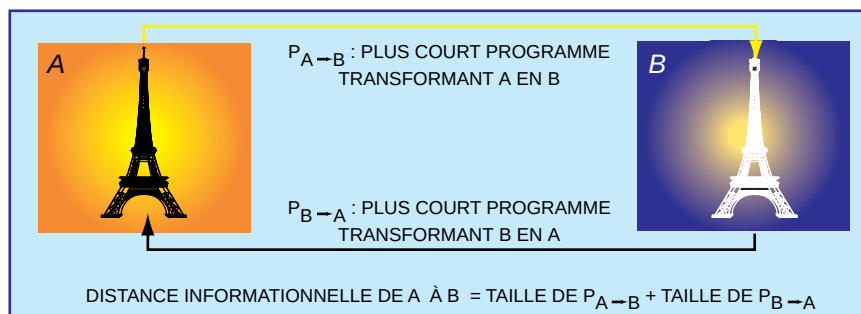




6. La distance informationnelle entre deux objets A et B s'obtient en additionnant la taille des plus courts programmes permettant de passer de A à B et de B à A. Elle possède des propriétés de minimalité qui lui confère une importance particulière en théorie algorithmique de l'information. De plus les rapports qu'elle a avec la thermodynamique du calcul lui donnent un sens physique que les autres distances ne possèdent pas.

en effet de très longues séquences d'événements assimilables à des opérations élémentaires de calculs dont les produits sont le langage, les sciences et plus généralement nos facultés d'analyse. Ces très longs calculs, sans que nous sachions précisément comment, ont produit dans nos cerveaux une notion d'analogie très fine et très efficace, essentielle à notre survie. Cette cristallisation est incomplète (il n'y a pas de raisons sérieuses de croire que notre intelligence échappe aux limitations formulées par la logique), mais elle est bien meilleure que celle que nous réussissons à insérer dans nos programmes : aujourd'hui nous ne savons pas écrire des programmes qui égalent notre capacité à percevoir des analogies.

LA DISTANCE ENTRE SÉQUENCES GÉNÉTIQUES

L'indécidabilité rend-elle la distance informationnelle stérile ? Heureusement non, car les majorations que l'on peut faire la rendent utilisable dans des cas sans doute assez nombreux.

Un exemple d'application de la distance informationnelle est la distance définie dans l'équipe de bio-informatique de Lille, composée de Max Dauchet, Éric Rivals, Jean-Stéphane Varré et moi, pour évaluer la distance entre séquences génétiques. Depuis longtemps les généticiens, et tout particulièrement ceux qui souhaitent faire de la reconstitution d'arbres phylogénétiques (ce sont les arbres qui indiquent les parentés entre espèces animales et végétales), utilisent des mesures de ressemblance entre séquences génétiques. L'idée à la base des distances utilisées jusqu'à présent était le décompte des mutations, délétions ou insertions de nucléotides (les lettres de l'alphabet génétique) : plus le nombre des changements ponctuels nécessaires pour passer d'une séquence à l'autre

est grand, plus les séquences sont considérées comme éloignées. Récemment nous avons proposé une nouvelle distance qui mesure l'éloignement entre séquences en considérant d'autres événements possibles comme les déplacements de morceaux de séquences ou leur duplication. Cette distance, que nous avons conçue comme une approximation calculable de la distance informationnelle, est plus précise que les distances utilisées classiquement (qu'elle généralise). On peut donc espérer qu'elle fournira des arbres phylogénétiques plus exacts.

Notons encore que les algorithmes modernes de compression de données pour les images de films sont fondés sur l'idée que deux images successives A et B d'une séquence sont proches et que, pour gagner de l'espace, il suffit de ne coder que leur différence : ce qui change dans A pour obtenir B. Cette quantité d'informations permettant de passer de A à B est en fait la distance informationnelle entre A et B (ou presque, puisque l'on ne s'occupe pas du passage de B à A).

