

Réponse mathématique

Didier Nordon m'a fait l'honneur de commenter la page de couverture de mon récent ouvrage sur les mathématiques (voir *Bloc-notes, Pour la Science*, janvier 1997). Comment peut-on publier des lignes aussi fielleuses que vides sur le fond ? Est-ce le titre qui fait la valeur d'un ouvrage ou bien ce qu'il tente d'apporter au lecteur ?

Celui-ci verra que je me suis efforcé de défendre les mathématiques, parfois injustement attaquées, et de les promouvoir. M'appuyant sur les écrits d'Henri Poincaré, j'ai notamment rappelé leur intérêt essentiel pour la formation de l'esprit. Je me suis efforcé de les faire comprendre et accepter, soit en décrivant de manière littéraire plusieurs de leurs aspects, soit en essayant d'apporter, de façon aussi peu formelle que possible, des compléments d'intelligibilité à certains chapitres de base de l'enseignement.

Le titre original, *Essais sur l'intelligibilité des mathématiques*, est devenu, de manière plus sobre, *Comprendre les mathématiques*. Le titre de ce livre et son sous-titre n'ont pas choqué les mathématiciens ni les philosophes, académiciens ou non, français ou non, qui m'avaient adressé un courrier fort agréable à lire.

C.P. BRUTER, Gometz-le-Châtel

Réponse de Didier Nordon

C.P. Bruter ne répond pas aux critiques que je formulais. Son livre est un cours de géométrie classique – niveau seconde année de Premier Cycle universitaire – précédé d'un essai d'une soixantaine de pages. Ni le cours ni l'essai ne me semblent à la hauteur de l'extrême ambition affichée tant par le titre, *Comprendre les mathématiques*, que par le sous-titre, «Les 10 notions fondamentales».

La rigidité du poil

François Pérégé écrit, dans *Le pinceau du peintre* (voir *Pour la Science*, janvier 1997), que «la mélanine rigidifie la structure et détermine ainsi la nervosité et l'élasticité du poil». Si certains poils blancs sont considérés comme plus souples par les peintres, on ne peut en déduire que la mélanine contrôle la souplesse du poil.

Le poil des mammifères, tel le cheveu humain, est un tube de kératine empli d'une moelle souple et dont les parois sont formées de deux couches. La couche externe est constituée de six épaisseurs de cellules disposées en un arrangement régulier, comme les

tuiles d'une toiture. La couche interne est constituée de faisceaux cylindriques, parallèles au grand axe du cheveu, qui ne sont pas cohérents entre eux. La rigidité du poil est due à l'interaction de ses trois parties.

La mélanine est un pigment synthétisé dans le bulbe pileux et transmis aux cellules qui se différencient petit à petit pour former la tige pileuse. Elle est stockée dans de petites pelotes nommées mélanosomes. La richesse en pigments et le type de mélanine produite déterminent la couleur du cheveu. La mélanine ne participe pas à la rigidité du poil.

Philippe DEPREZ

Réponse de François Pérégé

M. Pomarède, de l'Université de Montpellier, qui a travaillé sur les couleurs des oiseaux, signale que la mélanine rigidifie les plumes. Il me semble logique qu'elle rigidifie aussi les poils. L'eumélanine, noire, est un polymère qui se présente en pelotes, en bâtonnets ou en fuseaux, et s'incruste de manière plus ou moins homogène entre les faisceaux de microfibrilles de kératine. En mécanique des matériaux composites, des granules dispersés dans un faisceau de fibres parallèles apportent de la rigidité.

La structure du poil intervient toutefois aussi. Sinon, pourquoi le poil de la martre kolinski serait-il si rigide, alors qu'il ne contient que de la phaéomélanine, qui ne se présente pas en grosses molécules ?

