

Stanislas Dehaene
Directeur de Recherches à l'INSERM et au CEA

Rédigé par Micheline Abergel

J'ai beaucoup hésité à venir, car je crois que l'état actuel des recherches ne permet pas de dire grand chose, et la précocité m'a semblé un sujet difficile à aborder du point de vue des scientifiques qui travaillent sur le cerveau. Néanmoins je me suis dit qu'il est peut-être bon qu'on mette progressivement en place, un intérêt pour ces recherches, et aussi une forme de partage de la connaissance scientifique qui peut, comme celle sur la génétique corriger certaines idées reçues.

Je vais vous parler spécialement de ce qui se passe dans le cerveau, quand on fait des opérations mathématiques. Dans mon laboratoire, on travaille sur les opérations de calcul mental, et sur la manière dont ces opérations sont représentées dans le cerveau. Cela nous sert à essayer de comprendre comment des objets mathématiques peuvent s'implanter dans le cerveau, avec plus ou moins de facilité.

Les méthodes dont on dispose pour étudier le cerveau

L'imagerie par résonance magnétique permet de visualiser le cerveau par l'intermédiaire de champs magnétiques très élevés. C'est la méthode principale que nous utilisons dans mon laboratoire à Orsay. On est capable d'observer actuellement avec une échelle assez fine de l'ordre de quelques millimètres, l'évolution du débit sanguin et le changement d'oxygénation du sang. Lorsqu'une région cérébrale entre en activité, le cerveau a un mécanisme adaptatif d'augmentation du débit sanguin, pour apporter glucose et oxygène. C'est ce que nous sommes capables de détecter, et qui nous permet de faire des images sur lesquelles on va distinguer les zones concernées par cet afflux sanguin et donc, qui augmentent leur activité neuronale.

D'autres méthodes peuvent recueillir l'activité électrique du cerveau.

Leur combinaison permet d'examiner la dynamique de l'activité du cerveau et sa localisation.

Il faut cependant corriger quelques idées reçues.

Ces méthodes ne servent pas uniquement à localiser les activités du cerveau, mais permettent également de lire la structure des représentations cérébrales, qui sont aussi des représentations mentales c'est une forme de décodage de la manière dont le cerveau traite et représente l'information quelle qu'elle soit potentiellement. Tous ces processus n'en sont qu'à leur début.

Le calcul mental

On peut donc utiliser l'imagerie par résonance magnétique pour examiner ce qui se passe lors d'une opération mathématique très simple. Si l'on montre un chiffre et que l'on demande de le soustraire de 11 et cela de façon répétée, on peut examiner le débit sanguin dans le cerveau, dans cette condition. Il va y avoir évidemment une activité cérébrale non spécifique liée au fait que le système visuel doit décoder la forme du chiffre, que le système verbal doit aussi articuler la réponse, mais on peut contrôler ces opérations.

L' image, chez une personne donnée ou chez un groupe d'individus, des régions qui seraient activées et qui contribuent donc par l'augmentation de leur activité au calcul mental, concerne un réseau très étendu. Ces opérations demandant un effort, impliquent un circuit de régions et non pas une région. Néanmoins, nous allons nous focaliser au cours de cet exposé sur les régions pariétales qui se situent en arrière du cerveau. Nous avons pu commencer à établir des cartes, et montrer qu'il y a finalement tout un assemblage de régions, parmi lesquelles le calcul figure avec sa spécificité. Il se retrouve au milieu d'activités sensori-motrices et spatiales - comme par exemple le fait de bouger les yeux, de pointer avec la main - ce sont des fonctions du lobe pariétal du cerveau parmi lesquelles se situent les opérations de calcul mais aussi les opérations linguistiques. L'intérêt est qu'on a pu relier l'activité de cette région à des introspections qui sont assez fréquentes chez les grands mathématiciens ou les grands physiciens.

