

Les couronnes de Minos

DENNIS SHASHA

À la recherche d'une stratégie pour éviter de finir dévoré tout cru par le terrible Minotaure.

Dans l'*Énéide* de Virgile, le Minotaure, être mi-homme mi-taureau, est le fils de Pasiphaé, épouse du roi crétois Minos, et d'un taureau envoyé par Poséidon. Pour le cacher aux yeux du monde, Minos enferme le Minotaure dans un labyrinthe construit par Dédale. Le Minotaure se nourrit de chair humaine, notamment des sept jeunes gens et des sept jeunes filles qu'Athènes paie annuellement en tribut à Minos.

Notre histoire se déroule avant que Thésée, le fils d'Égée, ne vienne à bout du monstre, avec le concours d'Ariane, la demi-sœur du Minotaure, et de son célèbre fil.

Le roi Minos parle à trois prisonniers qu'il se propose de sacrifier au Minotaure : «Vous savez évidemment que vous périrez si je vous livre au Minotaure sans armes. Je vous propose donc une alternative, une sorte de sursis. Demain matin, mes gardes vous banderont les yeux. Puis, ils vous coifferont d'une couronne. La couleur de cette couronne – bleue ou rouge – dépendra du résultat du jet d'un drachme. Enfin, vous serez guidés chacun dans un coin de mon nouveau stade triangulaire.»

«Une fois sur le stade, dont je ne sais pas encore à quel sport il servira, le garde qui vous escorte vous ôtera le bandeau, et chacun de vous verra la couronne de ses deux codétenus sans voir la sienne. Il va sans dire qu'il vous sera interdit de communiquer. Si l'un de vous venait à désobéir, le garde lui couperait immédiatement la tête.»

«Voici le jeu que je vous propose (avez-vous vraiment le choix ?) : vous disposerez de 10 secondes pour dire au garde la couleur de votre couronne ou bien dire "je passe". Après 15 secondes, si vous avez trouvé la bonne couleur, le garde

pointera son pouce vers le haut ; si vous avez perdu, le garde orientera son pouce vers le bas ; si vous avez passé, le garde montrera sa main à plat.»

«Mais attention, si vous passez tous les trois, vous nourrirez tous le fils de ma femme infidèle. Si tous ceux qui ont choisi une couleur ont désigné la bonne, vous serez libres tous les trois. Si l'un de ceux qui a parié perd, vous servirez tous de dîner.»

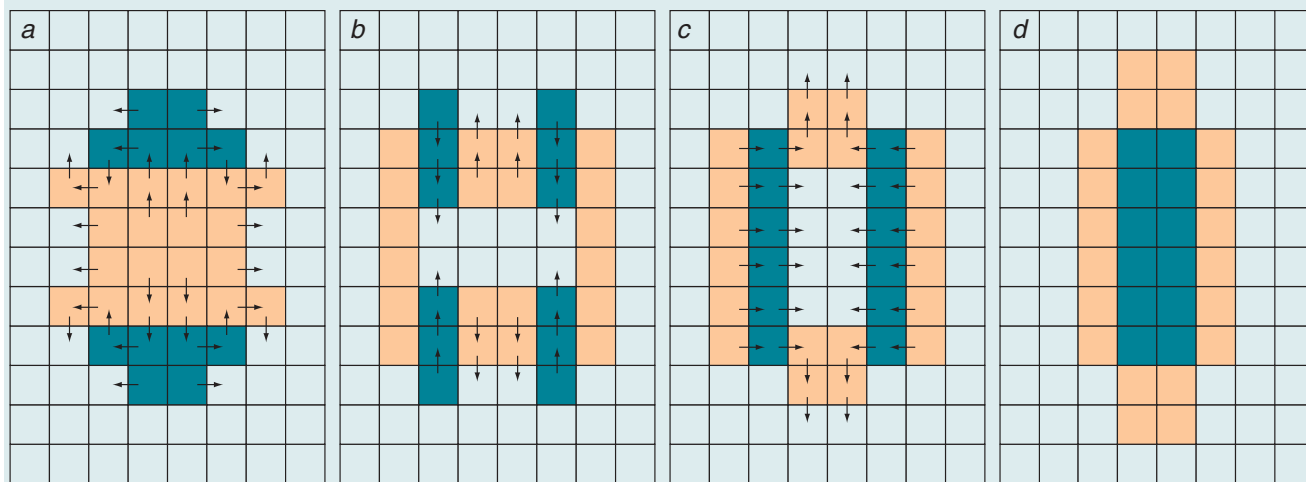
(Pour vous aider. Quelle est la probabilité que les prisonniers gagnent si ils parient tous trois au hasard ? Réponse : $1/8$, car chacun a une chance sur deux de perdre.)

Le roi fait mine (à tort) de partir, puis se ravise et, dans un élan de magnanimité, dit aux prisonniers : «Vous pensez sans doute que avez tous 50 pour cent de chance de survivre en désignant un seul d'entre vous comme parieur, tandis que les deux autres passeront. Cependant, grâce à un raisonnement plus subtil, vous découvrirez une stratégie qui augmente vos chances jusqu'à 75 pour cent. Cette stratégie requiert une règle que chaque prisonnier doit suivre. Quelle est cette règle?»

La solution de l'énigme sera donnée le mois prochain, et sera bientôt disponible sur le site Internet : www.pourlascience.com



Solution du problème d'énigmatics du numéro 287



POUR LA SCIENCE

vous fait découvrir toujours
plus d'actualités
scientifiques



Abonnez-vous !

Pour la Science + Les Dossiers
12 numéros 4 numéros

Soit
les Dossiers
offerts !

1 an • 76 €

Recevez chaque mois votre magazine en version papier et consultez sa version numérique
en format PDF sur www.pourlascience.fr

BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner accompagné de votre règlement à :
Service Abonnements • Pour la Science
8, rue Férou • 75278 Paris cedex 06

☐ Oui, je m'abonne à *Pour la Science* (12 n°s et leur version numérique) + *les Dossiers* (4 n°s et leur version numérique)

1 an • 76 € au lieu de 102,50 € Participation aux frais de port : Europe (hors France) 16 € par an, autres pays 35 € par an.

☐ Oui, je m'abonne à *Pour la Science* seul (12 n°s et leur version numérique)

1 an • 56 € au lieu de 74,70 € Participation aux frais de port : Europe (hors France) 12 € par an, autres pays 25 € par an.