Véhicules et carburants

Selon Daniel Sperling, le gaz naturel ou le gaz de pétrole liquéfié ne réduisent pas beaucoup les émissions polluantes des véhicules (voir *Les véhicules électriques*, *Pour la Science*, janvier 1997). Toutefois, les principaux composants de ces carburants sont le méthane, le propane et le butane, alcanes légers dont la combustion, correctement menée, ne dégage presque pas de monoxyde de carbone. Contrairement aux essences actuelles, ils ne contiennent ni composés aromatiques ni plomb. On peut facilement supprimer le soufre qui leur est ajouté comme marqueur odorant.

Olivier BOUTRY, Arnouville-lès-Gonesse

La principale difficulté à surmonter pour la généralisation des véhicules électriques est leur faible autonomie et la durée de recharge des batteries. Si l'on calcule le rapport entre l'autonomie et le temps de recharge pour les différentes énergies, on

obtient 4 200 kilomètres par heure pour une voiture à essence, et huit kilomètres par heure pour les véhicules électriques actuels. Il serait souhaitable d'atteindre 25 kilomètres par heure pour un véhicule de livraison urbain, et au moins 200 pour un véhicule routier. Si l'on divise ce rapport par le poids de l'énergie embarquée (carburant ou batterie), un véhicule à essence est 2 000 fois plus performant qu'un véhicule électrique.

Guy BARTHAS, Boulogne Billancourt

Double hélice

Dans *Les inattendus de la double hélice* (voir *Pour la Science*, janvier 1997), Jean Rossier retrace la naissance de la biologie moléculaire. Je souhaite compléter cet historique.

Est-il certain qu'Avery «ne croyait pas tellement lui-même» en la signification de ses travaux sur le principe transformant du pneumocoque ? Avery était modeste, et il a été prudent, dans ses publications scientifiques, sur les interprétations de ses travaux, mais sa correspondance atteste qu'il pensait avoir montré que le principe transformant, l'ADN, était le principe des virus et des gènes. On ne saurait lui reprocher sa prudence quand, à la même époque, George Beadle, le découvreur de la fonction primaire du gène, la synthèse des protéines, tout en connaissant et citant les travaux d'Avery, maintenait que le gène était probablement constitué de protéines «ou peut-être de nucléoprotéines».

Que «Jim Watson était encore plus mauvais expérimentateur que Francis Crick, si c'est possible» est une opinion discutable. Les travaux de génétique microbienne que J. Watson a réalisés au Cold Spring Harbor, avant son séjour à Cambridge, et ceux qu'il a réalisés après ce séjour, ne sont pas le fait d'un mauvais expérimentateur. Il est en effet l'un de ceux qui, en concurrence avec Sidney Brenner et François Jacob, et par une autre méthode, ont mis en évidence physiquement (ou biochimiquement) l'ARN messager prédit par F. Jacob et Jacques Monod. Quant à F. Crick, c'est essentiellement un théoricien. Il semblerait qu'il n'ait, de ses mains, réalisé qu'une expérience «de pailleasse», mais quelle expérience ! C'est, en collaboration avec S. Brenner, la magnifique expérience de génétique du phage démontrant que le code génétique est constitué de «codons», formés de «triplets de bases» (succession de trois bases) non chevauchants.

Jean DEUTSCH, Paris



Les coûts de l'informatique

BERNARD BEAUZAMY

On les réduit en améliorant les algorithmes avant de travailler la programmation.

Toute utilisation de l'informatique s'élabore en deux étapes, dont la confusion diminue l'efficacité et augmente les coûts. La première étape est la conception de l'algorithme de résolution du problème, la seconde la programmation de cet algorithme.

Imaginons que l'on ait assigné à un conducteur de bus la tâche : «prendre trente enfants chez eux et les conduire au musée». Un algorithme pourrait être : ranger par ordre alphabétique la liste des noms des enfants ; aller chercher le premier, puis le second, ainsi de suite jusqu'au dernier ; lorsque tous sont dans le bus, aller vers le musée. Les règles établies dans l'algorithme devront s'appliquer encore le mois suivant, où l'on n'aura que 20 enfants à transporter et où le musée sera remplacé par la piscine.