Premier point : Albert Einstein disait que « les mots et le langage écrit ou parlé ne semblent pas jouer le moindre rôle dans le mécanisme de la pensée. Les entités psychiques qui servent d'élément à la pensée, sont certains signes ou des images plus ou moins claires qui peuvent être à volonté reproduites ou combinées. »

Deuxième point : Le rôle du traitement inconscient dans ces opérations en mathématique est souligné par Poincaré dans cette citation :

« Ce qui est frappant tout d'abord, ce sont les apparences d'illumination subite signe manifeste d'un long travail inconscient. Le rôle de ce travail inconscient dans l'invention mathématique me paraît incontestable. »

Si on assemble ces deux éléments, on arrive à la conception d'intuition en mathématique, qui veut dire qu'il y a des opérations automatiques largement inconscientes et souvent sans mot, sans langage ; elles peuvent s'exécuter dans le cerveau et se révéler sous forme d'intuition : sans savoir très bien comment on arrive à un résultat, on a la certitude du résultat. Cette intuition est présente non seulement chez les grands mathématiciens, mais aussi chez les enfants et chez chacun d'entre nous.

Il suffit que je vous dise $12 + 13 = 92$. Vous allez tout de suite voir que c'est faux, sans faire le calcul. 92 ne répond pas à votre attente qui est d'un nombre beaucoup plus petit. Vous allez me dire je l'ai vu tout de suite, c'était trop grand c'était trop à droite, c'était trop éloigné.

C'est ça, l'intuition arithmétique : une forme très élémentaire que nous avons tous et qui va être développée de diverses façons chez les mathématiciens.

Nous avons étudié cette situation d'approximation et d'intuition dans le cerveau.

Certaines régions jouent un rôle plus considérable dans cette forme d'intuition mathématique, alors que d'autres vont être plus activées quand on fait du calcul exact.

Le calcul exact dépend du langage, alors que l'intuition dépend moins du langage ou ne dépend pas du tout du langage. Elle a besoin des symboles mais c'est une opération plutôt du domaine de l'espace.

Il est intéressant de montrer que ces régions qui sont concernées par l'approximation ou l'intuition, sont des régions présentes chez tout le monde - systématiquement retrouvées, individu par individu (7 personnes ont été scannées) - avec une certaine part d'hérédité, le cerveau est variable, le plissement de l'anatomie même du cerveau est variable, la localisation ensuite des activations introduit un peu de variabilité. Néanmoins il est possible de retrouver avec des positions relativement constantes les mêmes activités liées à l'intuition mathématique. Cela soulève une question

intéressante entre génétique et apprentissage. Il y a clairement un déterminisme partiel de ces régions vers des opérations de type mathématique, mais c'est en même temps le résultat de l'éducation puisque le travail est effectué avec des symboles, des chiffres arabes qui sont totalement appris, qui sont une invention culturelle. Il y a donc finalement implantation d'objets culturels mathématiques dans les régions cérébrales qui sont plus ou moins prédisposées à les recevoir.

L'aspect inconscient qu'avait souligné Poincaré peut également être mis en évidence en laboratoire.

On peut par des techniques très rigoureuses relevant de la psychologie expérimentale et de l'imagerie cérébrale, valider que nous avons une forme d'intuition qui n'est pas linguistique, mais peut être inconsciente, et est associée à des circuits cérébraux particuliers dans le domaine mathématique.

Différences entre individus

La première différence est celle qui est étudiée dans 95% des laboratoires. Cette différence va dans le sens du déficit. Des résultats très intéressants ont été mis en évidence dans le domaine des troubles du calcul.

Le premier est que dans les mêmes régions activées chez les personnes normales au cours d'un calcul mathématique, une lésion, par exemple à la suite d'un accident vasculaire qui interromprait l'alimentation en oxygène de cette région, les patients vont développer une acalculie c'est-à-dire une difficulté spécifique à faire des calculs, souvent avec une perte de cette intuition que nous partageons tous. J'ai vu personnellement quelques uns de ces patients et je me suis trouvé face à des gens qui ont un langage normal, une intelligence normale mais sont totalement incapables de faire une opération élémentaire comme répondre à la question : Quel est le chiffre qui se situe entre 2 et 4 ?

La dyscalculie du développement, qui est une difficulté spécifique dans l'apprentissage du calcul chez les enfants est beaucoup moins connue que la dyslexie. Les recherches sur ce syndrome sont rares, comme celles sur le cerveau des enfants éprouvant des difficultés en mathématiques en général.

