”Quels sont les liens entre arithmétique et langage ? Une étude en Amazonie”

Stanislas Dehaene, Veronique Izard, Cathy Lemer, Pierre Pica

Quels sont les liens entre arithmétique et langage ? Une étude en Amazonie.

Chapter · March 2007

DOI: 10.13140/2.1.4578.9121

Veronique Izard
CNRS & Université Paris Descartes

Pierre Pica
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Cahier de l'Herne 'Chomsky'
Jean Bricmont & Julie Franck eds 2007

Quels sont les liens entre arithmétique et langage ?

Une étude en Amazonie

Stanislas Dehaene, Véronique Izard, Cathy Lemer et Pierre Pica

Toute science a besoin des mathématiques. La connaissance des choses mathématiques est presque innée en nous... C'est la plus facile des sciences, un fait évident en ce que nul cerveau ne la rejette ; car les gens de la rue et les illettrés complets savent calculer et compter.

Roger Bacon (1214-1294)

Les expériences psychologiques sur les locuteurs du mundurucu, une langue amazonienne où les nombres n'existent que jusqu'à cinq, indiquent qu'ils sont capables de réaliser des calculs approchés mais non de calculer avec des nombres exacts.

D'où vient l'arithmétique ? Pour certains théoriciens, les origines de la compétence humaine en arithmétique se trouvent dans le caractère récursif de la faculté de langage (1). Noam Chomsky, par exemple, écrit que « nous pourrions concevoir la faculté humaine pour les nombres essentiellement comme une "abstraction" du langage humain qui conserve les mécanismes de l'infinité discrète [la capacité de générer une infinité de combinaisons à partir d'un ensemble fini de mots] et élimine les autres caractéristiques spéciales du langage » (2). Cette conception suppose que la capacité combinatoire propre au langage joue un rôle essentiel dans le développement du concept de nombre.

Homme mundurucu comptant à l'aide de ses doigts et orteils, Aldeia Jardin, 2002. © CNRS photothèque/Pierre Pica.

Pour d'autres, cependant, le langage n'est pas essentiel. Les humains, comme de nombreux animaux, posséderaient plutôt un « sens des nombres » non verbal (3), une capacité évolutive ancienne à se représenter mentalement des nombres approchés sans symboles ni langage (4-6) et qui fournit la fondation conceptuelle de l'arithmétique.

Enfin, un troisième groupe de théories, tout en reconnaissant l'existence de représentations non verbales des nombres, postule que la compétence arithmétique est profondément transformée une fois que les enfants acquièrent un système de symboles numériques (7-9). Le langage jouerait un rôle essentiel dans l'articulation des diverses représentations non verbales pour créer un concept de grand nombre exact (10-12).

Pour élucider la relation entre langage et arithmétique, la compétence numérique doit être étudiée dans des situations où le langage des nombres est absent, ou au moins réduit. Chez de nombreuses espèces animales, tout comme chez les jeunes enfants avant l'acquisition des noms de nombres, des expériences comportementales et neurophysiologiques ont révélé des rudiments d'arithmétique (6, 13-16). Il semble que les petits enfants et les animaux ne se représentent exactement que les trois premiers nombres. Au-delà, ils peuvent estimer les quantités numériques, avec un degré de flou qui augmente linéairement avec la taille des nombres concernés (loi de Weber). Ceci, avec d'autres expériences neuropsychologiques et d'imagerie neurale, a donné lieu à une réconciliation préliminaire des théories ci-dessus : l'arithmétique exacte aurait besoin du langage, tandis que l'approximation n'en aurait pas besoin (12, 17-21). Cette conclusion a cependant été remise en doute par quelques études de cas de patients adultes avec des lésions cérébrales ou autistes chez qui le dysfonctionnement du langage ne faisait pas disparaître l'arithmétique exacte, ce qui suggère qu'en de rares cas, des calculs même complexes peuvent être exécutés sans avoir besoin de langage (22).

En dernière analyse, le débat ne peut se régler par l'étude de personnes qui ont été élevées dans une culture fourmillant de symboles écrits et parlés pour les nombres. Nous aurions besoin, pour le résoudre, d'une expérience de privation du langage où des adultes neurologiquement normaux auraient été élevés sans mots ni symboles pour les nombres. Alors qu'une telle expérimentation est éthiquement impossible dans notre culture occidentale, certaines langues sont intrinsèquement limitées dans leur capacité d'exprimer les nombres, utilisant parfois (quelle qu'en soit la raison) un ensemble très restreint de mots pour les nombres (« un, deux, beaucoup ») (23). Ces langues, qui sont souvent en voie de disparition, offrent une occasion rare d'établir l'ampleur et les limites des capacités arithmétiques non verbales.

Nous avons étudié la cognition numérique de locuteurs natifs du mundurucu, une langue qui n'a des noms que pour des nombres de un à cinq (24, 25). Le mundurucu est une langue de la famille tupi, parlée par quelque 7 000 personnes qui vivent dans un territoire autonome de l'État de Para au Brésil (Fig. 1). À la suite de séjours de recherche réguliers depuis 1988, et de deux études pilotes en 2001 et 2002, l'un de nous (P.P.) a voyagé dans plusieurs villages au cours de 2003 et a pu collecter des données auprès de 55 locuteurs du mundurucu dans une batterie de tests numériques informatisés. Dix locuteurs natifs du français (âge moyen de 55 ans) ont servi de groupe contrôle.

