

TRIBUNE DES LECTEURS

Le corail

Votre article «Le récif corallien de Tahiti» (voir *Pour la Science*, août 2000) m'amène à apporter les précisions suivantes.

Premièrement, les zooxanthelles sont de minuscules algues endosymbiotes (intracellulaires). Diverses sources estiment qu'il peut y en avoir jusqu'à dix millions par centimètre cube de tissu : elles ne peuvent donc se trouver dans la cavité stomacale des coraux que de façon transitoire, lorsque ces derniers sont au plus mal et les expulsent de leurs tissus. Cette expulsion accompagne le grave phénomène du blanchiment des coraux attribué, en première approximation, aux températures excessives dues au réchauffement global en cours.

Deuxièmement, la partie volcanique d'un futur atoll s'enfonce effectivement, comme l'avait supposé Charles Darwin (aux îles Keeling, ou Cocos, dans l'océan Indien), car la croûte océanique qui le porte se refroidit (subsidence thermique) et parce qu'en plus, actuellement, le niveau général de l'océan s'élève (eustatisme) ; mais le récif ne se soulève pas naturellement, il grandit vers le haut et vers l'intérieur, car c'est tout ce qu'il peut faire, accroissant la taille du lagon (récif frangeant, récif barrière). En effet, du côté de la haute mer (tombant récifal), où il se protège avec ses formes sphériques les plus résistantes, sa croissance horizontale est bloquée par les dégâts de la houle, des tempêtes et des cyclones : il ne s'écarte donc pas de la côte du cône volcanique.

Les coupes fournies (avec une très forte exagération verticale) le montrent parfaitement ; l'écartement entre les pointes désignées, ou non, par les flèches obliques, ne change pas dans les trois figures : 3,2 millimètres. En fait, faute de possibilité d'expansion horizontale, la taille de l'anneau initial est imposée, d'une part par la profondeur maximale où les coraux peuvent vivre (100 mètres maximum), d'autre part, par la pente du cône volcanique, en général très faible.

Enfin, les récifs qui se soulèvent existent, mais sont rares, et il en meurent. Ils deviennent alors des îles calcaires criblées de grottes, à bordure typique en marches d'escalier. Le meilleur exemple est celui des îles Loyauté, près de la Nouvelle-Calédonie ; d'autres sont connus au Nord d'Haïti ou à la pointe Est de Cuba. Tous sont associés à des phénomènes tectoniques : aux Loyauté, il s'agit d'un grand bombement, dit ride des Loyauté ; à Cuba et à Haïti, il s'agit de l'influence d'un grand décrochement compressif Est-Ouest.

Tous les récifs n'ont donc pas la chance de pouvoir grandir indéfiniment, même s'ils sont épargnés par la tectonique. Si leur vitesse de croissance verticale ne parvient pas à compenser l'effet combiné de la subsidence et de

l'élévation du niveau marin, ils meurent privés de lumière et de l'apport nutritif de leurs zooxanthelles qui ne «fonctionnent» plus (les sédimentologues disent qu'ils ne parviennent pas à combler l'espace disponible). Alors, l'ensemble de l'atoll se noie, comme on en connaît de très nombreux exemples dans l'océan Pacifique, où les plus vieux ont au moins 115 millions d'années : dans le monde, leur nombre atteint environ 10 000.

C'est pour cela que la démarche de Guy Cabioch et de ses collègues est particulièrement intéressante, car 18 millions de kilomètres carrés d'espaces récifaux sont concernés. Leurs résultats recoupent parfaitement ce que l'on savait des édifices coralliens les mieux connus, notamment ceux où ont eu lieu des essais nucléaires : Bikini, Eniwetok, Mururoa.

Jean-Marie VILA, Toulouse

De l'algorithme

En lisant l'excellent article de Gilles Dowek «L'infini et l'univers des algorithmes» (voir *Pour la Science*, décembre 2000), je constate une fois de plus que les auteurs qui définissent les algorithmes oublient souvent de préciser qu'une procédure ne mérite d'être considérée comme un algorithme que si elle est rigoureusement déterministe et, lorsqu'elle fournit un résultat, que si celui-ci est unique. C'est ainsi qu'aucune instruction ne doit faire appel à un processus aléatoire comme : «Lancer alors un dé et ajouter le chiffre obtenu.» Je suppose que, pour ces auteurs, cette restriction est évidente, mais elle ne l'est pas pour tout le monde : un scientifique de haut niveau de mon entourage ne l'admettait pas.