L'algorithme conçu, on le programme. Dans notre exemple, l'école dispose d'une base de données de tous ses élèves ; ceux qui doivent être emmenés au musée ce matin-là sont sélectionnés selon un certain critère (ils sont dans telle classe, ou ont eu de bonnes ou de mauvaises notes en histoire) : c'est un tri informatique. Ensuite, leurs fiches sont rangées par ordre alphabétique. On connaît l'adresse de chacun, donc la distance entre deux élèves consécutifs. On sait alors bâtir un programme informatique qui sera la feuille de route du chauffeur : à 7 h, il se présente chez Adam, puis à 7 h 03, il sera chez Barnabé (une minute pour charger Adam, deux minutes pour aller chez Barnabé etc.) ; l'arrivée au musée sera prévue, disons pour 7 h 52.

Dans ce processus, la conception de l'algorithme coûte beaucoup moins que la partie de programmation. C'est évident sur notre exemple, parce que l'algorithme se ramène à ranger les noms par ordre alphabétique et mettre les adresses en regard, ce que n'importe qui peut faire en cinq minutes. La programmation est plus complexe : il faut accéder à des bases de données, y faire des opérations, des calculs de distances et d'horaires, et imprimer les résultats sous forme utilisable par

le chauffeur. Cette programmation prend une heure ou deux. L'exemple est trop simple, me direz-vous, et n'est pas significatif. Il est effectivement trop simple, mais il est significatif : la partie conceptuelle, qui relève des mathématiques, est toujours moins coûteuse, en moyenne d'un facteur dix, que la partie programmation, qui relève de l'informatique.

Ainsi la matière grise, la partie «intelligence», coûte moins cher que la partie «développement». Ce qui étonne. Pour la première, il faut résoudre un problème, alors que pour la seconde, il suffit d'écrire un programme d'une simplicité biblique.

Le paradoxe est levé si l'on considère que l'algorithmique relève des mathématiques, une science vieille de 6 000 ans : dans bien des cas, le problème considéré a déjà été étudié et résolu. L'expert sait utiliser les «briques» antérieures. De plus, une méthode mathématique a un caractère absolu : si les hypothèses sont bien celles que l'on a prévues, la conclusion sera celle que l'on attend.

PROGRAMMER EST UN ART

La programmation, au contraire, n'est pas une science, mais «un art». Elle s'élabore lentement en fonction du contexte (Quel type de machine ? Quel système d'exploitation ? Quel langage de programmation ?). De plus, il n'est jamais sûr que le logiciel fera exactement ce que l'on attend de lui, et cela seulement : dans des programmes qui font des centaines de milliers de lignes, voire des millions, comment s'assurer que tel cas n'a pas été oublié ? Que telle instruction n'entre pas en conflit avec telle autre ? Ce fut la situation d'*Ariane V* : une «brique» logicielle, datant d'*Ariane IV*, avait été oubliée dans le programme de guidage, ou plus exactement, on avait omis d'évaluer les conséquences qu'elle pourrait avoir dans une situation spécifique nouvelle.

Cette «validation des logiciels» est un souci majeur car il n'existe pas de méthode infaillible : il faut tester chaque logiciel, en espérant que les tests seront assez

nombreux, et corriger chaque erreur décelée, en espérant qu'il n'y en a pas d'autres.

Pourtant c'est la partie conceptuelle, la partie algorithmique, qui détermine le coût et l'efficacité de l'ensemble du programme ! Reprenons l'exemple de notre bus, et imaginons que nous ayons une contrainte horaire : pour des raisons impératives, tous les enfants doivent être au musée à 7h45, alors que notre méthode précédente ne les y mettait qu'à 7h52. Comme le chauffeur ne prend son service qu'à 7h, quel est l'unique recours du directeur de la Compagnie de bus ? Acheter un bus plus rapide ! Quand on a fixé l'itinéraire et les temps de départ et d'arrivée, l'unique paramètre sur lequel on puisse jouer est la vitesse. Mais un nouveau bus, surtout un bus plus rapide, plus performant, coûte très cher...

