

TRIBUNE DES LECTEURS

Les deux arithmétiques

L'article de Patrick Dehornoy (voir *Pour la Science*, décembre 2000) appelle une remarque. Pris ensemble, les théorèmes de Goodstein et de Kirby-Paris semblent contredire le théorème de complétude de Gödel. En effet, si le théorème de Goodstein était valide dans tous les modèles de l'arithmétique ordinaire, c'est-à-dire dans la théorie du premier ordre fondée sur les axiomes de Peano, il admettrait une preuve dans cette théorie. C'est ce qu'exclut le théorème de Kirby-Paris.

L'explication de ce paradoxe est la suivante. La démonstration de Goodstein requiert l'emploi des ordinaux. Or ceux-ci interviennent dans la description d'un modèle unique M de l'arithmétique au sein d'un modèle univoquement choisi E de la théorie des ensembles. M est l'ensemble des ordinaux qui précèdent le premier ordinal limite ω . Mais il existe dans E une infinité de modèles de l'arithmétique ordinaire. Le théorème de Goodstein est valide dans M , mais il est non valide dans un autre modèle au moins de l'arithmétique dans E . Autrement dit, l'énoncé de Goodstein est un théorème dans une théorie arithmétique plus exigeante que l'arithmétique de Peano.

Il existe donc deux théories arithmétiques. La première comporte les théorèmes «ordinaires» qui ne découlent que des axiomes du premier ordre de Peano. La seconde comporte en outre des théorèmes qui requièrent toute la force de la théorie des ensembles et qui ne sont pas valides dans l'arithmétique de Peano. C'est le cas du théorème de Goodstein.

Le théorème de Goodstein ne peut pas être substitué au premier théorème d'incomplétude de Gödel. Il ne donne pas un théorème prouvant l'existence, dans l'arithmétique de Peano supposée consistante, d'une formule dont on ne peut prouver ni qu'elle est vraie ni qu'elle est fausse. Il montre qu'il existe, dans la théorie des ensembles, des théorèmes d'arithmétique qui ne sont pas valides dans l'arithmétique de Peano. Il est intéressant d'observer l'irruption de théorèmes non banals de logique mathématique dans un domaine mathématique qui semble à l'abri de telles intrusions.

André DELESSERT, Lausanne

Réponse de Patrick Dehornoy

La remarque d'André Delessert est tout à fait juste. Les théorèmes de Goodstein et Kirby-Paris ne se substituent en aucun cas au théorème de Gödel, et ils ne le redémontrent pas non plus : ce qu'ils font est

d'illustrer de façon simple la situation d'incomplétude décrite par le théorème de Gödel.

Parler de deux arithmétiques ne doit pas abuser le lecteur : il ne faudrait pas imaginer que l'arithmétique de la théorie des ensembles s'oppose à celle de Peano ; les deux s'accordent sur ce qui constitue tout le noyau central des mathématiques et, justement, il faut aller chercher des bizarreries comme le théorème de Goodstein pour les séparer.

Un tunnel alpin

Dans l'article sur les tunnels alpins (voir *Pour la Science*, février 2001), les auteurs semblent ignorer le percement au XV^e siècle, sous la crête frontière de partage des eaux, entre la haute vallée du Pô et le Queyras, du tunnel, nommé Perthuis du Viso, à côté duquel le premier percement signalé dans l'article en 1707 dans une gorge est bien modeste.

L'étude de Louis Vaccarone *Le Perthuis du Viso*, qui se réfère à des documents du XV^e siècle, reprise dans l'ouvrage *Le Queyras*, écrit par le Général A. Guillaume et édité par la Société d'études des Hautes-Alpes, apporte quelques compléments d'informations.

Ainsi, «avant son percement, le transport des marchandises de France vers le marquisat de Saluces et vice versa, exigeait un voyage long et pénible».

«Louis, Marquis de Saluces, pensa qu'il était possible d'ouvrir à travers le Viso une galerie qui offrirait une route plus commode, plus courte devant activer le commerce entre la France et le marquisat, surtout celui du sel de Provence.»

«Des ingénieurs procédèrent aux études nécessaires. C'est ainsi que fut prise la décision d'ouvrir, sous le col de la Traversette, un tunnel.»

«Antonio Ferrero di Borgo Alice fut envoyé auprès du Parlement de Grenoble au mois de juin 1475 pour lui exposer la décision prise par le Marquis Louis de Saluces dont il était le conseiller.»

«Le parlement de Grenoble, ayant peu de confiance dans les chances d'une telle entreprise, ordonna aux auditeurs de la Chambre du Dauphiné de prendre des informations secrètes à son sujet.»