Parfois même, ces auteurs parlent de logiciel, alors que ce terme est réservé aux ordinateurs réels et qu'ils devraient dire qu'un algorithme est équivalent à une «machine de Turing». Et ce parce que les ordinateurs sont essentiellement interactifs, sans quoi ils auraient peu d'intérêt, alors qu'une machine de Turing est rigoureusement non interactive (elle n'a ni clavier ni même de bouton «marche/arrêt» ; si elle en avait un, la démonstration du théorème de l'arrêt s'effondrerait). Cette restriction correspond à la définition d'une «application» en mathématiques : l'élément «cible» doit être unique et déterminé, alors qu'il peut y avoir plusieurs «sources» pour une seule cible.

En revanche, sur un ordinateur, un opérateur indiscipliné peut saisir sur le clavier, lors d'un arrêt au cours de l'exécution d'un logiciel, l'heure qui apparaît sur sa montre ou le résultat du lancement d'un dé, au lieu de la donnée qui figure sur son livre de consignes.

C'est en raison de cette interactivité que les ordinateurs ne sont des machines algorithmiques que par intermittence, et qu'ils ne satisfont pas au théorème de l'arrêt. C'est pour la même raison que notre cerveau, relié en permanence à l'univers extérieur, ne peut pas non plus avoir un fonctionnement strictement algorithmique, sans qu'il soit nécessaire d'invoquer l'indétermination quantique au niveau des synapses, comme a cru devoir le faire le mathématicien Penrose.

J.-P. SCHWAB

Deux absurdes

Dans l'article «Les mathématiques, science de l'infini» (voir *Pour la Science*, décembre 2000), un encadré détaille un exemple fameux de raisonnement par l'absurde : celui qui établit l'irrationalité du nombre «racine carrée de deux».

Dans le même numéro, l'article intitulé «L'infini, pierre de touche des constructivistes» explique que les mathématiciens constructivistes rejettent la loi du tiers exclu, «sans laquelle il n'est évidemment pas de preuve par l'absurde». Doit-on en conclure que les constructivistes rejettent la démonstration de l'irrationalité de «racine carrée de deux»? Non!

La difficulté vient de ce que les mathématiciens confondent souvent sous la même appellation de «raisonnement par l'absurde» deux types bien distincts de raisonnement. Parlons d'abord du «faux» raisonnement par l'absurde : il s'agit, pour établir la négation d'une certaine proposition P , de supposer P et d'en tirer une contradiction. On peut considérer que c'est la définition même de la négation qui est mise en œuvre dans ce raisonnement, auquel les constructivistes ne voient en général aucune objection. Ils ne mettent donc pas en doute que le nombre «racine carrée de deux» est irrationnel, ni même que l'ensemble des nombres réels est indénombrable.

Le «vrai» raisonnement par l'absurde, celui que les constructivistes rejettent et qui est équivalent au principe du tiers exclu, consiste à établir une proposition P en montrant la négation de la négation de P . Sans lui, on ne peut plus considérer qu'une proposition donnée est automatiquement la négation d'une autre : le «vrai» raisonnement par l'absurde est donc plus puissant que le «faux». Il est d'ailleurs assez rarement indispensable dans les mathématiques élémentaires.

Pierre AGERON, Université de Caen

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@pouirlascience.fr. Découvrez d'autres contributions de lecteurs sur le site Web www.pouirlascience.com.



Voyage à Bast(i)a!

IVAR EKELAND

Il est difficile de comprendre la stratégie économique qui a pour conséquence l'exaspérant manque de ponctualité des vols d'Air France.

Le lundi 13 novembre, je me suis rendu à Orly pour prendre le vol *Air France* de 9 h 25 pour Bastia. L'avion n'a décollé qu'à 11 h 05, soit dix minutes après l'heure d'arrivée prévue. Mes compagnons d'infortune m'ont assuré que ce retard n'avait rien d'inhabituel ; je sortais d'ailleurs d'une expérience similaire sur Paris-Clermont, toujours avec *Air France*. De fort méchante humeur – j'avais dû me lever à 7 heures pour me présenter à temps à l'embarquement –, j'ai tenté d'apaiser ma colère en réfléchissant sur les raisons qui faisaient que j'allais perdre ma journée dans des avions et des aéroports, pour un voyage qui devenait sans objet à mesure que le temps passait.

La première raison qui s'est offerte à moi, alors que le pilote assurait pour la quatrième fois aux passagers sanglés dans la carlingue que le départ était imminent, a été la théorie classique du monopole. C'est le résultat le plus vénérable et le mieux assuré de la modélisation mathématique en économie : lorsqu'il y a un seul vendeur pour un produit, le prix que paieront les consommateurs est plus élevé que lorsqu'il y a plusieurs vendeurs en concurrence.

De fait, *Air France* est la seule compagnie à desservir Paris-Bastia. Toutefois, la théorie du monopole ne collait pas exactement à la situation présente : je ne me plaignais pas que le prix du billet soit trop élevé, mais, du fait que la compagnie se permette une heure et demie de retard pour un vol d'une heure et demie. D'ailleurs, *Air France* a perdu la situation de monopole qu'elle exerçait sur les lignes intérieures (via *Air Inter*), et l'on peut penser que le prix pratiqué n'est pas trop loin d'un prix concurrentiel, sinon une autre compagnie ouvrirait une ligne concurrente. Ce n'était pas un problème de prix, mais un problème de qualité.