☐ Oui, je m'abonne à *Pour la Science* version web (12 n°s)

1 an • 48 €

☐ J'accepte de recevoir par e-mail des informations de *Pour la Science*

☐ J'accepte de recevoir par e-mail des informations des partenaires commerciaux de *Pour la Science*

Mes coordonnées (à remplir) :

Nom, prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____

Pays : _____ Tél.** : _____

E-mail** : _____

Je règle par :

☐ Chèque à l'ordre de *Pour la Science*

☐ Carte bancaire

Numéro de la carte _____

Date d'expiration _____

Code de sécurité*** _____

Signature obligatoire



En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-contre sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès de Pour la Science. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'autres organismes. En cas de refus de votre part, il vous suffit de nous prévenir par simple courrier.
* prix en kiosque ** facultatif *** Merci d'inscrire les 3 chiffres figurant au dos de votre carte

PLS397



Pourquoi calculons-nous si difficilement?

JEAN-PAUL DELAHAYE

Notre cerveau, pourtant plus puissant que le plus gros des ordinateurs, calcule très mal. Nous allons en souffrir avec l'arrivée de l'euro...

Ne pouvant me fier à mon raisonnement, j'ai appris par cœur tous les résultats possibles de toutes les multiplications possibles...

Eugène Ionesco, *La leçon*.

Le passage à l'euro inquiète car nos capacités de calcul mental sont limitées. Les questions sont, pourquoi calculons-nous aussi mal, pourquoi les ordinateurs nous sont-ils supérieurs? Pour y répondre, examinons ce que nous entendons par «calcul».

En informatique on dénomme *calcul* toute opération sur des symboles, numériques ou non : classer une liste de mots par ordre alphabétique, diviser en deux un paquet de cartes en plaçant d'un côté les rouges et de l'autre les noires, reproduire une image en réduisant sa taille de moitié, sont des calculs. Un ordinateur, quand il exécute de telles

tâches, procède uniquement par des opérations élémentaires utilisant des 0 et des 1, que l'on dénomme des opérations de calcul booléen.

Le cerveau humain, lorsqu'il travaille pour effectuer des opérations (conduire une voiture, mener une conversation, créer une œuvre d'art, etc.) fait lui aussi des calculs que les neurones exécutent en faisant circuler l'influx nerveux et en échangeant des messages chimiques. Personne ne doute aujourd'hui que, si nous l'observions à un niveau assez fin, nous verrions que le fonctionnement du cerveau se ramène à un très grand nombre de calculs élémentaires booléens.

Cette façon de concevoir le cerveau comme un ordinateur particulier nous amène à comparer les puissances de calcul : le cerveau exécute chaque seconde entre 10^{13} et 10^{19} opérations élémentaires. Or nous disposerons d'ici 30

ans au plus tard, d'ordinateurs aussi puissants que le cerveau humain, c'est-à-dire capables de réaliser autant d'opérations élémentaires de calcul que le cerveau humain : en 2030 nous serions en mesure de simuler complètement un cerveau.

La notion de *calcul abstrait*, utilisée pour désigner tout ce qui se ramène à du calcul booléen, est apparue avec les premières machines électroniques dans les années 1930 et 1940 et a été mathématisée par les travaux des théoriciens dont Claude Shannon et Alan Turing. Plus ancienne est la notion de *calcul numérique* : additionner 173 et 518, extraire la racine carrée de 83837, évaluer 2^{30} , etc. Or, le cerveau humain bien que disposant d'une puissance de *calcul abstrait* phénoménale (que, répétons-le, même les plus gros ordinateurs actuels n'atteignent pas) produit une puissance de *calcul numérique* ridiculement faible et le pourquoi de ce mystère n'est pas compris aujourd'hui.

Contrairement aux ordinateurs qui savent traduire leur puissance de *calcul abstrait* en puissance de *calcul numérique*, le cerveau humain n'en est pas capable. Nous nous émerveillons des exploits des calculateurs prodiges dont les capacités de calcul numérique n'égale même pas celles des calculatrices de poche à cinq euros qu'on trouve dans les épiceries et les grandes surfaces!

Cette situation paradoxale résulte sans doute de la spécialisation du cerveau humain qui s'est développée et a évolué aux cours des millénaires pour traiter un ensemble de problèmes vitaux : analyser les signaux qui lui proviennent de son environnement par les sens, commander et coordonner les différentes parties du corps, communiquer avec les autres membres de l'espèce humaine, etc. Contrairement à ce que notre orgueil nous incite à croire, la plasticité de notre esprit, notre capacité à nous adapter à de nouveaux problèmes sont limitées. Malgré tous nos efforts, notre cerveau reste inapte

1. TRUC DE CALCULATEURS PRODIGES

Les calculateurs prodiges utilisent souvent des trucs qui accroissent l'effet produit sur les spectateurs de leurs exploits. En général aussi ils s'astreignent à des entraînements réguliers... le tout pour des performances inférieures à celles de la plus petite calculatrice.

Voici un exemple de truc utilisé par le calculateur prodige Arthur Griffith mort en 1911 à l'âge de 31 ans. Notons qu'il omit de mentionner cette méthode dans l'ouvrage qu'il écrivit pour expliquer ses techniques de calcul mental.

Le nombre 142 857 143 est proposé par le calculateur (ou par un comparse) et un autre nombre de neuf chiffres est demandé au public, qui donne par exemple 123 456 789. Le calculateur réfléchit quelques secondes et indique que le produit des deux nombres est : 17 636 684 160 493 827, ce que le public vérifie péniblement. Comment a fait le calculateur prodige ?

RÉPONSE

Griffith ne faisait pas mentalement la multiplication (ce qui demande plusieurs minutes même aux plus forts des calculateurs prodiges) il ne faisait que diviser par 7 le nombre 123 456 789 123 456 789 (c'est le nombre de dix-huit chiffres obtenu en répétant deux fois le nombre de neuf chiffres proposé par le public). Cette opération est nettement plus facile et avec un peu d'entraînement tout le monde peut la réussir.

Le truc est que le nombre 142 857 143 est égal à $1\,000\,000\,001$ divisé par 7. Donc : $142\,857\,143 \times 123\,456\,789 = (1\,000\,000\,001 \times 123\,456\,789) / 7 = 123\,456\,789\,123\,456\,789 / 7$

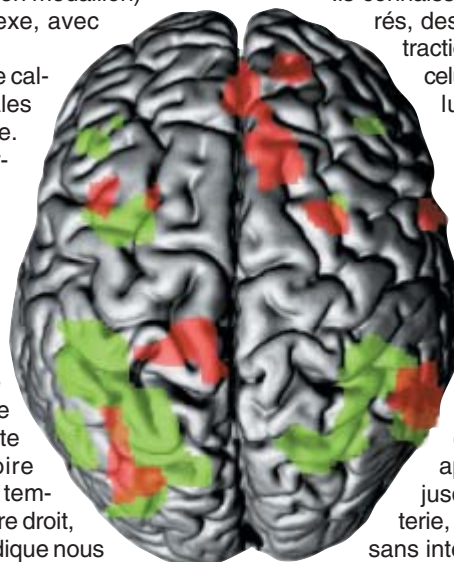
2. CALCULATEUR PRODIGE ET MÉMOIRE

Récemment, l'équipe de Nathalie Tzourio du groupe l'imagerie neuro-fonctionnelle du CNRS de Caen en collaboration avec celle du neuropsychologue Mauro Pesenti de l'Université Catholique de Louvain à l'aide d'un tomographe à émission de positons (qui permet de connaître avec précision les débits sanguins des diverses parties du cerveau) ont comparé le fonctionnement du cerveau du



calculateur prodige Rüdiger Gamm (en médaillon) en train de mener un calcul complexe, avec celui d'une personne normale.