Les Mundurucus entretiennent certains contacts avec des individus et une culture non indigènes, principalement des institutions gouvernementales et des missionnaires. Plusieurs d'entre eux parlent donc un peu de portugais, et quelques-uns, les enfants en particulier, reçoivent un peu d'instruction (pour des informations complémentaires sur les Mundurucus, voir le site Internet de l'Institut Socioambiental : http://www.socioambiental.org/pib/epienglish/munduruku/munduruku.shtm). Pour évaluer l'impact potentiel de ces variables, nous avons formé deux groupes d'adultes et d'enfants sans instruction strictement monolingues, et nous avons comparé leurs performances avec celles de participants plus bilingues et plus éduqués (Fig. 1). En utilisant un ordinateur portable alimenté par énergie solaire, nous avons collecté une grande quantité d'essais sur des tâches d'arithmétique classique, y compris un test de comparaison chronométrique. Ceci nous a permis de vérifier si une compétence pour les nombres se manifeste en l'absence d'un langage des nombres bien développé.

Une première tâche a exploré les expressions verbales pour les nombres en mundurucu (26). On présentait aux participants des tableaux de 1 à 15 points, dans un ordre aléatoire, et on leur demandait dans leur langue de dire combien de points il y avait. Cette tâche a permis une analyse objective des conditions d'utilisation des numéraux. Aucune variation systématique entre groupes n'a été relevée, hormis l'absence d'usage du mot pour « cinq » chez les plus jeunes enfants, et les résultats ont donc été mis en commun pour tous les groupes (Fig. 2). Ces résultats confirment que le mundurucu n'a d'expressions partagées par tous les locuteurs que pour les nombres 1-5. Ces expressions sont longues, et elles ont souvent autant de syllabes que les quantités correspondantes. Les mots pour trois et quatre sont polymorphémiques : ebapũg = 2+1, ebadipdip = 2+1+1, où « eba » signifie « vos (deux) bras ». Ceci reflète peut-être un système antérieur en base 2, commun aux langues tupi, mais le système n'est pas productif en mundurucu (des expressions telles que « eba eba dip » ou « eba eba ebapũg » ne sont pas utilisées et sont jugées sans signification).

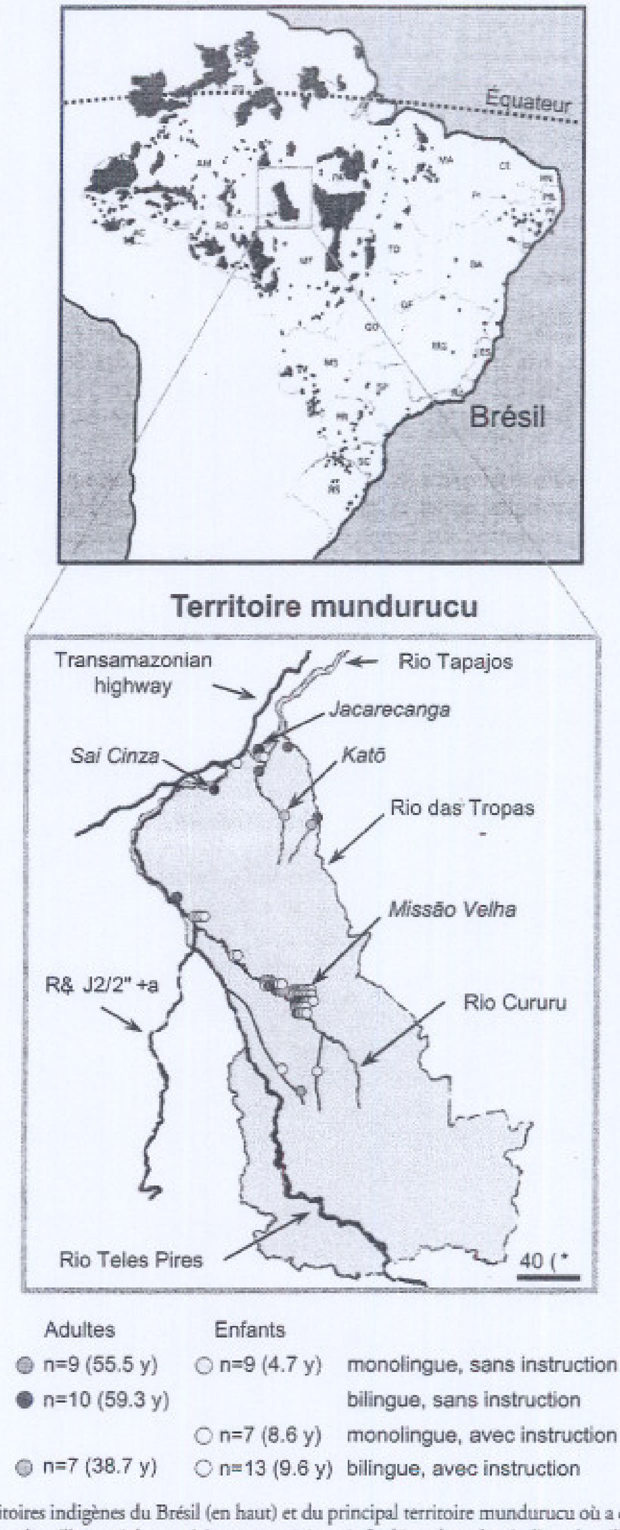


Figure 1. Localisation des territoires indigènes du Brésil (en haut) et du principal territoire mundurucu où a été conduite notre recherche (en bas). Les points colorés indiquent les villages où les participants ont été testés. La légende en bas indique la taille des six groupes de participants et leur âge moyen. Ces cartes sont adaptées de R. Betopovos indigenos no Brasil, Instituto socioambientale, Sao Paulo, 2000, p. 161, 461.