«Les quatre auditeurs désignés répondirent, après avoir prêté serment, qu'ils connaissaient le mont Viso ; qu'il était possible de percer cette montagne au grand avantage du Roi Dauphin Louis, du Marquis de Saluces, de leurs sujets et de tous les voyageurs en général.»

«La galerie était livrée à la circulation à la fin de 1480. Le Marquis de Saluces annonça cette heureuse nouvelle au Roi de France au mois de février 1481.»

Il y a quelques années, ce tunnel a été remis en état surtout par des bénévoles, notamment du Club alpin français local. Il n'a pas été utilisé bien longtemps, mais il est peut-être le plus ancien tunnel des Alpes.

Claude LABRE, Embrun

Des noms d'oiseaux

Dans son article sur la laideur des noms de plantes (Voir *Pour la Science*, février 2001) Didier Nordon ne va pas au bout du problème. Le Français a oublié le nom de ses plantes, et il y en a de merveilleux. On en trouve en nombre dans la Flore illustrée de France de Bonnier. Tous les noms cités ne sont que des noms scientifiques récemment inventés et qui sont utilisés en français, souvent à la place de mots que l'on pourrait trouver dans les parlers régionaux. C'est un manque total de curiosité et de culture qui a conduit les biologistes français à ignorer totalement le vocabulaire magnifique et très riche de leur langue pour lui substituer un artificiel jargon élitiste hermétique. À l'inverse, l'Allemand a conservé un riche vocabulaire de noms de plantes.

Pour les oiseaux, les premiers ornithologues ont souvent su trouver dans les parlers régionaux des noms pour désigner les espèces qui n'étaient pas connues dans la région de Paris, où se faisait la plupart des travaux scientifiques. Ainsi, chocard, crave, mauris, tarin, bruant, même s'ils ne désignent plus les espèces auxquelles ils se rapportaient, survivent-ils encore. À part troglodyte, tichodrome, œdicnème, percnoptère, et quelques autres espèces affublées de noms scientifiques, les oiseaux européens sont-ils désignés par des noms français. À cet égard, nous essayons de faire connaître le travail de Michel Deshayes sur l'origine des noms d'oiseaux.

Il est bien entendu beaucoup plus difficile de s'y retrouver pour le nom des plantes, car d'une région à l'autre, il peut désigner des espèces différentes. Ce qui a manqué, c'est une autorité qui aurait eu l'audace de proposer une liste des noms français pour les plantes, différente de la liste des noms scientifiques. Peut-être n'est-il pas trop tard.

Jean-Claude PRAZ, Sion (Suisse)

Écrivez à *Pour la Science* vos réactions, vos commentaires et vos réflexions sur l'actualité scientifique et vos relations avec la science. L'adresse de *Pour la Science* sur Internet est : tribune@pourlascience.fr. Découvrez d'autres contributions de lecteurs sur le site Web www.pourlascience.com.



Allergies alimentaires

HERVÉ THIS

Comment prévoir et prévenir les risques d'allergie aux aliments transgéniques.

Au pays de la gastronomie, tout n'est que fumets, goûts, plaisirs... Pourtant, plus du quart de la population, dans sept États de l'Union européenne, se dit sujette à des allergies ou à des intolérances alimentaires. Quand on confirme le diagnostic par des tests cliniques, on mesure que les véritables allergies alimentaires sont moins nombreuses qu'elles ne sont déclarées (environ 3,5 pour cent de la population), mais elles posent un important problème de santé publique, car la gravité des accidents observés augmente : depuis dix ans, le nombre de chocs anaphylactiques consécutifs à une allergie alimentaire a quintuplé, et beaucoup de ces accidents sont mortels, notamment ceux qui sont provoqués par l'ingestion de produits dérivés de l'arachide. Au Laboratoire d'immuno-allergie alimentaire INRA-CEA, à Saclay, Jean-Michel Wal et ses collègues ont notamment montré comment une protéine du lait de vache provoque des allergies, malgré ses ressemblances avec une protéine humaine qui, elle, est parfaitement tolérée. Les biologistes de l'INRA explorent également, chez l'animal, une méthode d'«immunisation génique» pour prévenir les allergies.

Pourquoi l'accroissement récent des allergies alimentaires ? L'augmentation du nombre d'aliments incriminés semble liée au développement des allergies respiratoires dues aux pollens des végétaux : les anticorps produits par l'organisme contre un antigène de pollen réagissent parfois aussi contre des molécules d'origines très différentes. Ces «réactivités croisées» sont dues à des épitopes communs, c'est-à-dire à des fragments moléculaires analogues, qui sont la cible du système immunitaire. Ce type de phénomène explique comment la multiplication des allergies aux fruits exotiques (avocats, kiwis, bananes...) peut être associée au développement des allergies au latex, elles-mêmes en augmentation.