Chez les calculateurs normaux, le calcul s'effectue dans les aires pariétales et frontales de l'hémisphère gauche. Ces zones (*en vert*), traitent les informations spatiales et sont le siège de la mémoire de travail, où les résultats intermédiaires d'un calcul complexe sont stockés lors de sa réalisation. Cette mémoire a une petite capacité et les nouvelles informations y chassent immédiatement les anciennes. Le calculateur prodige Rüdiger Gamm, d'après l'étude menée, n'utilise pas seulement cette zone, mais utilise aussi sa mémoire épisodique (localisée dans les aires temporales et préfrontales de l'hémisphère droit, *en rouge*). Grâce à la mémoire épisodique nous



nous souvenons, pendant plusieurs jours, des événements de notre vie (le repas de ce matin, quelles personnes nous avons rencontré hier, etc.). C'est une reprogrammation du calcul qu'a effectué le calculateur prodige et ces expériences confirment ce que l'on savait déjà sur les calculateurs prodiges.

En plus de trucs permettant des effets faciles ces calculateurs s'entraînent longuement et apprennent par cœur un grand nombre de données. Souvent par exemple ils connaissent les tables de multiplication jusqu'à 100 et parfois même jusqu'à 1 000.

Ils connaissent aussi les tables des carrés, des cubes ce qui rend plus facile l'extraction des racines. Leur don est parfois plus celui de la mémoire que celui du calcul, acquis, lui, par des efforts persévérants durant des séances d'entraînement de plusieurs heures par jour pour nombres d'entre eux.

Alexander Aitken (1895-1967) fut sans doute le plus fantastique calculateur prodige du XX^e siècle (ci-dessus). Professeur de mathématiques à l'Université d'Édimbourg sa mémoire des chiffres était déconcertante. Il avait appris les 707 décimales de π calculées à la main par W. Shanks en 1873. Lorsqu'on découvrit que ces décimales étaient fausses à partir de la 528-ème, il apprit les nouvelles décimales et poussa jusqu'à la millième, précisant, avec coquetterie, qu'il «ne se serait pas astreint à cet exploit sans intérêt si cela n'avait pas été très facile».



à mener des opérations numériques volumineuses et, plus généralement, à exécuter tout calcul algorithmique un tant soit peu complexe.

Deux types de machines à traiter de l'information coexistent aujourd'hui :

- les cerveaux biologiques, très puissants si l'on considère la puissance cumulée de leurs composants élémentaires, mais spécialisés et étrangement incapables de faire des calculs numériques ou algorithmiques de manière fiable ;
- les ordinateurs et leurs dérivés électroniques (consoles de jeux, lecteurs de CD-DVD, téléphones portables, etc.), bien moins puissants, mais capables d'opérer des additions entre grands nombres, d'extraire instantanément des racines cinquièmes, de factoriser des nombres de cent chiffres, de classer en quelques secondes des listes de centaines de mots, de décompresser des images ou des sons, d'échanger des volumes importants de données, etc.

Les auteurs de science-fiction imaginent qu'un jour nous suppléerons aux terribles faiblesses de notre organe de traitement de l'information en lui adjoi-

gnant, directement connecté à notre cerveau par quelques électrodes bien disposées dans notre boîte crânienne, une calculatrice électronique que nous pourrions invoquer par de simples commandes mentales. En attendant, il est intéressant de nous interroger sur les raisons qui font que notre cerveau est un si piètre calculateur numérique et qu'il reste inégalé pour tant de tâches nobles et qualifiées d'«intelligentes».

Les résultats d'Alan Turing sur les calculateurs universels semblent aussi indiquer que notre cerveau est d'un point de vue théorique un mécanisme peu puissant. Alan Turing a en effet établi que dès qu'un mécanisme de calcul sait exécuter et combiner un certain nombre d'opérations élémentaires, ce mécanisme est en mesure d'exécuter tout algorithme imaginable : être un *calculateur universel* est relativement facile et nos ordinateurs en sont tous, bien évidemment.

Notre cerveau, malgré sa complexité et sa colossale capacité en calculs élémentaires, du fait de son incapacité à mener de manière fiable de longs enchaînements d'opérations n'est pas un cal-

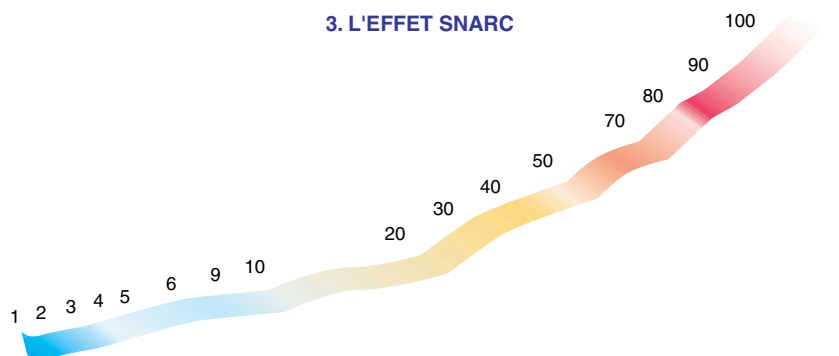
culateur universel : il est *concrètement* très puissant, mais *en théorie* n'atteint pas ce palier facile qui en ferait une machine apte à l'exécution de toute procédure programmable !

LA PERCEPTION DES NOMBRES

Stanislas Dehaene, spécialiste de sciences cognitives et auteur d'un excellent ouvrage (*La bosse des maths*, Éditions Odile Jacob, Paris, 1997) a étudié le fonctionnement du cerveau calculateur et a, en particulier, noté une caractéristique étonnante de notre perception des nombres ; en hommage à Lewis Carroll il a dénommé l'effet SNARC.

Cette caractéristique, dont rien d'équivalent n'existe dans un ordinateur, est que notre représentation des nombres se fait sur une ligne mentale orientée de gauche à droite : les petits nombres étant à gauche et les plus grands à droite. Cette orientation, l'effet SNARC, a de nombreuses conséquences pratiques dans nos activités de calcul : elle les facilite parfois, mais souvent les perturbe.