Là encore, l'exemple est significatif : si la méthode de travail est fixée, l'unique façon d'améliorer les performances est de remplacer le matériel par du matériel plus élaboré, 10 à 100 fois plus coûteux que l'algorithmie et la programmation réunies ! Il faudra des moteurs plus puissants, des caméras plus sensibles, des asservissements plus élaborés, des circuits plus rapides, bref, payer fort cher, sous forme de matériel, l'imprévoyance dont on a fait preuve au début en adoptant un algorithme simpliste.

Car, simpliste, notre algorithme de départ l'était : ranger par ordre alphabétique est peut-être la première méthode qui vient à l'esprit, mais ce n'est probablement pas la meilleure, en termes de temps de trajet. La «recherche opérationnelle» dispose de bien d'autres méthodes pour relier des points sur une carte, de sorte que le temps total de trajet soit minimal. Demandons à un mathématicien de les rechercher pour nous. Peut-être, selon les contraintes, mettra-t-il une demi-journée ou une journée, qu'importe ? Le programme informatique, en sera fort peu modifié, mais le temps réel de trajet pourra être réduit de 10 ou 20 pour cent. Et nous conserverons notre vieux bus et son chauffeur asthmatique.

La situation est la même en régate. Le fin barreur remontera au vent avec des réglages adéquats de voile et de route, et achèvera la course avec une grande économie de moyens. Le néophyte ne saura pas serrer le vent ; comme il est riche, il acquerra, pour compenser, une voilure plus vaste ou un bateau plus long ; mais il fera davantage de manœuvres, perdra du temps, finira la course au milieu des rires et tout mouillé. La nature punit avec ironie celui qui en méconnaît les lois.

Bernard Beauzamy est PDG de la Société de Calcul Mathématique.

Les inattendus du gène

PIERRE DOUZOU

Le patrimoine génétique est un capital qui travaille au service de la cellule. Le biologiste exploite et corrige les actions du génome.

La transmission de ce que l'on appelle le patrimoine génétique, à l'issue d'un processus de reproduction, n'aboutit pas (et c'est heureux) à des «copies conformes». C'est là le premier inattendu de la génétique. L'homme a d'ailleurs longtemps tâtonné pour expliquer les tours et détours de la génétique, et l'on peut penser que l'homme primitif avait quelque difficulté à associer sexualité et reproduction.

C'est sans doute quand il a domestiqué des animaux jusque-là sauvages et s'est ainsi fait pâtre, que l'homme du Néolithique a pris conscience de cette association et qu'il a alors misé sur elle pour sélectionner et améliorer, voire créer, des espèces animales domestiques. Il l'a sûrement fait par une succession ininterrompue «d'essais et d'erreurs» ou, si l'on préfère, de tâtonnements bien compréhensibles.

En quelques milliers d'années, ce savoir nouveau et de nature empirique s'est répandu sur presque toute la surface de la Terre, l'âge que nous appelons Néolithique s'étant étalé sur des millénaires en fonction du degré d'isolement de continents et de contrées.

C'est également au Néolithique que la domestication de plantes et d'animaux a obligé l'homme à inventer des procédés de stockage sous forme de fermentations dont sont issus le pain et le vin, puis toutes sortes de préparations ayant subsisté jusqu'à nos jours. Il y a eu ainsi une véritable «révolution» dont la base était la génétique expérimentale, puis l'utilisation de microbes «amis» qui permettaient de conditionner les produits.

LA COMPRÉHENSION DE LA REPRODUCTION

Pour autant, l'homme savait peu de choses sur le processus de reproduction et sur les mécanismes de gestation qui se dérobaient à sa vue. Les philosophes grecs, qui nous servent souvent

de référence, étaient avant tout des penseurs et s'ils ont eu l'intuition des mécanismes de la reproduction sexuée comme ils avaient l'intuition de l'existence d'atomes, ils n'avaient pu concrétiser leurs concepts et leurs idées, faute d'outils d'exploration de l'invisible.