Néanmoins, on a pu mettre en évidence sur l'image du cerveau d'un enfant qui avait des difficultés dans le domaine du calcul mental, une anomalie du métabolisme cérébral exactement dans la même région que nous trouvons impliquée chez l'adulte dans le calcul. Chez certains de ces enfants il pourrait y avoir une désorganisation très précoce, éventuellement prénatale de la migration neuronale dans ces régions, et l'absence de mise en place normale de ces circuits se traduit tout au long de la scolarité par une grande difficulté, voire une impossibilité à apprendre des opérations comme de simples soustractions.

Une autre étude de nos collègues anglais a montré que l'on trouvait le même type de déficit chez certains enfants prématurés. Ils ont également comparé deux groupes d'enfants prématurés qui avaient eu le même type de problème à la naissance mais probablement pas exactement les mêmes lésions cérébrales dans les mêmes régions.

Un groupe présentait des troubles du calcul, l'autre pas.

Lorsque l'on comparait leurs anatomies cérébrales, on pouvait montrer que sur le groupe d'enfants qui avaient des troubles du calcul, il y avait toujours dans la région qui nous intéresse, une perte de substance grise, une anomalie de l'organisation des réseaux neuronaux.

Nous sommes allés un peu plus loin dans notre laboratoire en étudiant une maladie génétique le « Syndrome de Turner » ; elle comprend des troubles cognitifs dont des

troubles du calcul, suggérant ainsi que parmi le foisonnement de gènes dont a parlé Axel Kahn, certains jouent un rôle plus particulier dans le développement de certaines régions cérébrales. Les enfants qui souffrent de cette maladie ont un déficit tout à fait particulier, ils savent encore approximer, l'intuition des nombres chez eux n'est sans doute pas complètement perdue, mais dès qu'ils doivent faire appel à des stratégies mentales (au delà des chiffres 6 ou 7) ils éprouvent des difficultés. C'est le domaine du calcul exact.

Lorsqu'on reprend l'image de l'anatomie cérébrale de la région concernée, on peut montrer qu'ils ont une réduction de la substance grise et des anomalies de la substance blanche : les connexions entre les aires cérébrales y sont anormalement organisées. On commence à pouvoir constater, chez certains enfants que des anomalies biologiques sont liées à des troubles du calcul.

Précocité

La précocité ou le génie comme le disait Axel Kahn n'est pas l'inverse du déficit. On ne peut pas dire « on va mettre plus de gènes et inverser le processus ». On ne peut pas déduire de ces recherches chez le sujet avec des difficultés en mathématique, des informations très précises sur des sujets avec des avantages en mathématique.

On voit apparaître toutes sortes de recherches anecdotiques dans ce domaine dont il faut se méfier, notamment celles effectuées sur le cerveau d'Albert Einstein. Elles n'ont pas permis d'établir un lien précis entre sa configuration et le fait qu'il ait été un génie en mathématique.

Plus intéressant, on peut regarder la fonction cérébrale chez des individus qui auraient développé des talents particuliers.

Une recherche à l'Université de Caen s'est intéressée à un calculateur prodige qui a développé un talent tout à fait particulier pour le calcul mental : des opérations arithmétiques extrêmement rapides, extractions de racines carrées ... Ils l'ont examiné en train de faire des calculs et l'ont comparé à des sujets normaux en train de faire des calculs.

Certaines régions activées étaient communes à tous les sujets. Cependant quelques régions s'activaient en plus chez le sujet étudié. Il y a peu d'expérience de ce type mais on peut en tirer une première conclusion : les circuits cérébraux normaux qui calculent sont présents chez ce sujet et chez les autres. C'est un point important, nous avons tous les mêmes circuits qui calculent, même chez les personnes qui n'ont pas développé de talent particulier.

Les différences résident dans le recrutement d'autres circuits se situant sur la région frontale et l'implication des circuits de l'hypocampe qui concerne la mémoire épisodique ou déclarative. Ces circuits ne sont jamais activés normalement lors des calculs. Cela correspond à l'introspection des calculateurs prodige : Ils ont tellement travaillé, ils ont une telle familiarité des mathématiques que leur lecture des nombres très spécifique. Quand on leur donne un nombre, par exemple 1712 ils se disent c'est la somme de deux carrés. Cela est très fréquent et se reflète dans les zones activées qui sont les circuits de la mémoire et font que le sujet calcule avec les circuits habituels plus une implication spectaculaire de son expérience et un effort particulier que les sujets normaux n'engagent pas.