3. L'EFFET SNARC



Stanislas Dehaene a mis en évidence une caractéristique étonnante de notre perception des nombres qu'en hommage à Lewis Carroll il a appelé l'effet SNARC pour *Spacial-Numerical Association of Response Codes* (Association spacio-numérique des codes de réponses) : notre représentation des nombres se fait sur une ligne mentale orientée de gauche à droite, les petits nombres étant placés à gauche et les plus grands à droite. De plus sur cette ligne mentale les nombres occupent une place d'autant plus importante qu'ils sont petits. Certaines personnes visualisent cette représentation sous la forme d'un ruban coloré et onduyant.

Dès que nous voyons écrit un nombre ou un chiffre notre cerveau fait le lien avec sa position sur cette ligne mentale orientée. De multiples expériences prouvent cette association que nous ne contrôlons pas. Par exemple, si nous demandons à des sujets d'indiquer, dans une paire de chiffres écrits dans des polices de caractères de tailles variées (1-3, 2-5, 4-9) etc, lequel des deux chiffres a la plus grande taille, alors les temps de réponse sont bien meilleurs lorsque les deux chiffres d'une paire ont des tailles correspondant à ce qu'ils désignent (comme 2-5, 1-7) que lorsque ce n'est pas le cas (comme 1-3, 4-9). Impossible d'oublier ce que représentent les nombres!

Dans une expérience très simple qu'il réalisait avec des sujets humains à qui on proposait de classer des nombres par rapport à 65, Stanislas Dehaene remarqua que si on demandait aux sujets d'appuyer sur un bouton placé à gauche à chaque fois que le nombre présenté était plus petit que 65 et sur un bouton placé à droite à chaque fois que le nombre présenté était plus grand que 65, on obtenait des temps de réponse nettement meilleurs que lorsqu'on inversait le rôle des boutons (celui de droite pour les nombres inférieurs à 65 et celui de gauche pour les nombres supérieurs). Lorsqu'on demande à un sujet de distinguer des nombres pairs ou impairs, ou si des nombres ont des graphies symétriques ou non, l'effet reste le même : les réponses qui doivent être données par le bouton de droite sont données plus rapidement si le nombre est grand que s'il est petit, et inversement pour le bouton de gauche.

Des propriétés de cette représentation orientée des nombres dans notre cerveau ont été établies. L'association n'est pas liée aux mains elles-mêmes : si on demande au sujet testé de croiser les mains (de façon à ce qu'il appuie sur le

bouton de gauche avec la main droite et inversement) c'est toujours le bouton droit qui est rapide pour les grands nombres et lent pour les petits. Les gauchers possèdent la même ligne numérique mentale orientée de gauche à droite. En revanche, des expériences menées avec des Iraniens (qui lisent et écrivent de droite à gauche), montrèrent que pour ceux d'entre eux qui n'avaient pas été trop exposés à la culture occidentale, l'association était inversée : les petits nombres étant placés à droite sur leur ligne numérique mentale et les plus grands à gauche. La ligne mentale numérique n'est donc pas innée mais le résultat d'une construction culturelle et sociale qui s'installe très tôt puisqu'on a remarqué que dans les écoles maternelles américaines les jeunes enfants exploraient leur environnement de gauche à droite tandis que dans les pays où les enfants apprennent à lire de droite à gauche, ils explorent de même leur environnement.

Notre ligne numérique mentale est par ailleurs graduée de manière logarithmique : l'espace occupé par les nombres diminue au fur et à mesure que les nombres deviennent plus grands.

Une lumineuse expérience mettant en évidence cette inégalité d'espace occupé par les nombres est la suivante : on demande à une personne d'indiquer parmi deux nombres lequel est le plus petit et on mesure le temps nécessaire à cette comparaison (ainsi que le taux d'erreur). On constate alors qu'il faut moins de temps pour comparer 4 et 5 que 13 et 14, qui demandent moins de temps que 58 et 59. Les taux d'erreurs sont aussi plus grands quand les nombres augmentent. Des jeunes mathématiciens élèves de l'École normale supérieure et des élèves de l'École polytechnique à qui on faisait passer ce test ont été fascinés par la constatation que, même prévenus, il leur fallait plus de temps pour répondre à une question concernant 8 et 9 que 3 et 4. Pour Stanislas Dehaene « il y a quelque part dans nos circonvolutions cérébrales une représentation des nombres sous forme de quantités continues et c'est cette représentation quantitative que nous nous empressons de réactiver dès que nous voyons un chiffre ou un nombre ».

La comparaison des nombres de deux chiffres confirme cette idée. Alors qu'il est, en théorie, plus facile de voir que 65 est inférieur à 71 (car leurs premiers chiffres diffèrent et que c'est suffisant pour les classer) en réalité dans les tests de classement on découvre qu'il faut presque le même temps pour comparer 69 et 65 que 65 et 71 : le cerveau semble comprendre un nombre de deux chiffres globalement comme une quantité continue et non pas comme une juxtaposition de deux symboles dont la prise en considération du premier, si c'est un 7, permet déjà de savoir qu'il est plus grand que 65. Un autre test consiste à proposer à une personne de mémoriser une suite de chiffres, par exemple 6, 9, 7, 8. On lui demande ensuite si 5 était dans la liste, on lui demande si 1 était aussi dans la liste. Le temps pris pour 5 est systématiquement plus long que pour 1. Cette représentation déformée des nombres sur la ligne mentale numérique a une autre conséquence : si l'on vous demande de choisir au hasard, comme pour un tirage du Loto des nombres entre 1 et 50, les nombres que vous proposerez (par exemple dans une série de cent essais) comporteront une sur-représentation des petits nombres comparés aux grands nombres.

Malgré tous les efforts que vous tenterez pour contrer ces effets, jamais vous ne parviendrez à reprogrammer votre cerveau pour qu'il se libère de cette représentation orientée, linéaire, déformée et donc perturbante des nombres. Dans le cas des nombres aléatoires, vous pouvez bien sûr éviter de mentionner les petits

nombres, mais jamais vous ne réussirez à simuler un processus de choix aléatoire équilibré, voir sur ce sujet la rubrique de septembre 1999 «L'intelligence humaine à nouveau dominée?».