INTERPRÉTATION THERMODYNAMIQUE

L'interprétation thermodynamique de la distance informationnelle est une autre confirmation de son intérêt. Les cinq chercheurs physiciens, mathématiciens et informaticiens ont en effet démontré un résultat remarquable concernant la distance informationnelle : elle est liée aux coûts thermodynamiques minimaux de la transformation de A en B et de B en A.

On sait depuis quelques années, à la suite des travaux de Rolf Landauer et de Charles Bennett, qu'il est possible, en théorie, de réaliser des calculs sans dépense d'énergie et n'entraînant donc aucun accroissement de l'entropie physique. Lors d'un calcul, les seules dépenses d'énergie inévitables proviennent de l'utilisation d'opérations irréver-

sibles comme l'effacement d'une mémoire dont on peut se passer si l'on accepte de garder des informations inutiles en fin de calcul.

Il est alors intéressant de considérer le flux minimum d'informations (ajout d'informations à A au départ, effacement d'informations à la fin du calcul une fois B obtenu) pour transformer A en B de manière réversible. Cette distance déduite de considérations thermodynamiques est équivalente à la distance informationnelle : elle en diffère d'un facteur deux au plus. D'autres propriétés de minimalité confèrent, parmi toutes les distances envisageables, un statut privilégié à la distance informationnelle.

La distance informationnelle entre A et B est donc une quantité ayant un sens en thermodynamique, ce qu'aucune autre distance ou notion mathématique de similitude ne possédait jusqu'à présent. L'adéquation entre ce que donne la nouvelle distance et l'intuition, le lien avec le monde physique, ainsi que d'autres résultats sur la distance informationnelle trouvés par le groupe des cinq chercheurs autour de Charles Bennett montrent clairement qu'une notion profonde a été identifiée.

Jean-Paul DELAHAYE est directeur adjoint du Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille du CNRS.

e-mail : delahaye@lil.fr

C. BENNETT, et al. *Thermodynamics of Computation and Information Distance*. Proc. 25th ACM Symp. Theory of Computation, pp. 21-30, 1993.

C. BERGE, *Espaces topologiques et fonctions multivoques*, Éditions Dunod, Paris, 1966 (voir le chapitre 6).

J.-P. DELAHAYE, *Information, complexité et hasard*, éditions Hermès, Paris, 1994.

M. LI et P. M. B. VITANYI, *An Introduction to Kolmogorov Complexity and Its Applications*, Springer-Verlag, 1997 (voir le chapitre 8).

J. SERRA, *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Academic Press, New York, 1982.

J.-S. VARRÉ, *Phylogénie et compression de données*, Publication du Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille, URA CNRS 369, juillet 1996.

J.-S. VARRÉ, E. RIVALS, M. DAUCHET et J.-P. DELAHAYE, *Les distances transformationnelles et applications à la phylogénie*. Journées Analyse des séquences génomiques, École Polytechnique (Palaiseau), 20 et 21 juin 1996.

Articles de P. Vitanyi sur Internet :

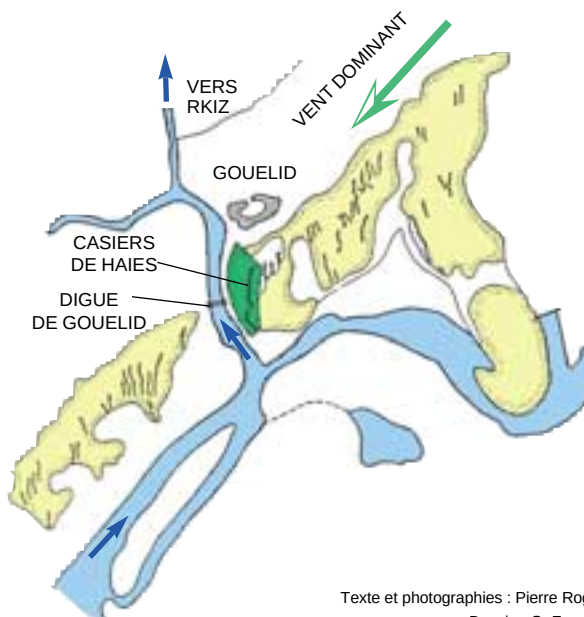
<http://www.cwi.nl/~paulv/publications.html>

L'avancée des dunes

Presque dépourvue de terres irriguées, la Mauritanie fonde de grands espoirs sur l'aménagement des 12 000 hectares de la cuvette de Rkiz, au Sud-Ouest du pays. Cette dépression est actuellement inondée chaque année par un marigot qui y déverse le surplus de la crue du Sénégal en période de hautes eaux. La construction du barrage de Diama, en 1985, permet progressivement de remplacer les cultures de décrue, peu rentables, par des cultures irriguées en permanence.