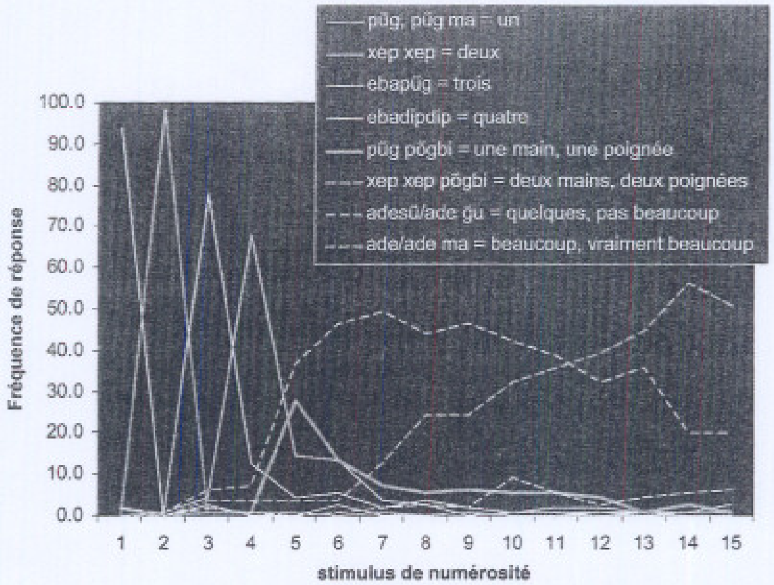


Figure 2. Dénomination de numérosité. Le lexique des nombres en mundurucu. On présentait aux participants des tableaux de 1 à 15 points, dans un ordre aléatoire, et on leur demandait de dire combien de points il y avait. Pour chaque quantité sur l'axe des x, le graphique montre la fraction des fois où elle était désignée par un mot ou une expression donnée. Nous ne présentons que les données pour les mots et locutions produits dans plus de 2,5 % de tous les essais. Pour les nombres au-delà de 5, la somme des fréquences est inférieure à 100 % : cela provient du fait que beaucoup de participants ont produit des locutions ou des phrases rares ou idiosyncratiques comme « tous mes orteils » (une liste lexicographique complète est disponible auprès des auteurs).

Au-dessus de 5, il y avait peu de consistance dans l'usage de la langue, aucun mot ou expression ne représentant plus de 30 % des productions d'un nombre cible donné. Les participants s'en remettaient à des quantificateurs approximatifs tels que « peu » (adesũ), « beaucoup » (ade), ou « une petite quantité » (burũmaku). Ils employaient aussi une large diversité d'expressions, dont la précision était variable, comme « plus qu'une main », « deux mains », « quelques orteils », et jusqu'à de longues phrases telles que « tous les doigts des mains et encore quelques-uns de plus » (en réponse à 13 points).

De façon cruciale, les Mundurucus n'utilisaient pas leurs numéraux pour compter en séquence, ni pour indiquer des quantités précises. Ils énonçaient habituellement un numéral sans compter (bien que si on le leur demandait, certains pouvaient compter très lentement et sans verbaliser en faisant correspondre leurs doigts et leurs orteils aux ensembles de points, voir les 2 photographies *in texto*). Nos mesures confirment qu'ils sélectionnaient leur réponse verbale sur la base d'une appréhension du nombre approximatif plutôt que d'un comptage exact. Avec l'exception de « un » et « deux », tous les numéraux étaient employés en rapport avec une gamme de quantités approximatives plutôt qu'un nombre précis (Fig. 2). Par exemple, le mot pour cinq, qui peut se traduire comme « une main » ou « une poignée », était employé pour 5, mais aussi pour 6, 7, 8 ou 9 points. Inversement, lorsque 5 points étaient présentés, le mot pour « cinq » n'était prononcé que dans 28 % des essais, tandis que les mots « quatre » et « peu » étaient utilisés chacun pour environ 15 % des essais. Ce schéma de réponse est comparable à l'emploi de nombres arrondis dans les langues occidentales, par exemple lorsque nous disons « dix personnes » alors qu'il y en a en réalité 8 ou 12. Nous avons aussi remarqué l'emploi occasionnel de constructions formées de deux nombres (par ex. « deux-trois grains ») qui ont été analysées comme permettant l'indication de quantités approximatives dans les langues occidentales (27). Ainsi, les Mundurucus ne diffèrent de nous que par le fait de ne pas parvenir à compter et d'autoriser une utilisation approchée des numéraux dans l'intervalle 3-5, où les numéraux occidentaux renvoient habituellement à des quantités précises.