Ces régions cérébrales impliquées dans l'intuition arithmétique existent chez chacun d'entre nous, sauf en cas d'accident vasculaire ou de désorganisation précoce, qui est rare chez les enfants. Partant de ce circuit commun, nous allons faire plus ou moins d'efforts, avoir plus ou moins d'intérêt, y mettre plus ou moins de passion et recruter à

ce sujet d'autres régions cérébrales. Nous allons également amplifier l'activité des mêmes régions cérébrales de façon plus ou moins variée en fonction du talent ou de la passion qu'on y met. Il n'y a pas d'évidence pour l'instant que la variabilité intrinsèque de ces régions soit corrélée de façon déterminée avec le talent que pourrait présenter tel ou tel individu et, il y a, par contre, au moins autant d'évidences que la plasticité cérébrale soit telle, que le travail, la passion, la quantité d'efforts qu'on va y mettre, va en retour modifier l'organisation cérébrale. On peut l'illustrer dans le domaine des mathématiques mais cela a très bien été illustré dans le domaine du talent musical, dans lequel on montre très clairement que la surface corticale accordée à certaines représentations, sons ou mouvements, va varier en fonction du degré d'apprentissage. Le degré de talent peut être mis en corrélation avec la quantité d'apprentissage précoce, et c'est probablement l'apprentissage précoce qui vient modifier les régions cérébrales plutôt que les régions cérébrales pré existantes qui créeront le talent avant même toute interaction.

Conclusion

On peut considérer que l'acquisition des mathématiques repose sur plusieurs intuitions fondamentales : celles du nombre, de l'espace, du temps, qui sont toutes issues de représentations cérébrales spécialisées et ont été sélectionnées par l'évolution pour leur valeur adaptative. Certaines d'ailleurs sont présentes chez l'animal. Les éléments de base sont des éléments qui sont présents dans le cerveau du primate.

En dehors de certains cas pathologiques, tous les enfants naissent avec un sens des dons particulier, et certainement un sens de l'espace et un sens du temps, et donc j'aimerais dire que nous avons tous la bosse des maths, nous naissons tous avec des capacités particulières dans ce domaine qui nous sont conférées par l'évolution de notre cerveau.

Je voudrais souligner que l'existence de mécanismes cérébraux du calcul, et l'emphase que je mets sur ces mécanismes cérébraux, ne doit pas conduire à un réductionnisme, c'est-à-dire que toutes les capacités et l'activation cérébrale que l'on observe chez l'adulte, sont le reflet de contraintes croisées et indémêlables de l'architecture cérébrale et de l'éducation. Il y a reproductivité de ces régions, une forme de déterminisme, mais en même temps il est clair que s'il n'y avait pas l'éducation, s'il n'y avait pas eu l'exposition à une éducation mathématique, ces régions ne se seraient pas développées et il n'y aurait pas eu la réponse que l'on voit chez l'homme.

L'interaction est très claire entre les deux.

L'effort, la passion, et l'existence d'une plasticité cérébrale très importante modifie les réseaux cérébraux qui ne doivent pas être vus comme des réseaux statiques donnés à la naissance, mais comme des réseaux en permanente évolution à la fois chez l'enfant et chez l'adulte.

Une erreur serait de penser que la présence de certaines anomalies cérébrales pourraient empêcher une évolution.

L'espoir des recherches sur le cerveau c'est évidemment une meilleure compréhension des trajectoires neuro-développementales en mathématiques comme dans d'autres domaines, et de pouvoir conduire à une meilleure prise en charge des pouvoirs publics.

On cherche toujours à opposer le cerveau et la psychologie, mais dans notre recherche ce n'est plus du tout le cas. La discipline s'appelle les neuro-sciences cognitives, elle

intègre les deux, tout ce qui est dans la psychologie est dans le cerveau, tout ce que vous pensez, tout ce que vos enfants apprennent à l'école, se reflète dans le cerveau. Et inversement, le cerveau n'est pas une organisation statique qui détermine une fois pour toutes les capacités, et même s'il y a une moins bonne organisation partielle au départ, on peut toujours la corriger :

Je prendrais pour exemple ma myopie que je corrige avec les lunettes.