Il fallut attendre le XVII^e siècle de notre ère pour que le microscope (invention et outil de riches négociants hollandais fondateurs des fameux «Cabinets de physique») permette de découvrir le spermatozoïde, impliqué dans le processus de fécondation des espèces animales. Ce mystérieux corpuscule flagellé enflamma alors les imaginations, et l'opacité de sa «tête» n'empêcha pas les observateurs de rêver à son contenu : ils pensaient que c'était un «animalcule» et, pour l'espèce humaine, un «homoncule», un modèle réduit, supposé parfait, de l'être à venir... et porté par une mère dont on imaginait mal le rôle dans le développement de l'animalcule en question.

À la différence des reptiles et des oiseaux, l'œuf des mammifères est dissimulé au regard ; à l'époque, aucun moyen n'existait pour établir son existence et, *a fortiori*, sa fonction. D'ailleurs la démonstration ultérieure de sa fécondation et du développement résultant de l'embryon ne fera guère avancer les connaissances sur la génétique en tant que processus de transmission de l'hérédité.

Curieusement, et par un détour inattendu dont la recherche a le secret, c'est l'expérimentation de plants végétaux qui permettra de jeter les bases de la génétique, et ce travail sera le fait d'un moine-jardinier, Gregor Mendel. Cet Autrichien se prend de passion pour les petits pois... et entreprend d'en croiser les plants géants et nains, puis d'observer les caractères, ou «traits», de leurs descendants. Le moine augustin en question pratique un travail de bénédictin et énonce des concepts qui deviendront des lois, encore en vigueur aujourd'hui.

Ces lois expliquent la transmission des caractères héréditaires et l'alternance de traits dominants et récessifs. Fondées sur une expérimentation considérable et sur des calculs rigoureux, elles sont tenues pour intangibles. Mais, à l'époque, les travaux de Mendel sont à peu près ignorés par ses contemporains, entièrement absorbés par les découvertes de Darwin sur l'évolution des espèces. Plus près de nous, les travaux du Russe Lyssenko, qui prétendaient défier les lois de Mendel, ont sombré dans l'opprobre et le ridicule.

LA GÉNÉTIQUE MOLÉCULAIRE

Ce n'est qu'au début des années 1940 que la génétique a reçu un support chimique et, pour mieux dire, moléculaire. Quelques chercheurs, dont l'Américain Morgan, vont attacher leur nom à la découverte principale : les acides nucléiques sont le support matériel de l'hérédité.

Le concept du gène (entité constituée d'ADN) s'impose universellement, et la chimie biologique fait le reste en établissant la composition chimique de l'ADN, molécule géante au même titre que les protéines, ces autres constituants essentiels des organismes vivants. Vers la même époque, Pauling établit la structure des chaînes polypeptidiques constituant les protéines et démontre leur conformation hélicoïdale, puis, au début des années 1950, J. Watson et F. Crick, Langridge, Wilkins et R. Franklin établissent la structure de l'ADN (voir *Les inattendus de la découverte de l'ADN*, par Jean Rossier, *Pour la Science*, janvier 1997). Commence alors une «saga» de l'ADN et, avec elle, l'aventure prodigieuse de la «biologie moléculaire».

La double hélice d'ADN forme des agrégats aux conformations complexes. Elle constitue les gènes qui s'assemblent en chromosomes, suivant des architectures encore en cours d'exploration. Mais l'image de la double hélice a une extraordinaire puissance suggestive. C'est ainsi que Watson et Crick écrivent, dans leur article princeps de *Nature* (1953), que : «Le matériel génétique en question pourrait être de quelque manière recopié.»

Depuis, il a été effectivement démontré que l'ADN (dont la double hélice peut s'ouvrir à la manière d'une fermeture éclair) se «répliquait» à partir des simples brins, provoquant ainsi la «transcription» du message génétique et de ses traits héréditaires.

L'ensemble des molécules d'ADN (et donc des gènes résultants), que l'on appelle génome, et qui constitue un des composants majoritaires du noyau de chaque cellule, est, en quelque sorte, un «patrimoine» génétique transmissible