HOMMES ET FEMMES

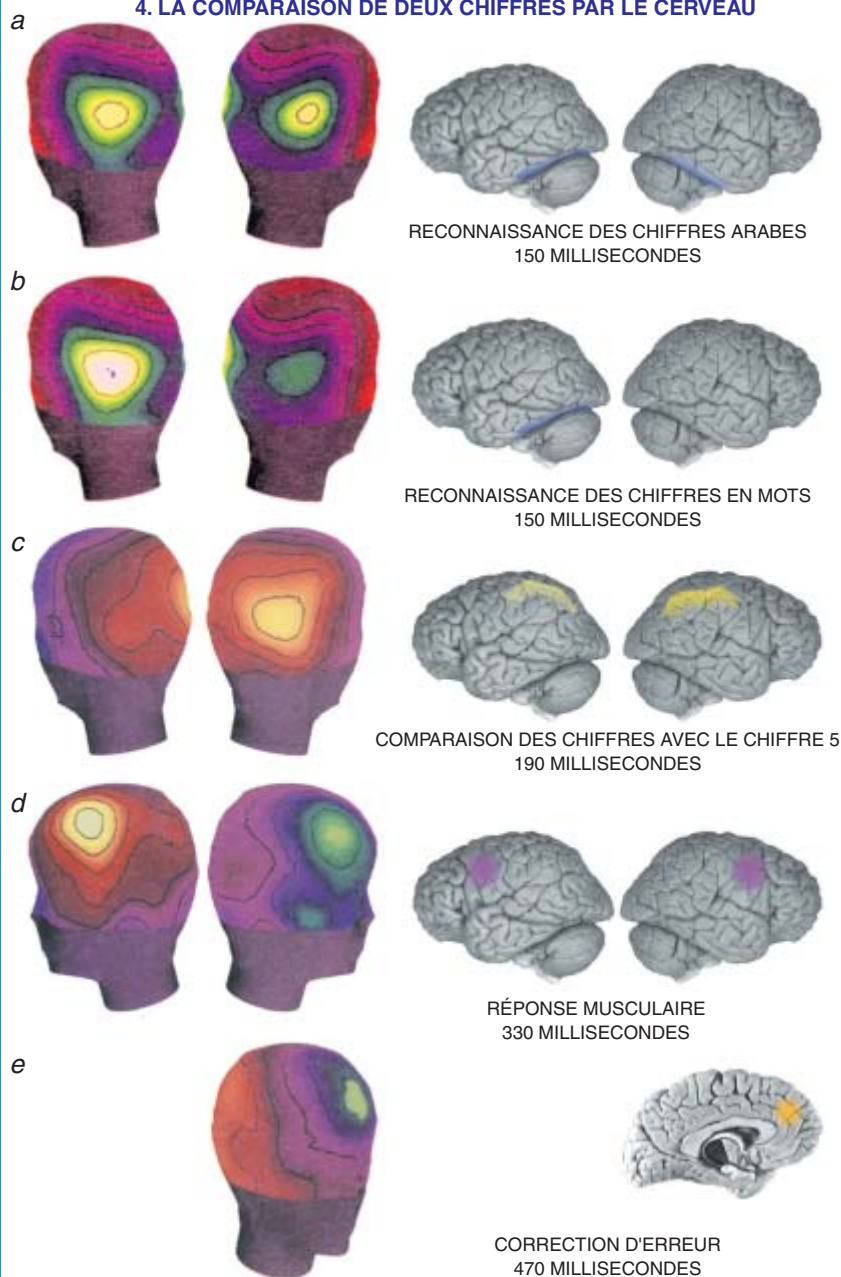
Ces propriétés particulières de nos cerveaux confrontés à des tâches numériques et algorithmiques expliquent en partie nos faibles capacités à maîtriser de longues séries d'opérations : les opérations arithmétiques ne sont pas *programmées* directement à partir de calculs booléens qu'effectueraient certains neurones spécialisés (quelques dizaines suffiraient), mais sont réalisés indirectement par des processus complexes impliquant vraisemblablement des milliards de neurones. Nos cerveaux apparaissent encore plus étranges et éloignés des ordinateurs à base de silicium lorsqu'on découvre le rôle que joue le sexe des personnes testées dans les performances en matière numérique et mathématique.

Sur le problème très controversé de la différence d'aptitudes des hommes et des femmes concernant des tâches de nature mathématique il semble maintenant que des résultats sont établis de manière certaine. Sans aller jusqu'à affirmer qu'il y a sur terre trois sortes de machines à manipuler de l'information et à faire des calculs (les ordinateurs, les cerveaux des hommes et les cerveaux des femmes), des tests convergents montrent que les cerveaux humains sont étrangement dépendants du sexe de leur propriétaire.

Alors que les femmes réussissent mieux en général les tests linguistiques, pour les tests d'*aptitude spatiale* (une forme de calcul géométrique) une différence nette en faveur des hommes a été établie par une multitude d'expériences. Le test des rotations mentales (un objet vous est présenté et vous devez le reconnaître lorsqu'on vous le montre sous divers points de vue) est l'un de ceux pour lesquels les résultats sont les plus clairs : les opérations géométriques nécessaires à ces travaux de reconnaissance sont menées avec plus d'efficacité et de réussites par les cerveaux masculins que par les cerveaux féminins.

Doreen Kimura dans un livre récent qui fait la synthèse de tous ces résultats (*Cerveau d'homme, cerveau de femme*, Éditions Odile Jacob, Paris, 2001, voir aussi *Pour la Science*, novembre 1992) évoque plusieurs hypothèses pour expliquer ces succès différents. La première hypothèse se fonde sur le fait que la division du travail dans les sociétés humaines et pré-humaines aurait exercé

4. LA COMPARAISON DE DEUX CHIFFRES PAR LE CERVEAU



Grâce à des appareillages spécialisés l'équipe de S. Dehaene a observé les étapes de calcul d'un cerveau en train de comparer des chiffres au chiffre 5. Les chiffres sont présentés au sujet, soit par leurs symboles (3, 7, 5), soit par leur nom écrit en toutes lettres (trois, sept, cinq). L'activité des régions cérébrales du cerveau est visualisée : 150 millisecondes après le début de la présentation, le chiffre ou le nom du chiffre est reconnu (a et b). Puis, 190 millisecondes après le début, la comparaison est faite dans la région pariétale inférieure. Plus tard (330 millisecondes) le mouvement du doigt pour appuyer sur le bouton correspondant à la réponse est visible (c), en (d) vers 470 millisecondes, la région cingulaire antérieure s'active lors d'une opération de contrôle (le sujet vérifie que le mouvement qu'il a entamé est le bon et l'interrompt s'il y a erreur). Ainsi le calcul dans un cerveau ne se fait pas de manière parallèle, mais de manière séquentielle, des zones de travail étant activées les unes après les autres, comme dans un ordinateur habituel. Toutefois, celui-ci calcule beaucoup plus vite. L'idée que le parallélisme permet de distinguer cerveaux et machines est trop simple : les opérations du cerveau comportent des séquences comme le calcul et certains aspects des calculs faits dans les ordinateurs contemporains sont parallèles.