Toutefois, le projet ne tenait pas compte de la progression de dunes vives qui, poussées par l'harmattan, vent de Nord-Est, menacent de combler le marigot qui amène l'eau à Rkiz. En effet, la présence de ces dunes dans une région sahélienne couverte d'acacias est inhabituelle. Elle s'explique par l'extrême dégradation de la végétation due au surpâturage et à la surexploitation du bois, dans un milieu fragilisé par les sécheresses persistantes qu'a connues cette région pendant plus de 20 ans.

Pour s'opposer à l'ensablement, des haies de branches finement tressées ont été disposées en casiers, perpendiculairement à la direction de l'harmattan (flèches sur les photographies). Ce dispositif traditionnel n'arrête toutefois que des apports modérés de sable. Aujourd'hui, ces dunes déjà formées s'avancent en vagues successives (voir la photographie 1, face au vent) et submergent rapidement le dispositif de haies pourtant très dense, installé sur la dernière colline avant le marigot (voir la photographie 2). Ayant comblé les casiers (voir la photographie 3), elles redescendent déjà sur le flanc de la colline vers le marigot que l'on aperçoit à l'arrière-plan de la photographie 4 (dos au vent). Il faudrait mettre en œuvre de nouvelles techniques de lutte contre ces dunes mobiles si on ne veut pas voir disparaître les espoirs d'aménagement de la cuvette de Rkiz.



Texte et photographies : Pierre Rognon
Dessin : G. Forgiarini





Biologie

Non, l'avenir n'est pas héréditaire

Hervé Ponchelet. Éditions Belin, 1997.

Le livre qu'Hervé Ponchelet, journaliste à l'hebdomadaire *Le Point*, consacre à certaines dérives actuelles de la génétique est le cri de protestation, parfois indigné, parfois effaré, d'un observateur extérieur au monde scientifique, mais attentif. Toute la réflexion d'H. Ponchelet se fonde sur les travaux et les commentaires de généticiens et de spécialistes de la procréation eux-mêmes engagés dans le débat ; d'ailleurs, son ouvrage comporte de nombreuses citations. De l'une à l'autre, l'auteur dévide le fil de sa propre analyse et, parfois, manifeste sa révolte. Cette construction très journalistique a l'avantage de fournir un beau reflet des débats actuels sur les dérives de la génétique et de la «procréatique». En revanche, elle amène parfois l'auteur à adhérer, successivement, à des analyses dont les principes sont notoirement différents. Peut-être cela rend-il encore plus authentiques les sentiments exposés par un observateur confronté à différentes prises de positions, parfois irréductibles les unes aux autres, mais véhiculant toutes au moins des «vérités partielles».

Cette hésitation se ressent particulièrement dans la première partie, qui est consacrée aux liens du sang et à la filiation. L'auteur distingue bien les deux types de filiations caractéristiques du monde de l'homme : la filiation du sang et la filiation de l'esprit. Adversaire évident de la tyrannie du «droit du sang», opposé aux droits qui reposent sur des liens intellectuels et affectifs, H. Ponchelet n'en n'est pas moins, de manière parfois un peu singulière, très sensible à la revendication virulente du «droit à la connaissance de ses origines biologiques», qu'il s'agisse de la fécondation par sperme de donneur, de l'adoption, voire de l'accouchement sous X.