Si les Mundurucus ont un sens du nombre approximatif, ils devraient aussi réussir des tâches d'approximation avec des quantités plus grandes que celles pour lesquelles ils ont des numéraux. Si cependant les concepts de nombre n'émergent que lorsque des numéraux sont disponibles, alors on devrait s'attendre à ce que les Mundurucus aient beaucoup de difficultés avec les grands nombres. Nous avons testé cette alternative avec deux tâches d'estimation.

Tout d'abord, nous avons étudié la comparaison de nombres. On présentait aux participants des ensembles de 20 à 80 points, contrôlés pour diverses variables non numériques (26), et on leur demandait d'indiquer quel ensemble était le plus nombreux (Fig. 3A). Les réponses des participants mundurucus se situaient bien au-delà du hasard dans tous les groupes (le minimum était de 70,5 % de réponses correctes dans le groupe le plus jeune). Il n'y avait pas de différence significative entre les six groupes mundurucus, ce qui suggère que les faibles niveaux de bilinguisme et d'instruction de certains participants ne modifiaient pas leur performance. Cependant, la performance moyenne des Mundurucus était légèrement inférieure à celle du groupe contrôle français. Cette différence pourrait être due à la distraction chez certains participants mundurucus, pour qui ceci était le tout premier test auquel ils participaient.

Dans les cultures lettrées, la performance en comparaison de nombres est sujette à un effet de distance : la performance augmente avec le rapport entre les nombres à comparer, que les cibles soient représentées comme des ensembles d'objets ou symboliquement, en chiffres arabes (28, 29). Cet effet de distance classique a aussi été observé chez les participants mundurucus : leur performance diminuait lorsque le rapport passait de 2 à 1,5, 1,3 ou 1,2. Cet effet était identique dans tous les groupes, y compris le groupe contrôle français (voir Fig. 3A). Les temps de réponse aussi montraient un effet de distance : ils étaient plus rapides pour les nombres éloignés que pour les nombres proches. Ici encore, bien que le groupe de contrôle français ait été globalement plus rapide, l'effet de distance était similaire dans tous les groupes. L'ajustement de la courbe de performance a suggéré que la fraction de Weber, qui quantifie le degré d'imprécision dans la représentation de nombres (16), était de 0,17 chez les Mundurucus, seulement marginalement supérieure à la valeur de 0,12 observée dans le groupe de contrôle. Ainsi, il est clair que les Mundurucus sont capables de se représenter des grands nombres et qu'ils comprennent le concept de grandeur relative (30).

Nous avons ensuite examiné si les Mundurucus sont capables d'effectuer des opérations approchées avec des grands nombres. Nous avons utilisé une version non symbolique de la tâche d'addition approchée, que l'on croit indépendante de la langue chez les participants occidentaux (12, 17, 18). On présentait aux participants des animations simples illustrant l'addition physique de deux grands ensembles de points dans une boîte (Fig. 3B). Ils devaient estimer le résultat et le comparer à un troisième ensemble. Tous les groupes de participants, y compris les adultes monolingues et les enfants, ont eu une performance nettement au-delà du hasard (minimum 80,7 % correct). La performance n'était à nouveau affectée que par la distance, sans aucune différence entre les groupes (31). La performance dans cette tâche d'addition + comparaison était meilleure que dans la tâche de comparaison précédente, peut-être parce que l'opération était représentée de façon plus concrète par le mouvement des objets. Bref, les participants mundurucus n'avaient pas de difficulté à additionner et à comparer des grands nombres, avec une précision identique à celle du groupe contrôle français.

Enfin, nous avons examiné si les Mundurucus étaient capables de manipuler des nombres exacts. L'hypothèse d'un « sens du nombre approximatif » prédit qu'en l'absence de symboles parlés ou écrits, un nombre ne peut être représenté qu'approximativement, avec une incertitude interne qui augmente avec le nombre (loi de Weber). Au-delà des nombres 3 ou 4, ce système ne peut distinguer de façon fiable un nombre exact n de son successeur $n + 1$. Donc les Mundurucus devraient échouer dans des tâches qui exigent la manipulation de nombres exacts comme « exactement six ». Pour évaluer cette prédiction d'une limitation de l'arithmétique mundurucu, nous nous sommes servis d'une tâche de soustraction exacte. On demandait aux participants de prédire le résultat d'une soustraction d'un ensemble de points d'un ensemble initial qui en comportait de 1 à 8 (Fig. 3C et 3D). Le résultat était toujours assez petit pour pouvoir être nommé, mais les opérandes pouvaient être plus grandes (par ex. 6-4). Dans l'expérience principale les participants répondaient en indiquant le résultat correct parmi trois possibles (0, 1 ou 2 objets restants). Les résultats ont aussi été reproduits dans une seconde version où les participants énonçaient à haute voix le résultat de la soustraction (Fig. 3D).

Dans les deux tâches, nous avons observé une baisse rapide des performances avec la taille du nombre initial. Cette baisse était significative pour tous les groupes mundurucus, bien que la performance fût légèrement meilleure dans le groupe le plus bilingue et instruit, surtout lorsqu'il y avait moins de 5 points (voir Fig. 3D). Cependant, tous les groupes mundurucus ont eu une performance nettement moins bonne que celle du groupe contrôle français, où la performance n'était que légèrement affectée par la taille des nombres.