À ces aliments «classiques», s'ajoutent les aliments dérivés des organismes génétiquement modifiés. Ces produits contiennent des protéines normalement absentes des aliments classiques et la question s'impose avant la com-

mercialisation : sont-ils allergéniques ? Peu de cas ayant été rapportés jusqu'ici, comment déterminer leur allergénicité ? Plusieurs approches sont aujourd'hui envisagées : tests à l'aide de sérums de patients allergiques (les anticorps de ces sérums se lient aux molécules allergéniques), tests cutanés (on dépose les molécules soupçonnées sur la peau afin de détecter une éventuelle réaction allergique), études avec des animaux (on administre les molécules soupçonnées à des animaux sensibilisés) et prévision théorique de l'allergénicité à partir de la séquence des protéines en acides aminés.

Cette dernière voie est d'avenir, mais sa mise en œuvre doit être préparée par l'établissement de banques de données de séquences bien caractérisées, pour des protéines dont on connaît l'allergénicité. Grâce à de telles banques, J.-M. Wal et ses collègues ont comparé la réactivité immunitaire de la caséine bêta humaine et de la caséine bêta bovine.

Les caséines constituent 80 pour cent des protéines du lait. Elles sont de quatre types nommés alpha S1, alpha S2, bêta et kappa. La caséine bêta du lait de vache est un allergène important : 92 pour cent de sérums provenant de personnes allergiques aux caséines contiennent des anticorps responsables des réactions allergiques, les immunoglobulines E, spécifiquement dirigées contre la caséine bêta.

En 1997, les immunologistes de Saclay avaient démontré l'existence, dans le sang de personnes allergiques, d'immunoglobulines E spécifiques d'une protéine du petit lait bovin, et ils avaient observé que ces immunoglobulines E réagissent également avec la protéine correspondante humaine. Ce même type de réactivité croisée existait-il pour la caséine bêta ? Les immunologistes ont récemment testé le sérum de 20 personnes allergiques à la caséine bêta de lait de vache. Ils en ont dosé les immunoglobulines E spécifiques de la caséine bêta bovine et ils ont ensuite vérifié que ces immunoglobulines réagissent également avec les caséines bêta humaines.

Pourquoi ces réactions croisées ? Parce que les caséines bêta humaine et bovine ont en commun 50 pour cent de leurs acides aminés. D'où l'intérêt d'étudier les parties communes. Un des domaines communs, par exemple, correspond à une séquence en acides aminés qui se replie en hélice dans les protéines bovines et humaines. Un autre domaine commun contient les principaux «sites de phosphorylation» : après l'enchaînement des acides aminés qui constitue les protéines, ces dernières sont modifiées, notamment par addition de groupes phosphate (c'est la phosphorylation). De telles modifications chimiques «post-traductionnelles» influencent les propriétés des molécules, en changeant leur charge électrique ou leur repliement. Les immunologistes de l'INRA ont montré que la phosphorylation du second domaine influe sur l'allergénicité de la caséine bêta.

A ce jour, les études qui préparent les évaluations des nouveaux aliments dérivés d'organismes génétiquement modifiés ou contenant de tels organismes n'ont pas révélé d'allergénicité particulière. Ces études s'accompagnent d'une recherche de méthodes de prévention des allergies alimentaires. Dans le cas de la caséine bêta, les substitutions de lait sont inefficaces, car les caséines des divers laits sont très semblables. Le groupe de Saclay préfère aujourd'hui tester (chez la souris) l'immunisation génique, c'est-à-dire l'injection d'ADN d'origine bactérienne, où ils introduisent l'ADN codant une protéine étudiée : une telle injection apporte des séquences qui activent une réaction du système immunitaire de type non allergique, laquelle «éteint» la réaction allergique. Dans le cas d'une telle prévention contre les allergies à la bêta lactoglobuline bovine (une autre protéine du lait de vache), la méthode réduit considérablement et durablement la production d'immunoglobulines E spécifiques de cette protéine.

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 27 mars 2001, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.

Galápagos : une marée noire révélatrice

CHRISTOPHE GRENIER

La marée noire qui a souillé les Galápagos a nui davantage à l'image de l'archipel qu'à son environnement, déjà menacé par une gestion économique et politique désastreuse de ce qui devait être une précieuse réserve naturelle.