Cette revendication a de nombreux supporters, notamment parmi les psychanalystes, auxquelles l'auteur donne abondamment la parole. Les arguments présentés sont de trois ordres : droit à la vérité, importance de «l'enracinement» dans le développement harmonieux d'une personnalité et intérêt biologique de l'enfant. Ces trois arguments sont de qualité, mais ignorent habituellement le fait, bien connu de tous les généti-

ciens, qu'environ dix pour cent des enfants venus au monde «naturellement» et élevés par le couple géniteur théorique... ne sont en fait pas les enfants biologiques de leur père.

Collectivement, le nombre de ces enfants est bien supérieur à celui de ceux issus de l'adoption ou de l'assistance médicale à la procréation. Au nom des principes évoqués précédemment, qui de bonne foi prétendrait qu'il est essentiel de leur indiquer toujours, le moment venu, l'identité du géniteur ? En réalité, l'intransigeance et le systématisme de cette revendication d'une connaissance obligatoire de ses origines biologiques procède, qu'on le veuille ou non, de l'analyse que la filiation du sang, la loi des gènes, s'imposent de façon incontournable, dans l'espèce humaine comme dans le monde animal. Ce sentiment correspond à un fort courant de nos sociétés modernes où la conjonction du retour à un certain intégrisme religieux et d'un matérialisme de fait amène à considérer que, après tout, les hommes et les femmes n'ont peut-être pas grand-chose d'autre à transmettre à leurs enfants... que leurs gènes.

Dans sa deuxième partie, H. Ponchelet s'inquiète très justement d'une certaine évolution de la génétique des comportements dont les objectifs et les résultats, mal présentés et mal compris, sont «pain béni» pour les vieilles idéologies déterministes et racistes. Le caractère idéologique des assertions plus que centenaires sur l'inégalité des aptitudes intellectuelles des différentes races est bien souligné, de même que l'absurdité d'un certain réductionnisme ramenant un comportement humain à un déterminisme génétique rigoureux et simple. L'auteur aurait également pu noter l'incroyable erreur de perspective de beaucoup des généticiens du comportement et des neurobiologistes, qui franchissent allégrement le pas entre la découverte qu'un gène joue un rôle essentiel dans un comportement adaptatif inné animal, et la conclusion que son influence chez l'homme est similaire. Ce que néglige totalement une telle démarche, c'est le caractère proprement humain de la réappropriation de certains comportements innés. Ainsi, un même trait comportemental sélectionné par l'évolution depuis des centaines de millions d'années s'exprime-t-il de manière bien différente chez des mammifères humains et non humains : le désir sexuel, par exemple, ne se manifeste chez les chevaux que par la saillie de l'étalon, mais, au-delà de l'acte sexuel lui-même, par près de la moitié de la production poétique et artistique des sociétés humaines !

Là est vraiment le monde de l'homme, et non pas dans le fait évident que de mêmes gènes gouvernent la différenciation mâle ou femelle dans l'espèce humaine et dans les autres espèces !

Dans la troisième partie, l'auteur aborde le grave sujet d'actualité de la «tare génétique». Il illustre la vieille notion de l'atavisme par la saga des Rougon-Macquart de Zola. Il aurait, en fait, pu remonter beaucoup plus loin, par exemple à l'image du destin dans la tragédie grecque. Fardeau génétique, stigmatisation du lignage, certitude d'un destin contraire, la tare génétique est au centre des angoisses et des fantasmes humains. Vouloir y échapper, de toutes ses forces, par tous les moyens, fait en effet planer le spectre de la réminiscence des aspirations eugéniques qui, sous une forme ou sous une autre, sont présentes dans les sociétés humaines depuis des millénaires. Avec l'évolution de la génétique moderne, c'est à la fois le «gène prison» et le «gène libérateur» qui s'annoncent, et cela H. Ponchelet le présente avec beaucoup de sensibilité et de lucidité. Le gène impliqué dans la survenue d'une maladie, qu'il ait le statut du coupable principal ou de facteur de prédisposition, c'est en effet à la fois l'espoir d'un traitement de nature à atténuer le fardeau pathologique de l'humanité, mais c'est aussi la menace de transformer les droits de l'homme en les droits laissés à un homme particulier en fonction de ses gènes ! L'ampleur de ces enjeux et l'importance de ces débats sont telles que leur exposition claire par un journaliste attentif et humaniste est naturellement la bienvenue.