L'échec des Mundurucus dans la soustraction exacte n'était pas dû à un malentendu sur les instructions, puisqu'ils montraient des performances supérieures au hasard et en fait proches du maximum lorsque le nombre initial était inférieur à 4. Leur succès avec ces petits nombres pourrait

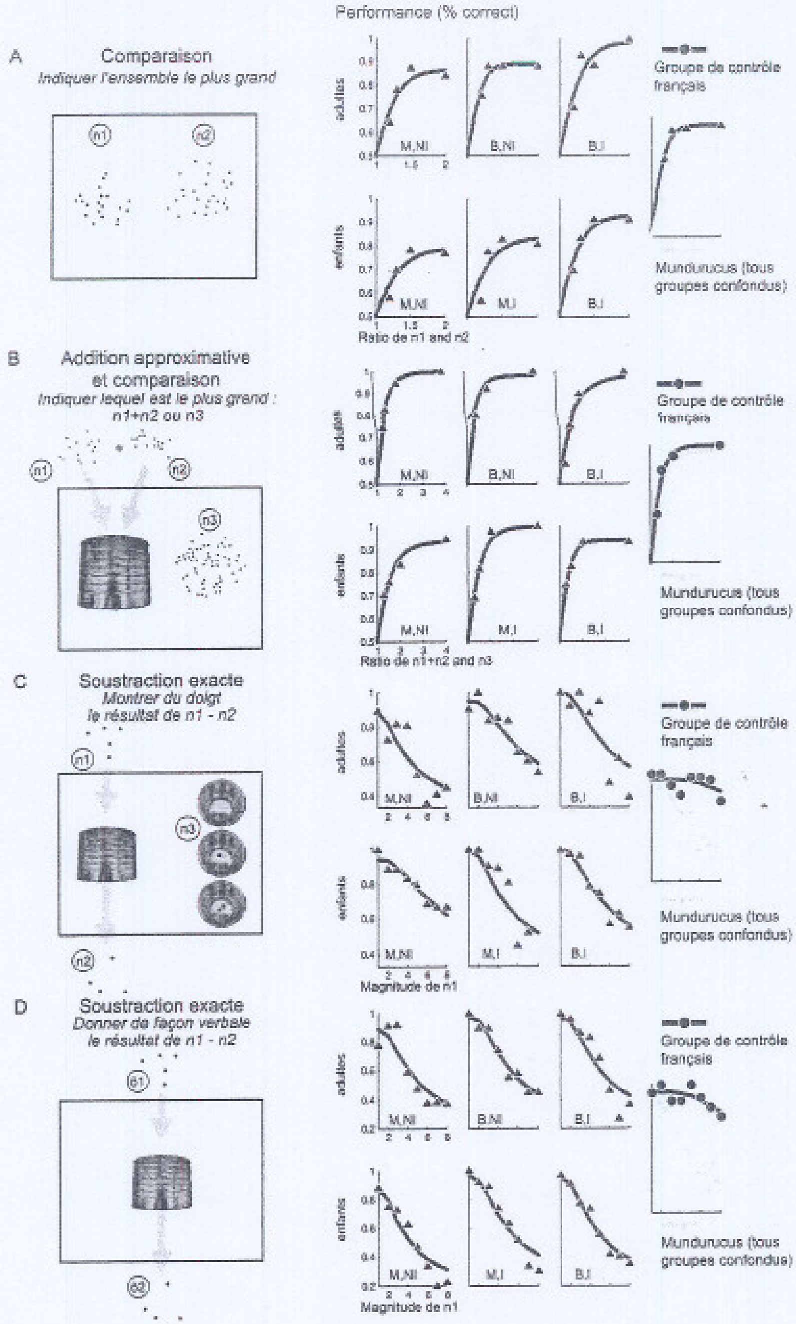


Figure 3. Performance dans quatre tâches d'arithmétique élémentaire. Dans chacun des cas, la colonne de gauche illustre un exemple d'essai (un film montrant certains des stimuli est disponible sur internet à l'adresse : www.rap.prd.fr/ressources/vod.php?videotheque=cnrs/grci). Les graphiques de droite montrent la proportion d'essais corrects, dans chaque groupe séparément (M = monolingues, B = bilingues, NI = non instruits, I = instruits) ainsi que la moyenne de l'ensemble de tous les participants mundurucus et français (graphiques à droite). Le plus bas niveau sur l'échelle correspond toujours à la performance attendue si les participants répondaient au hasard. Pour les comparaisons de nombres (les deux graphiques d'en haut), la variable pertinente qui détermine la performance est la distance entre les deux nombres, mesurée par le rapport du plus grand au plus petit (par ex. n1/n2 si n1 > n2, n2/n1 sinon). Pour les soustractions exactes (les deux graphiques d'en bas), la variable pertinente est la grandeur du nombre initial n1. Les ajustements de courbes sont basés sur les équations mathématiques décrites dans l'information complémentaire en anglais, disponible sur le site : http:/www.sciencemag.org/cgi/content/full/306/5695/499.

refléter leur codage verbal exact, ou une individuation non verbale parallèle des petits ensembles, telle qu'on la rencontre chez les petits enfants au stade pré-verbal (13) et chez les primates non humains (14). La performance était également supérieure au hasard pour des valeurs plus élevées du nombre initial (par ex. 49,6 % correct pour des problèmes 8-*n*, hasard = 33,3 %, $p < 0{,}0001$). Toute la courbe de performance sur l'intervalle 1-8 pouvait être ajustée à l'aide d'une simple équation psychophysique qui suppose un encodage approché gaussien des quantités initiales et soustraites, suivi par la soustraction de ces grandeurs internes et la classification du résultat flou dans les catégories de réponse proposées (0, 1 ou 2). Ainsi les Mundurucus ont-ils encore eu recours à des représentations approchées, sujettes à la loi de Weber, dans une tâche que le groupe contrôle français résolvait facilement par calcul exact.