Jean-Michel Thiriet

La mort de quelques oiseaux de mer, iguanes et otaries sur des côtes souillées par le pétrole a mis à mal le mythe d'un «paradis» situé dans un archipel de l'océan Pacifique. Cette légende a été élaborée par les responsables de la conservation de ces îles pour y conforter leur action, et par les entreprises de tourisme. En fait, cet événement révèle une menace plus réelle pour la singularité de cet archipel : son ouverture croissante sur le reste du monde. L'isolement de ces îles, qui avait permis, par spéciation géographique, la sélection d'espèces animales et végétales caractéristiques des Galápagos, a tellement diminué en trois siècles de fréquentation, d'exploitation et de peuplement, que l'archipel est plus un espace ouvert qu'un sanctuaire naturel.

Paradoxalement, cette ouverture s'accélère depuis la création, en 1959, du Parc national des Galápagos sur 97 pour cent de l'archipel, le reste étant laissé aux habitants, répartis sur quatre îles, et aux militaires. En 1968, les premières croisières touristiques sont organisées aux Galápagos, qui deviennent la vingtième province équatorienne en 1973 (ce qui y

autorise la libre immigration des Équatoriens), et où le premier vol commercial se pose en 1975 sur la piste construite par les Américains en 1942. En 1974, alors que l'archipel compte 4 000 habitants et accueille 8 000 visiteurs, le premier plan de gestion du Parc national des Galápagos impose un quota de 12 000 touristes par an, calculé d'après un nombre limité (14) de concessions de bateaux de croisière et de places (300) à bord. L'année suivante, le deuxième plan prétend restreindre les migrations vers l'archipel. En vain : en 1982, 6 200 personnes vivent aux Galápagos, visitées par 18 000 touristes ; en 1984, le troisième plan admet 25 000 visiteurs par an, au maximum ; en 1990, l'archipel compte 9 800 habitants et reçoit 40 000 touristes, chiffres qui ne cessent de croître, puisqu'en 2000, la population est estimée à 20 000 âmes, et que près de 70 000 visiteurs s'y sont rendus.

La crise écologique des Galápagos tient à la contradiction entre leur isolement originel, que le parc national est censé préserver, et leur ouverture croissante au marché mondial et équatorien. Six difficultés découlent de ces deux aspirations inconciliables : la forte croissance démographique, un tourisme inadapté, un accès trop facile, une pêche dévastatrice, une conservation mal conduite, une impuissance des institutions qui, parfois, profitent de la situation.

La population insulaire augmente très vite, par immigration d'Équatoriens souvent chassés du continent par la misère et attirés aux Galápagos par l'État, le tourisme, la pêche d'exportation ou des réseaux communautaires. Les pouvoirs publics ne peuvent limiter les impacts écologiques de cette croissance démographique : elle entraîne une détérioration des conditions de vie des «Galápagueños», que les immigrés concurrencent en matière d'emplois et de salaires.

Cet afflux de population se traduit par l'importation massive d'aliments, de combustibles, de véhicules et de matériel de construction, qui produisent toujours plus de déchets et de pollution dans le parc.

À cette forte croissance démographique, s'ajoute un tourisme débridé : aucun quota de visiteurs ou de bateaux de croisière n'a été respecté (on a atteint 90 bateaux totalisant 1 600 places, en 1996). Depuis 1991, l'État, conseillé par la Fondation Darwin, l'organisation non gouvernementale internationale créée en 1959 pour veiller à la conservation des Galápagos par le biais de la Station biologique du même nom, a renoncé aux quotas au profit de la politique dite du «tourisme sélectif» ; cette politique visait à réduire le secteur touristique local, afin de décourager les migrants de venir y travailler. Cela a accéléré la mainmise des entreprises continentales sur le marché des Galápagos, où elles possèdent 90 pour cent des places à bord des bateaux de croisière.

De surcroît, les bateaux abordent peu les bourgades de l'archipel, ce qui prive leurs habitants de revenus. Enfin, ce tourisme dénature l'archipel en le banalisant : on «consomme» ces îles comme n'importe quel autre lieu. Les touristes ne restent en moyenne que quatre jours dans l'archipel, utilisent des bateaux rapides et de fort tonnage (jusqu'à 100 lits) qui dépensent de grandes quantités d'énergie pour relier divers sites de visite dans tout l'archipel. Une rotation rapide de la clientèle garantit des profits élevés. Le pétrolier Jessica alimentait en carburant l'un de ces paquebots pour visiteurs pressés.

La croissance démographique et l'augmentation incontrôlée du tourisme nécessitent de meilleurs transports entre l'Équateur continental et les Galápagos : en 1986, un deuxième aéroport y a été inauguré, un troisième en 1995. Tandis