Axel KAHN

Astronomie

Imago Mundi

Francesco Bertola (traduit de l'italien par A. Hayli et É. Schelstraete). La Renaissance du Livre, 1996.

Ce luxueux ouvrage sur l'imagerie cosmique nous rappelle que la cosmologie, science de l'Univers considéré dans son ensemble, est aussi un projet esthétique. L'étymologie même du mot l'indique : en grec, le *kosmos* désignait d'abord la parure des femmes, les ornements, le bel aspect physique ou moral. La notion de cosmos appliquée à l'organisation de l'Univers apparut vers le

VI^e siècle avant notre ère. Attribuée à Pythagore, elle signifie que le «monde» (terrestre et céleste) ou l'«univers» n'est pas décrit par le chaos sur lequel Hésiode avait fondé sa *Théogonie* deux siècles plus tôt ; au contraire, le monde est supposé beau et bien ordonné. Y aurait-il d'ailleurs une physique possible s'il n'y avait des lois reflétant un ordre sous-jacent ?

Ces discussions étymologiques sont parfaitement rappelées dès l'introduction d'*Imago Mundi* (j'ajoute que le mot latin *mundus* a donné l'adjectif «mondain», qui comporte aussi une connotation esthétique : imagine-t-on un mondain qui serait sale ou débraillé ?). L'auteur, Francesco Bertola, professeur d'astrophysique à l'Université de Padoue, est membre de la fameuse *Accademia dei Lincei* qui compta Galilée parmi ses membres et dont la visée humaniste a toujours voulu rassembler les arts et les sciences. Au cœur d'un pays au passé inépuisablement riche, où de somptueuses bibliothèques (Bibliothèque de Babel à Vicence, Bibliothèque vaticane à Rome, Bibliothèque nationale à Naples, Bibliothèque marciana à Venise, etc.) cachent des trésors peints, gravés, enluminés, et où les musées d'histoire des sciences foisonnent (que notre pays en prenne leçon), F. Bertola est idéalement placé pour être le maître d'œuvre de cet ouvrage dont le titre, *Imago Mundi* (Image du Monde) puise à la culture médiévale : il fait référence à ces encyclopédies (Honoré d'Auton, XII^e siècle, Gautier de Metz, XIII^e siècle, et Pierre d'Ailly, XV^e, cette dernière ayant été soigneusement consultée par Christophe Colomb avant qu'il n'entreprît ses voyages) qui avaient pour double but d'émerveiller le lecteur, par la diversité des phénomènes naturels, et de le faire réfléchir sur l'unité sous-jacente – le «monde, ou univers», étant «l'ensemble des parties qui sont réunies pour former un tout unique». Ainsi s'est mise en place une tradition iconographique dont F. Bertola souligne judicieusement l'extraordinaire continuité.

L'histoire des représentations de l'Univers, depuis les cosmologies de l'Antiquité jusqu'aux théories les plus récentes de l'après Big Bang, montre à l'évidence que le long chemin ayant conduit du cercle, figuration de la perfection divine chez les Grecs, à l'écume des bébés-univers jaillie de l'inflation chaotique, est pavé des mêmes principes de symétrie et d'harmonie. Il en résulte qu'au-delà de leur importance physique et métaphysique, les représentations de l'Univers ont toujours dégagé une puissante émotion esthétique. La diversité des conceptions et des représentations du cosmos illustre la richesse des civilisa-

tions et des modes de pensée. Cet ouvrage présente une partie du foisonnement de ces conceptions et leur évolution au cours des âges.

Il faut souligner en premier lieu l'extrême qualité du choix de l'iconographie et des commentaires qui accompagnent cette dernière (leur mise en valeur étant plus discutable, comme je le dirai plus loin). Les reproductions vont de manuscrits du XI^e siècle jusqu'aux œuvres d'art contemporain et à l'imagerie scientifique moderne.