5 MÉMOIRE À COURT TERME : POURQUOI UNE TELLE LIMITATION ?

La mémoire à court terme des humains est ridiculement faible et explique en partie notre incapacité à traiter de manière fiable de grandes quantités de calculs ou à effectuer des calculs algorithmiques de manière fiable.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11

MÉMORISATION EUROPÉENNE

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

MÉMORISATION CHINOISE

Chez un européen la capacité de cette mémoire est généralement de 7 chiffres. Assez curieusement chez les chinois elle est environ de neuf chiffres. L'explication semble tenir au fait que notre cerveau mémorise les séries de chiffres ou de nombres dans une mémoire auditive (ce qui explique d'ailleurs les confusions fréquentes faites entre six et dix dans les tests de mémorisation). La mémoire ne conserve les nombres que pendant deux secondes environ et en conséquence la capacité mnésique est liée à la brièveté du nom des chiffres. Les chiffres chinois sont brefs et peuvent se prononcer en moins d'un quart de seconde ce qui n'est pas le cas des noms des chiffres en français.

Finalement la faiblesse en calcul des humains serait due principalement à cette limitation de la mémoire à court terme que les calculateurs prodiges tentent de contourner en apprenant par cœur de nombreux résultats d'usage fréquent. Ce manque sera peut-être comblé un jour en «branchant» directement sur le cerveau une calculatrice avec un système de mémorisation complémentaire que nous pourrions commander mentalement.

une pression de sélection spécifique sur les individus masculins auxquels était dévolu le rôle de chasseur et qui devaient donc parcourir de grandes étendues à la recherche de leurs proies. Il était vital pour les mâles de posséder de bonnes capacités de navigation sur de longues distances et en particulier ils devaient être en mesure de reconnaître les scènes sous différents angles pour bien retrouver leur chemin. Une seconde hypothèse propose que les réussites supérieures des hommes, dans les tests de rotation mentale, sont dues à la fabrication des outils dont le rôle était préférentiellement confié aux hommes. L'avantage de l'homme aux tests de rotation mentale n'est pas spécifique à notre civilisation occidentale et il a été observé chez les peuples d'Afrique, de Jamaïque, et d'Asie. Chez les rats et certains singes des différences semblables entre mâles et femelles ont été établies, l'explication proposée étant que d'une manière assez générale chez les mammifères, le mâle recherche la nourriture en parcourant de grandes distances et est chargé de guider le groupe lorsqu'il se déplace.

Plus intéressantes encore, des études sur les méthodes utilisées par les hommes et les femmes pour mémoriser et retrouver leur chemin aboutissent à la même conclusion : les femmes utilisent plus facilement des objets ou structures (bâtiments particuliers, arbres, noms de rue, etc.) qu'elles mémorisent et recherchent ensuite pour reconstituer leur chemin, alors que

les hommes ont plutôt tendance à retenir les distances et l'orientation du parcours. Une femme mémorisera sa route en se rappelant «d'abord jusqu'au grand immeuble bleu, puis jusqu'au parc avec des grilles, et enfin jusqu'à la tour surmontée de drapeaux», alors que l'homme notera «tout droit pendant deux cents mètres, puis prendre à gauche et suivre la rue pendant cinq cents mètres jusqu'au carrefour où il faut tourner à droite et suivre la rue environ cent mètres». D'autres tests confirment d'ailleurs que la femme possède une meilleure mémoire pour l'emplacement des objets, que ce soit sur un parcours extérieur ou dans une maison.

Comme pour le calcul numérique, la tâche de refaire à l'envers un chemin parcouru précédemment est facile pour un ordinateur ou un robot qui (en appliquant la méthode masculine) mémoriseront un parcours mascule très long. La différence entre l'homme et la machine électronique est la capacité à mémoriser des informations formelles (par exemple une liste de cinquante indications du type «à droite, 50 mètres, à gauche, 20 mètres, etc.») de manière fiable. Très étrangement notre cerveau qui mémorise par ailleurs un nombre considérable d'informations n'est pas capable de retenir de longues listes de données symboliques ou numériques (combien de numéros de téléphones connaissez-vous par cœur?). Notre mémoire fonctionne d'une manière totalement différente de celle d'un ordinateur

et là encore on a du mal à comprendre pourquoi un organe aussi puissant se trouve gêné pour les tâches élémentaires de mémorisation : avec le cerveau humain le proverbe «qui peut le plus peut le moins» être contredit.

BONS TESTS ET BONNES NOTES!

À côté des aptitudes géométriques différentes entre hommes et femmes, un paradoxe étrange a été mis en évidence par plusieurs études : les garçons réussissent mieux les tests d'aptitudes aux mathématiques, alors pourtant que les filles obtiennent en classe de meilleures notes en mathématiques que les garçons (cet avantage des filles est vrai dans presque toutes les disciplines).

Le test SAT-Math (*Scholastic Aptitude Test-Mathematics*) a été utilisé dans un grand nombre d'expériences montrant une différence qui au cours des années se maintient à environ 0,5 écart type (ce qui signifie que l'écart moyen en faveur des garçons est d'environ la moitié de l'écart moyen général, ce qu'on considère comme statistiquement significatif). Ce test qui ne fait appel qu'au savoir faire de base et pose des problèmes que les personnes testées n'ont en général pas traités auparavant ne mesure pas l'apprentissage des concepts mathématiques, mais l'aptitude générale à traiter et à maîtriser des situations formelles.

La discussion sur l'interprétation de ces résultats est intéressante. Certains défendent bien sûr que la supériorité des scores des garçons provient de facteurs éducatifs et sociaux tels que l'attente différente des enseignants et des parents qui dès la plus petite enfance auraient modelé les cerveaux garçons et filles. Une telle interprétation semble cependant devoir être rejetée car elle conduirait aussi à ce que les notes des filles soient moins bonnes que celles des garçons, et à ce qu'une même différence se retrouve dans les tests d'aptitude verbale, ce qui n'est pas le cas. De plus, des études plus détaillées montrent que les filles sont en général meilleures en calcul arithmétique que les garçons qui eux dominent en résolution de problèmes. De telles différences, plus fines, ne sont pas connues des enseignants et des parents, on voit donc mal comment elles pourraient s'expliquer par des «attentes différentes». Par ailleurs, ces différences se retrouvent dans de nombreux groupes culturels et ethniques : au Japon, en Chine, aux USA, en Europe.

