, ne dépassant pas six PA, on ignore comment les neurones postsynaptiques peuvent, sur la base de si peu de PA et parmi les centaines d'autres PA qui les reçoivent, montrer à leur tour une activité différente selon le nombre d'éléments visuels. Les auteurs n'expliquent pas comment les neurones-cibles « distinguent » les quelques PA en provenance des neurones comptables de la multitude de PA en provenance d'autres neurones.

¹⁵ PELLIONISZ A. & LLINAS R. (1982), "Space-time representation in the brain: the cerebellum as a predictive space-time metric tensor", *Neuroscience*, 7(12), pp. 2949-2970.

¹⁶ TUDUSCIUC O. & NIEDER A. (2007), "Neuronal population coding of continuous and discrete quantity in the primate posterior parietal cortex", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(36), pp. 14513-14518 ; VISWANATHAN P. & NIEDER A. (2013), "Neuronal correlates of a visual 'sense of number' in primate parietal and prefrontal cortices", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(27), pp. 11187-11192 ; VISWANATHAN P. & NIEDER A. (2015), "Differential impact of behavioral relevance on quantity coding in primate frontal and parietal neurons", *Current Biology*, 25(10), pp. 1259-1269.

Les neurones « comptables » de l'aire LIP

Dans l'aire LIP du cortex pariétal¹⁷, les neurones émettent des PA avec une fréquence plus élevée que les neurones de VIP. Deux groupes de neurones sont rapportés : ceux dont l'activité augmente avec le nombre d'éléments visuels (neurones accumulateurs) et ceux dont l'activité diminue. Aussi, l'influence du nombre d'éléments n'est-elle pas systématique. Dans plusieurs cas, elle est quasi-absente entre des quantités successives. Il n'est pas certain que les neurones postsynaptiques répondent différemment selon l'activité de ces neurones comptables.

La combinaison des activités unitaires ne permet pas non plus de comprendre comment l'activité d'ensemble facilite la discrimination numérique. Pour chacun des deux groupes de neurones, une durée minimale de 0,4 s est nécessaire pour distinguer les réponses correspondant à chaque quantité. Les neurones postsynaptiques pourraient donc différencier les signaux en provenance des neurones de LIP en « comptant » eux-mêmes le nombre de PA reçus pendant cet intervalle. Cette explication n'est pas satisfaisante car elle invoque une régression à l'infini. De plus, les neurones postsynaptiques étant bombardés de PA en provenance d'une multitude de neurones autres que ceux de LIP, ils doivent « sélectionner » les PA émis par les neurones comptables et « ignorer » les autres.

Récusation des fonctions numériques des aires VIP et LIP

Une corrélation entre la fréquence des PA émis par un groupe de neurones et un paramètre physique (nombre d'éléments visuels) n'implique pas que ces PA interviennent causalement dans la réponse du sujet (actionner un levier). Établir une relation causale nécessite de modifier expérimentalement les activités neuronales et de vérifier si la performance comportementale est altérée. Une étude a examiné l'effet sur les capacités de discrimination numérique, de l'inactivation de tous les neurones par l'injection locale d'un agent inhibiteur¹⁸.

Deux singes ont été entraînés à réaliser deux tâches : une discrimination numérique et une discrimination de couleurs. L'expérience consistait en une série d'essais débutant par l'apparition d'un point au centre de l'écran que les singes devaient fixer du regard. Deux échantillons apparaissaient très brièvement dans l'hémichamp visuel gauche ou droit, un dans la partie supérieure, l'autre dans la partie inférieure. Dans la tâche de discrimination numérique, les échantillons étaient composés de disques de couleur rouge ou verte. Pour obtenir une récompense, les singes devaient maintenir leur regard dirigé droit devant, pendant la présentation des échantillons et un court délai supplémentaire. Après quoi, ils devaient regarder l'emplacement où se trouvait le plus grand nombre de disques rouges. Dans la tâche de discrimination des couleurs, la couleur différait entre les échantillons affichés dans les hémichamps supérieur et inférieur. Comme dans l'autre tâche, les singes devaient, pour obtenir une récompense, attendre la disparition du point central pour regarder l'emplacement qui contenait les disques dont la couleur était la plus proche du rouge.

Les résultats montrent que l'inactivation de l'aire VIP ne modifie ni les capacités de discrimination numérique, ni celles des couleurs. Des difficultés apparaissent après inactivation de l'aire LIP, mais elles sont minimes. Ces résultats négatifs ne conduisent pas

¹⁷ ROITMAN J.D., BRANNON E.M. & PLATT M.L. (2007), "Monotonic coding of numerosity in macaque lateral intraparietal area", *PLOS Biology*, 5(8), e208.

¹⁸ DE WIND N.K., PENG J., LUO A., BRANNON E. & PLATT M.L. (2017), "Pharmacological inactivation does not support a unique causal role for intraparietal sulcus in the discrimination of visual number", *PLOS One*, 12(12), e0188820.

les auteurs à douter de l'idée d'un traitement numérique dans ces aires corticales. Ils concluent que « si l'inactivation entraîne des déficits similaires dans les deux tâches, cela conforte l'idée que le traitement des nombres dans les aires LIP et VIP n'est qu'une application d'un circuit à fonction générale pour la comparaison ordinale, l'attention visuelle ou la prise de décision perceptive ». Admettre que les neurones ne sont pas spécifiquement impliqués dans la reconnaissance de quantités aurait pourtant été logique.

Les baisses minimales de performance dans les deux tâches pourraient résulter d'un déficit visuel, comme une vision floue ou double. L'aire LIP contient en effet un pourcentage élevé de neurones dont l'activité dépend de l'éloignement des *stimuli* visuels¹⁹. Bien qu'ils reconnaissent qu'une altération de la vision pourrait expliquer des déficits dans les deux tâches, les auteurs insistent sur une spécialisation de cette région pariétale dans « la perception et la comparaison de différentes grandeurs, telles que le temps, l'espace et la taille, ainsi que la numérosité et la surface ».

CONCLUSION

Alors que chez l'humain, les études d'imagerie cérébrale doivent être interprétées avec précaution, chez le singe, l'implication du cortex pariétal dans les performances numériques reste à démontrer.

L'histoire des sciences et l'épistémologie nous enseignent que la popularité d'une thèse ne signifie pas sa véracité. La popularité résulte d'un rapport de force entre une communauté scientifique qui s'efforce de corroborer sa thèse favorite et celle qui s'efforce de la réfuter ou de la confronter à d'autres qui restent valides.

À l'instar des sociologues, les philosophes nous rappellent aussi que les mathématiques sont une « œuvre d'art collective qui tire son objectivité des interactions sociales »²⁰ et que les personnes qui ont réussi à constituer des théories mathématiques sont « des hommes [et des femmes] au pluriel, des hommes [et des femmes] concrets agissant dans des conditions historiquement déterminées, et non une sorte de prolongement d'un "sujet cognitif" »²¹.

¹⁹ GNADT J.W. & MAYSL E. (1995), "Neurons in monkey parietal area LIP are tuned for eye-movement parameters in three-dimensional space", *Journal of Neurophysiology*, 73(1), pp. 280-297.

²⁰ RAV Y. (1988), "Philosophical problems of mathematics in the light of evolutionary epistemology", *Séminaire de Philosophie des Mathématiques*, n°6, pp. 1-30.

²¹ DORIDOT F. & PANZA M. (2004), « Réponse à Giuseppe Longo », *Intellectica*, n°39, pp. 299-301.