De façon générale, nos résultats apportent un peu de lumière sur la question de la relation entre la langue et l'arithmétique. Ils indiquent qu'une distinction fondamentale doit être introduite entre les représentations mentales approchée et exacte des nombres, comme l'ont suggéré d'autres études comportementales et d'imagerie cérébrale (12, 18) et des recherches récentes chez un autre groupe amazonien, les Pirahã (23).

Avec des quantités approximatives, les Mundurucus n'ont pas un comportement qualitativement différent de celui du groupe contrôle français. Ils sont capables de se représenter mentalement de très grands nombres allant jusqu'à 80 points, bien au-delà de ceux qu'ils peuvent nommer, et ils ne confondent pas les nombres avec d'autres variables telles que la taille ou la densité des points. Ils appliquent aussi spontanément les concepts d'addition, de soustraction et de comparaison à ces représentations approchées. Ceci se vérifie même pour les adultes monolingues et les jeunes enfants qui n'ont jamais appris aucune arithmétique formelle. Ces données ajoutent aux indications précédentes selon lesquelles l'approximation numérique est une compétence fondamentale, indépendante du langage et accessible même aux enfants au stade pré-verbal et à de nombreuses espèces animales (6, 13-16).

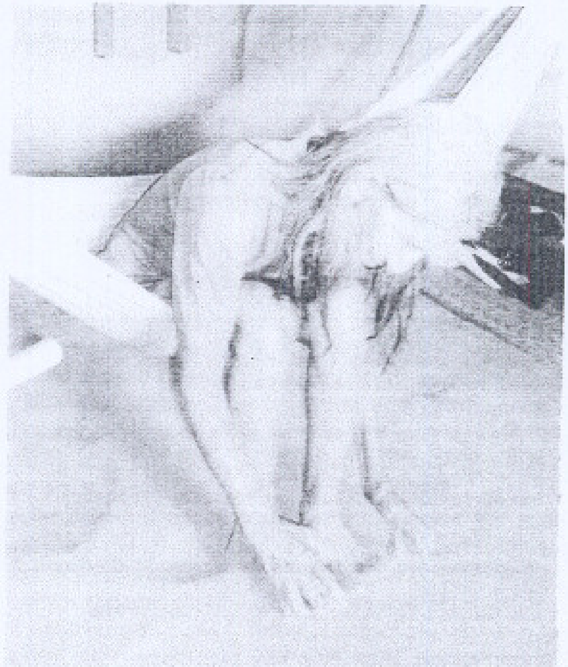
Nous en concluons qu'une compétence numérique sophistiquée, bien qu'approximative, peut exister en absence d'un lexique de nombres bien développé. Ce résultat nuance de façon importante la version de l'hypothèse de Whorf que soutient Peter Gordon (23), selon lequel les capacités cognitives des indigènes sont « incommensurablement différentes des nôtres ».

Ce qui paraît manquer aux Mundurucus, c'est une procédure pour l'appréhension rapide des nombres exacts au-delà de 3 ou 4. Nos résultats appuient donc l'hypothèse selon laquelle le langage joue un rôle particulier dans l'émergence d'une arithmétique exacte au cours du développement de l'enfant (9-11). Quel est le mécanisme d'un tel changement développemental ? Il est remarquable que, bien que les Mundurucus aient un lexique pour les nombres jusqu'à 5, ils emploient ces noms de nombres de façon approximative. Ainsi, ni la disponibilité d'un lexique de noms de nombres approximatifs, ni celle du caractère récursif de la faculté de langage, en elles-mêmes, ne suffisent à promouvoir une représentation mentale du nombre exact.

Plus crucial peut-être est le fait que les Mundurucus ne disposent pas d'une routine de comptage. Bien que certains d'entre eux aient une capacité rudimentaire à compter sur les doigts, ils l'utilisent rarement. En exigeant un appariement biunivoque exact des objets avec la séquence de nombres, le comptage peut promouvoir une intégration conceptuelle des représentations approchées des nombres, des représentations des objets discrets, et du code verbal (10, 11). Vers l'âge de trois ans, les enfants occidentaux manifestent un changement brusque dans le traitement des nombres, lorsqu'ils réalisent soudain que chaque nom de nombre correspond à une quantité précise (9). Cette « cristallisation » des nombres discrets à partir d'un continuum initialement approximatif de grandeurs numériques ne semble pas se produire chez les Mundurucus. Sans doute requiert-elle non seulement la faculté de langage, mais également l'acquisition de la série des noms de nombres et de la routine de comptage.