Quant à l'explication du fait que les jeunes filles ont de meilleures notes que les garçons y compris en mathématiques où les tests d'aptitude laissent attendre

des résultats inverses on s'interroge toujours. Est-ce que les femmes sont plus organisées et mettent en œuvre de meilleures méthodes de travail ? Est-ce simplement qu'elles travaillent plus et sont plus motivées pour obtenir des bonnes notes ? Ou encore, réussissent-elles mieux quand elles sont confrontées à des questions qui leur sont familières et dont des cas analogues leur ont déjà été expliqués ? Les spécialistes hésitent et ce sera sans doute l'un des objectifs des travaux à venir que de répondre.

Ces précisions outre qu'elles confirment que les différences entre hommes et femme sont profondes, montrent à nouveau que ce qui se passe dans un cerveau qui calcule n'a rien à voir avec ce qui se passe dans un ordinateur qui calcule. Les calculateurs prodiges aussi impressionnants que soient leurs exploits, ont des limites incroyablement inférieures à celles des ordinateurs : sans même évoquer la rapidité des calculs un être humain peut, dans des cas exceptionnels, mémoriser quelques dizaines de milliers de chiffres alors qu'un ordinateur d'aujourd'hui n'a pas de mal à en mémoriser plusieurs milliards.

POURQUOI DONC UNE TELLE ARCHITECTURE ?

Notre cerveau est une machine à calcul multi-spécialisée mais pas une machine aux possibilités évolutives nombreuses. Contrairement à ce qui s'est définitivement imposé comme modèle d'architecture des ordinateurs, il n'est pas construit autour d'un mécanisme universel de calcul auquel l'évolution aurait ajouté des modules.

Tous les ordinateurs d'aujourd'hui sont conçus autour d'un noyau de calcul universel qui est utilisé sans cesse pour exécuter les algorithmes du système d'exploitation et des couches plus hautes du logiciel. Le tout est complété de modules ou des puces spécialisées (pour les traitements graphiques par exemple), qui permettent de résoudre plus rapidement certains problèmes rencontrés fréquemment que ne le permettrait la programmation du noyau universel.

Le parallélisme (c'est-à-dire l'exécution simultanée de plusieurs opérations de calculs en des endroits différents d'une machine) qu'on évoque souvent comme différence essentielle entre le fonctionnement du cerveau et celui de nos ordinateurs n'est en fait ni absent de nos machines, ni toujours présent dans le cerveau. En effet, dans presque tous les ordinateurs actuels, des formes plus ou moins complexes de parallélismes sont dorénavant utilisées : plusieurs processeurs peuvent être présents et travailler simul-

tanément ; dans le fonctionnement de base des microprocesseurs récents certaines formes de parallélisme dans le traitement des données sont implantées. Il est certain que cette parallélisation à tous les niveaux des ordinateurs va se poursuivre. En revanche, dans le cerveau en train de calculer, des séquences bien précises d'activations cérébrales ont été observées (à l'aide de dispositifs d'électrodes placées à la surface du crâne qui permettent de suivre zone par zone les diverses parties du cerveau en activité) et l'on sait donc maintenant que dans le cerveau le traitement de certains problèmes se fait séquentiellement et non pas en parallèle.

Bien sûr les millions d'années de l'évolution ont optimisé les performances des modules du cerveau au point qu'on ne sait pas aujourd'hui les imiter, ni concevoir d'assemblages artificiels aux propriétés équivalentes, mais cette organisation, figée, est inapte à mener des traitements informationnels élémentaires (calculs, mémorisations, réception/émission de signaux). Ce *défaut d'architecture* que rien n'explique vraiment a de nombreuses conséquences désagréables et navrantes comme notre incapacité à mémoriser un agenda et à vérifier de tête nos comptes bancaires courants, nos difficultés à retrouver un chemin compliqué, à optimiser une route en regardant une carte, à mesurer le temps avec précision, et bien sûr l'impossibilité à percevoir un signal et à le convertir sous forme sonore comme le fait un téléphone mobile, etc. Toutes ces choses qui nous seraient si utiles dans le monde actuel et que nous n'obtenons qu'en nous adjoignant une multitude de machines qui encombrant nos poches, nos cartables, nos voitures et nos maisons, sont hors de portée de l'évolution possible de notre système nerveux.

Avec des composants aussi nombreux et performants que le sont les neurones la construction d'un noyau universel de calcul ne présente en théorie pourtant aucune difficulté. Son ajout, même à titre de module supplémentaire, sans changer le reste de l'organisation du cerveau, donnerait une plasticité et une capacité adaptative formidable au cerveau : nous ne comprenons pas pourquoi l'évolution n'a pas choisi cette option ?

Tout cela semblerait provocateur (comment peut-on se permettre de discuter les choix de l'évolution !), mais la question est sérieuse. Il faut s'interroger : pourquoi nous sommes si mauvais pour mener les tâches les plus élémentaires du traitement de l'information ? Il n'y a rien de nécessaire à cela et notre cerveau est aujourd'hui un handicapé de la société de l'information car rien en lui ne le pré-

paraît au monde numérique et informationnel qui s'est imposé, et il ne s'y adapte que difficilement à coup d'appendices artificiels astreignants.

Ce mystère est sans doute de la même nature que l'absence dans le monde des êtres vivants de roues ou d'hélices à axe, d'engrenages, de chaînes de transmission, de moteurs à explosion : les choses les plus simples de la mécanique que nous avons découvertes et apprises à maîtriser quand nous avons conçu les premières machines artificielles sont absentes du monde vivant. L'évolution a suivi d'autres chemins élaborant un autre ensemble de solutions mécaniques et chimiques. Cet univers de la mécanique naturelle est parfois infiniment plus complexe et plus performant que celui que nous avons inventé – nous ne savons parfois pas l'imiter ni même le comprendre (voir l'article sur *Le vol des insectes*, août 2001) –, mais parfois il est moins complexe et moins performant – aucun oiseau ne dépasse la vitesse du son, et aucun n'a la capacité de transporter des masses aussi lourdes que celles confiées à nos avions-cargos. La situation concernant le traitement de l'information et le calcul est identique : ce qui nous est apparu comme le plus simple, ce que nous avons su faire dès les premières machines à traiter l'information, la nature ne l'a pas fait préférant emprunter d'autres voies que nous ne comprenons aujourd'hui que très imparfaitement et qui nous étonnent aussi bien par leurs réussites (par exemple notre système visuel) que par leurs échecs qui nous condamnent à être d'exécrables calculateurs.

Stanislas DEHAENE, *La bosse des maths*, Éditions Odile Jacob, Paris 1997.

Stanislas DEHAENE, *Comment notre cerveau calcule-t-il ?* in *Pour la science*, n° 236, pp. 50-57, juin 1997.

Martin GARDNER, *Mathematical Carnival*. Chapitres 7 : *Calculating Prodiges*, Chapitre 8 : *Tricks of Lightning Calculators*, Alfred A. Knopf, New York, 1975.