L'avion décolle enfin et, en vol, je me dis que le problème est que la qualité du bien vendu, à savoir Paris-Bastia-Paris, ne peut être contrôlée *a priori*. Dans le jargon des économistes, il s'agit d'un bien d'expérience. Si j'achète un œuf, je sais à peu près à quoi m'attendre : il peut

être plus ou moins frais, mais il est rare qu'il ne soit pas mangeable. En revanche, si j'achète un Paris-Bastia décollant d'Orly à 9 h 25, je n'ai aucun moyen de savoir s'il partira avec deux ou trois heures de retard. En d'autres termes, la qualité du produit ne peut être constatée au moment de l'achat, ce qui fait que la théorie classique du monopole ne s'applique pas : si j'avais su que l'avion partirait avec un tel retard, je n'aurais pas pris le billet. Comme la compagnie ne me remboursera pas pour autant, cela permet au monopoleur une nouvelle stratégie : vendre à un prix concurrentiel un produit de qualité prétendument concurrentielle, mais en réalité de qualité inférieure, sachant que le consommateur est incapable de discerner celle-ci à l'achat.

Le puzzle prend forme. *Air France* essaie de détourner le cours de mes réflexions avec un Nescafé tiède et un croissant gluant, mais je résiste sans grande difficulté. Le talon d'Achille de la stratégie pratiquée est que le client apprend : après un certain nombre d'expériences, je finirai bien par comprendre la réalité du service offert. Peut-être n'aurai-je pas le choix (on ne peut pas aller à Bastia en train), mais je trouverai que c'est cher payé. Le monopoleur peut donc pratiquer cette stratégie sur la clientèle occasionnelle, mais elle lui aliénera les voyageurs fréquents, spécialement ceux d'entre eux pour lesquels le temps compte, c'est-à-dire les hommes d'affaires.

Qu'à cela ne tienne, on va leur donner une compensation financière : et voilà pourquoi nous avons cette gamme de réductions pour ceux qui prennent l'avion souvent, des abonnements jusqu'à la carte *Fréquence Plus*. Cela revient à faire payer à cette clientèle-là, et à celle-là seulement, le service à son juste prix ; les autres continuant à payer à un prix élevé un service de mauvaise qualité.

Je suis plutôt content d'avoir compris, mais patatas ! Voilà que mon puzzle intellectuel tombe par terre. Si mon raisonnement était juste, il devrait s'appliquer au seul monopole de trans-

port qui subsiste encore, la *SNCF*. Mais celle-ci a une réputation opposée : les trains sont à l'heure, c'est même une des fiertés nationales que nous partageons à regret avec l'Helvétie. Pourquoi les trains sont-ils à l'heure alors que les avions sont en retard ? Pourquoi la *SNCF* ne joue-t-elle pas la même stratégie qu'*Air France* ?

Le pilote annonce la descente sur Bastia. La Corse se profile à travers les nuages, et la solution pointe dans ma tête. La *SNCF* ne pratique pas la même stratégie qu'*Air France*, car elle n'a pas les mêmes contraintes. *Air France* ne peut guère jouer sur les prix, en raison de la concurrence, mais se rattrape sur la qualité. En revanche, quels que soient les prix que pratique la *SNCF*, aucun autre opérateur ne viendra la concurrencer sur le réseau intérieur. La *SNCF* ressemble donc bien davantage à un monopoleur classique, qui choisit le niveau de production et les prix qui maximiseront ses revenus. La production de la *SNCF*, c'est le transport lui-même, certes, mais aussi sa qualité : respecter les horaires ne va pas de soi, mais nécessite des dispositifs, du personnel et des modes de gestion appropriés et coûteux. On peut donc s'attendre à ce que la *SNCF* combine prix et qualité de la manière la plus avantageuse pour elle, en terme de revenus, d'investissement et d'embauche de personnel, et il semble bien que la stratégie optimale passe par une qualité élevée. Voilà pourquoi les trains sont à l'heure, – mais à un prix sans doute très élevé ! Voilà sans doute aussi pourquoi la *SNCF* s'intéresse davantage au trafic voyageur qu'au fret.

La boucle est bouclée. Nous avons atterri à Bastia. Le pilote espère que nous avons fait un bon voyage et souhaite nous revoir bientôt sur les lignes d'*Air France*. En ce qui me concerne, cela ne va pas tarder ; vu l'heure qu'il est, je n'ai plus rien à faire à Bastia et je vais donc rentrer à Paris par le même avion. Le seul bénéfice que j'aurai tiré de cette journée est que cette chronique est prête.