En conclusion, quelles sont les implications de nos résultats pour l'hypothèse de Chomsky ? Ce dernier postulait que l'« infinité discrète », caractéristique essentielle de la faculté de langage, sert de fondement à l'acquisition du concept de nombre. Or, nos expériences n'ont porté que sur la possession d'un lexique de noms pour les nombres exacts. Bien entendu, les Mundurucus, en tant que membres de l'espèce humaine, disposent d'une langue et de la faculté de langage ou « grammaire universelle » au sens de Chomsky. Nos expériences ne permettent donc pas d'étudier l'impact de l'absence de la faculté de langage – mais seulement l'impact de l'absence d'un lexique des nombres exacts.

Quelle que soit la raison de cette limitation linguistique, nos résultats suggèrent que l'hypothèse chomskyenne d'un lien étroit entre compétence numérique et faculté de langage demande à être nuancée, en distinguant clairement nombre exact et nombre approché.



Femme mundurucu comptant à l'aide de ses doigts et orteils, Karapanatuba, 2005. © CNRS photothèque/Pierre Pica.

Tout d'abord, il faut admettre l'existence d'une représentation non verbale des nombres approchés, et d'une compétence réellement conceptuelle pour l'appréhension et la manipulation des quantités numériques approximatives. Cette compétence paraît totalement indépendante du langage dans la mesure où elle existe non seulement chez les Mundurucus et les nourrissons de l'espèce humaine, mais également chez de nombreuses espèces animales. Son existence n'avait pas été explicitement envisagée par Chomsky, qui s'est d'ailleurs peu prononcé sur les origines de la compétence arithmétique de l'espèce humaine. Toutefois, l'hypothèse d'un « sens du nombre » (un ensemble de circuits cérébraux qui nous permet de comprendre ce qu'est le cardinal d'un ensemble d'objets, et comment ce cardinal se modifie ou non en fonction des opérations appliquées à l'ensemble) est éminemment compatible avec l'esprit de l'approche chomskyenne, selon laquelle les compétences cognitives humaines reposent sur des systèmes modulaires spécialisés.

Nos résultats suggèrent également que la capacité de manipuler de grands nombres exacts n'existe que dans certaines cultures, dont la nôtre, qui se trouvent posséder un vaste lexique de noms de nombres exacts ainsi que des règles syntaxiques pour les combiner et engendrer une infinité de noms de nombres. Cet aspect de nos résultats paraît compatible avec l'hypothèse chomskyenne selon laquelle la capacité combinatoire du langage joue un rôle essentiel dans l'émergence de l'arithmétique. Cependant, il se pourrait que ce lien entre langage et calcul exact soit moins fondamental que ne le postule Chomsky. Selon notre hypothèse de travail, c'est le comptage rapide, rendu possible par la récitation rapide de la série infinie des noms de nombres, qui permet de réussir les tâches d'arithmétique exacte. L'effet du langage dans notre test de soustraction exacte ne concernerait donc, pour reprendre une autre distinction introduite par Chomsky, qu'une différence de performance – c'est-à-dire l'ensemble des facteurs qui déterminent la capacité de réussir la tâche demandée – plutôt qu'une authentique différence de compétence conceptuelle. La réussite à notre test dépendrait, non seulement de la maîtrise du concept de nombre exact (compétence arithmétique abstraite que les Mundurucus pourraient bien posséder), mais également d'autres facteurs que Chomsky qualifierait d'« externes », tels que la capacité de compter avec efficacité.

Pour tester cette hypothèse, il nous faut concevoir de nouveaux tests arithmétiques, qui mettent purement l'accent sur la compétence conceptuelle et non sur la capacité de résoudre des problèmes arithmétiques spécifiques. Cette question fait l'objet de nouvelles missions en Amazonie. Nos premiers résultats suggèrent effectivement que les Mundurucus possèdent une bonne connaissance conceptuelle du nombre exact, même s'ils ne parviennent pas toujours à la déployer avec rapidité dans des situations concrètes (33). Si ces résultats sont confirmés, l'universalité des compétences humaines, si souvent soulignée par Noam Chomsky, n'en sortirait que renforcée.

Traduction de l'anglais par Thierry van Steenberghe.

Ce texte est la traduction modifiée d'un article original paru en 2004 : Pica, P., Lemer, C., Izard, V., & Dehaene, S. (2004). « Exact and approximate arithmetic in an Amazonian indigene group », Science, *306 (5695), p. 499-503.*

Références bibliographiques et notes correspondant aux chiffres signalés dans le texte entre parenthèses