Philip N. JOHNSON-LAIRD, *L'ordinateur et l'esprit*, Éditions Odile Jacob, 1994.

Doreen KIMURA, *Le sexe du cerveau*, *Pour la science*, n° 181, pp. 98-107, novembre 1992.

Doreen KIMURA, *Cerveau d'homme, cerveau de femme ?* Éditions Odile Jacob, Paris 2001.

Stevens B. SMITH, *The Great Mental Calculators*, Columbia University Press, New York, 1983.

***La mémoire*, Dossier *Pour la science*, avril-juillet 2001.**

***Le calculateur prodige*, in *Pour la science*, n° 280, p. 15, février 2001.**



Un nain contestable

VALÉRIE CORMIER-DAIRE

Seneb, le chef de la garde-robe du pharaon il y a 4500 ans, était un nain. Quelle maladie avait causé son nanisme ?

Les Égyptiens ne redoutaient pas de représenter les difformités et les malformations : le nain Seneb, dont la sculpture (voir la page ci-contre) est exposée au Musée du Caire, illustre ce souci de réalisme. La sculpture date de l'Ancien Empire, pendant la quatrième ou au début de la cinquième dynastie, vers 2475 avant notre ère.

À cette époque, ceux qui devaient leur petite taille à une malformation étaient souvent chargés de l'entretien des habits, de la garde des animaux domestiques ou des divertissements (coutume que l'on retrouve chez les « fous » des rois de France). D'autres nains étaient orfèvres, sculpteurs ou artisans. En revanche, les Pygmées, petits naturellement, étaient dans les temples égyptiens, les « nains des danses du dieu ». Un texte des Pyramides affirme que « le mort dansera comme un nain devant Osiris ».

À l'inverse d'autres civilisations pour qui ils étaient des « monstres », l'œuvre du diable ou le signe de malheurs à venir, les nains étaient chez les Égyptiens l'égal des hommes normaux. Un nain, Bès, a même accédé à la dignité divine dans le panthéon égyptien (voir la figure à côté du titre). Par ses danses grotesques, il protégeait contre les êtres malins ou les mauvais sorts, contre les reptiles et les scorpions. Par ailleurs, il veillait sur les femmes enceintes, les nouveau-nés et l'ensemble du foyer.

Seneb était, d'une part, le chef de tous les nains du palais chargés de la garde-robe royale, d'autre part, un prêtre attaché aux cultes funéraires des pharaons Chéops et Djedefrè. Les inscriptions de la fausse porte de sa tombe révèlent qu'il était riche, avait un important troupeau, et qu'il se déplaçait en chaise à porteur ou en barque.

Seneb est représenté avec sa femme Senetités et ses deux enfants. Senetités,

qui enlace son mari, était prêtresse d'Hathor et de Neth, et à ce titre, une grande dame de la cour. Les enfants, entourés d'inscriptions qui rappellent les noms et les titres des membres de la famille, sont conformes à l'iconographie égyptienne des enfants en bas âge : l'index devant la bouche et une tresse sur le côté de la tête. Loin d'être un phénomène de foire, Seneb était un notable dont la malformation n'entravait pas la fonction sociale.

Le nanisme, ou dysplasie osseuse, est la conséquence visible de différentes maladies génétiques qui touchent le développement des os ou du cartilage. À partir de cette seule représentation, vieille de plus de quatre millénaires, peut-on identifier la maladie ?

Les dimensions du tronc et du crâne de Seneb, équivalentes à celles de sa femme, indiquent une maladie constitutionnelle des os longs (ceux des membres). On observe également une micromélie, c'est-à-dire des membres courts, accompagnée d'une brièveté des extrémités (les doigts). Toutefois, le diagnostic d'une achondroplasie (le nanisme le plus répandu, dont la cause génétique a été identifiée en 1994) est peu probable, car les membres sont courts dans leur totalité, alors que chez les malades atteints d'achondroplasie, il existe une rhizomélie, c'est-à-dire que les os du bras (l'humérus) sont notablement plus courts que ceux de l'avant-bras (le radius et le cubitus).

Une des premières causes possibles de la morphologie de Seneb est un nanisme acromicrique, caractérisé par une micromélie et des mains très courtes. Cependant, la certitude est impossible. Il pourrait également être atteint d'un nanisme acromésomélisme, caractérisé par une brièveté des os de l'avant-bras et de la jambe associée à des extrémités courtes et trapues, sans dysmorphie faciale, ni retard intellectuel. Le gène dont la mutation explique cette maladie a été localisé sur le bras court du chromosome 9, mais il n'a pas encore été identifié.

Enfin, il pourrait s'agir d'une maladie de la formation du cartilage, des chondrodysplasies métaphysaires. Le cartilage est un tissu résistant et flexible composé

d'une matrice de protéines, du collagène, sécrétée par les cellules de l'os, et d'une molécule, la chondroïtine-sulfate. Là encore, deux hypothèses s'affrontent : la chondrodysplasie métaphysaire de Schmid et celle de Mac Kuskick.

La première se distingue par des jambes incurvées. Hélas, la posture en scribe du chef de la garde-robe les rend invisibles. Cette maladie résulte d'une mutation sur le gène qui code le collagène X. Cette protéine est constituée de trois chaînes identiques dont l'assemblage est autorisé par la présence d'un module de 140 acides aminés, nommé *Clq*. Les mutations observées chez des patients atteints de chondrodysplasie métaphysaire de Schmid sont sur le segment du gène qui code ce module. Toutefois, on ignore encore le mécanisme de trimérisation.

La chondrodysplasie métaphysaire de type Mac Kuskick, l'autre maladie possible de Seneb, a été identifiée la première fois en 1965 chez les Amish. Depuis, elle a été observée dans de nombreuses autres populations. Les symptômes en sont une extension réduite du coude et une déformation du thorax. Par ailleurs, les cheveux des malades atteints de ce trouble sont très fins, cassants et blonds. Hélas encore, le bonnet qu'arbore Seneb ne nous permet pas d'affiner notre diagnostic. En 2001, le gène incriminé dans cette maladie génétique a été identifié : il s'agit du gène d'une endoribonucléase mitochondriale. Cette enzyme est responsable de l'épissage de l'ARN. Toutefois, le rôle de cette enzyme dans la croissance et le développement du cartilage est encore inconnu.

D'autres diagnostics sont possibles pour expliquer le nanisme de Seneb. Seul un examen radiologique permettrait de trancher. Quoi qu'il en soit, le dieu Bès a veillé sur sa femme : les deux enfants sont de taille normale. Ils remplacent, pour l'unité de la statue, les jambes atrophiées de leur père.

Valérie CORMIER-DAIRE, Hôpital Necker, Paris