1. J. R. Hurford, *Language and Number*, Oxford, Basil Blackwell, 1987.
2. N. Chomsky, *Language and the problems of knowledge*, Cambridge, MIT Press, 1988, p. 169.
3. S. Dehaene, *The number sense*, New York, Oxford University Press, 1997.
4. C. R. Gallistel, R. Gelman, *Cognition*, 1992, 44, p. 43.
5. S. Dehaene, G. Dehaene-Lambertz, L. Cohen, *Trends Neurosci*, 1998, 21, p. 355.
6. L. Feigenson, S. Dehaene, E. Spelke, *Trends Cogn. Sci.*, 8, juillet 2004, p. 307.
7. P. Bloom, *How children learn the meanings of words*, Cambridge, MIT Press, 2000.
8. H. Wiese, *Numbers, language, and the human mind*, Cambridge University Press, 2003.
9. K. Wynn, *Cognition*, 1990, 36, p. 155.
10. S. Carey, *Science*, 1998, 282, p. 641.
11. E. Spelke, et S. Tsivkin, in *Language acquisition and conceptual development*, M. Bowerman, S. C. Levinson (éds.), Cambridge, Cambridge University Press, 2001, p. 70-100.
12. S. Dehaene, E. Spelke, P. Pinel, R. Stanescu, S. Tsivkin, *Science*, 1999, 284, p. 970.
13. K. Wynn, *Nature*, 1992, 358, p. 749.
14. G. M. Sulkowski et M. D. Hauser, *Cognition*, 2001, 79, p. 239.
15. A. Nieder et E. K. Miller, *Proc Natl Acad Sci USA*, 2004, 101, p. 7457.
16. E. M. Brannon et H. S. Terrace, *J. Exp. Psychol. Animal. Behav. Processes*, 2000, 26, p. 31.
17. E. S. Spelke et S. Tsivkin, *Cognition*, 2001, 78, p. 45.
18. C. Lemer, S. Dehaene, E. Spelke, L. Cohen, *Neuropsychologia*, 2003, 41, p. 1942.
19. S. Dehaene, L. Cohen, *Neuropsychologia*, 1991, 29, p. 1045.
20. H. Barth, N. Kanwisher et E. Spelke, *Cognition*, janv. 2003, 86, p. 201.
21. J. Whalen, C. R. Gallistel et R. Gelman, *Psychol. Sci.*, 1999, 10, p. 130.
22. B. Butterworth, *The Mathematical Brain*, Macmillan, Londres, 1999.
23. P. Gordon, *Science*, 2004.
24. C. Strömer, *Die sprache der Mundurukú*, Verlag der Internationalen Zeitschrift « Anthropos », Vienne, 1932.
25. M. Crofts, *Aspectos da lingua Mundurukú*, Summer Institute of Linguistics, Brasilia, 1985.
26. Une description des participants et des méthodes détaillées de nos expériences est disponible sur le site : http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/306/5695/499.
27. T. Pollmann et C. Jansen, *Cognition*, 1996, 59, p. 219.
28. R. S. Moyer et T. K. Landauer, *Nature*, 1967, 215, p. 1519.
29. P. B. Buckley et C. B. Gillman, *J. Exp. Psychol.*, 1974, 103, p. 1131.
30. La performance en comparaison demeurait bien au-dessus du hasard dans deux ensembles indépendants d'essais où les deux ensembles étaient égalisés soit sur des paramètres intensifs tels que la taille des points soit sur des paramètres extensifs tels que la luminance totale (voir chapitre Méthodes, 26 *supra*). Les sujets ne basaient donc pas leurs réponses sur un unique paramètre non numérique. Leur performance était pourtant moins bonne pour les paires appariées sur les paramètres extensifs (88,3 % de réponses correctes contre 76,3 %, $p < 0{,}0001$). Nous ignorons l'origine de cet effet, mais il est vraisemblable que, comme les sujets occidentaux, les Mundurucus estiment un nombre par une relation simple telle que la surface totale occupée sur l'écran divisée par l'espace moyen autour des objets, qui peut être affectée par divers biais (voir J. Allik et T. Tuulmets, *Perception & Psychophysics*, 1991, 49, p. 303).
31. La performance est restée au-dessus du hasard pour les ensembles appariés sur les paramètres tant intensifs qu'extensifs (respectivement 89,5 et 81,8 % de réponses correctes, les deux avec $p < 0{,}0001$). Bien que cette différence dans les ensembles de stimulus était à nouveau significative ($p < 0{,}0001$), elle était identique chez les sujets mundurucus et français. De plus, la performance était significativement au-dessus du hasard pour une vaste majorité des items (44/51), et n'était jamais significativement en-dessous du hasard, ce qui rend improbable que les participants aient utilisé un raccourci simple autre que l'addition mentale. Par exemple, ils n'ont pas simplement comparé n1 avec n3 ou n2 avec n3, parce que lorsque n1 et n2 étaient tous deux inférieurs à n3, ils distinguaient encore avec précision si leur somme était supérieure ou inférieure au nombre n3 proposé, même lorsque les deux différaient de 30 % seulement (respectivement 76,3 et 67,4 % de réponses correctes, les deux avec $p < 0{,}005$).
32. Ce travail a été conduit dans le cadre d'un projet plus vaste sur la nature de la quantification et les catégories fonctionnelles, développé en partenariat avec la section de linguistique du département d'anthropologie du Muséum national de Rio et l'Unité mixte de recherche 7023 du CNRS, avec l'accord de Funaï et du CNPQ.
    Il a été soutenu par l'INSERM, le CNRS, le ministère français des Affaires étrangères (P.P.) et une bourse de la Fondation McDonnell (S.D.). Nous avons apprécié les discussions avec Elizabeth Spelke et Manuela Piazza, ainsi que les avis constants d'André Ramos, et nous remercions Venancio Poxõ, Celso Tawe et Francisco de Assis pour leur aide au cours des tests.
33. V. Izard, « Interactions entre les représentations numériques verbales et non verbales : Étude théorique et expérimentale », Université de Paris-VI, Paris, 2006.