En ce qui concerne les représentations anciennes (antérieures au XX^e siècle), le choix iconographique est somptueux : que d'émerveillement pour les lecteurs qui vont pénétrer pour la première fois dans l'univers foisonnant de l'imagerie cosmique, et découvrir les prodiges d'imagination dont ont fait preuve savants et artistes pour mettre en scène les systèmes du monde.

Tous les grands classiques sont au rendez-vous. Parmi les imprimés, on trouve les cartes célestes de Bayer et Dürer, le célèbre livre d'Apianus à figures mobiles, les atlas richement décorés de Cellarius et de Doppelmaier, les ouvrages mi-cosmologiques, mi-mystiques de Robert Fludd et Thomas Wright, les émouvants schémas extraits d'œuvres scientifiques aussi capitales que celles de Copernic, de Tycho Brahe, de Kepler ou de Descartes.

On trouve aussi de splendides illustrations de manuscrits célèbres, tels le *Livre des subtilités* d'Hildegarde de Bingen, le *Bréviaire d'amour* de Maître Ermengaud, le *Liber Floridus* de Saint-Omer, les *Échecs amoureux* de Louise de Savoie. Là encore ne figurent que quelques grands classiques de l'enluminure médiévale ; pas de surprise ni de découvertes donc pour celui qui connaît déjà le sujet, à l'exception peut-être du manuscrit peint au XV^e siècle par John Tolhoff, qui illustre l'astronomie de l'Arabe Ibn al-Haytham, plus connu sous le nom d'al-Battani.

En ce qui concerne les illustrations modernes, le choix est moins heureux et, surtout, moins riche. C'est l'une des relatives faiblesses de ce livre : l'*Imago Mundi* moderne est sacrifiée. L'auteur a sans doute volontairement restreint son propos à l'image mentale du cosmos, celle qui laisse la part belle à l'imagination et au sens esthétique (le mot image se réfère à la représentation, mais aussi à l'imagination). Cependant, les clichés du fond diffus cosmologique saisis par le satellite COBE, ou encore les cartographies de l'Univers prises dans les domaines spectraux non visibles – radio, infrarouge, rayons X... –, qui constituent l'évolution majeure de

l'observation astronomique de ce siècle, ne dépareraient ni le propos ni l'esthétique de l'ensemble. Or, ils sont totalement absents. Pourtant, ces cartes ne sont pas si «objectives» que cela : le traitement en fausses couleurs arbitraires des clichés astronomiques pris hors du spectre visible relève aussi d'un choix esthétique. Au lieu de cela, nous avons droit à quelques simulations numériques traduites en images de synthèse à la résolution pauvre (écran d'ordinateur oblige), pour nous montrer la structure à grande échelle de l'Univers ou le modèle d'univers autoreproducteur. Quant aux quelques «vues d'artistes», elles présentent un intérêt iconographique, me semble-t-il, inférieur au reste de l'ouvrage.

Imago Mundi n'est pas seulement un livre d'images. Le texte d'accompagnement se divise en une introduction, un développement et des légendes d'illustrations, tous passionnants et faciles à lire pour le lecteur néophyte (notons aussi la présence d'une traduction anglaise en fin d'ouvrage).

L'introduction explicite clairement les intentions de l'auteur. Elle est aussitôt suivie d'un premier cahier iconographique constitué de 18 planches imprimées sur du papier calque d'excellente qualité. Le procédé permet de superposer diverses visions de l'Univers à travers les siècles et les cultures : grâce à la légère transparence, les représentations se fondent discrètement l'une dans l'autre et, du coup, illustrent parfaitement la continuité de la tradition iconographique.

Le développement intitulé «Brève histoire des conceptions sur l'Univers» est exclusivement chronologique. Il traite successivement des cosmologies grecques, de la vision du monde des Pères de l'Église, de l'univers médiéval, des grands changements que l'astronomie a connus aux XVI^e et XVII^e siècles, des univers-îles supposés, puis découverts par les télescopes des XVIII^e-XIX^e siècles, du devenir de l'univers à travers la révolution relativiste et ses fameux modèles de Big Bang, et d'une réflexion plus philosophique quant au rapport entre l'Univers et l'homme. J'ai noté avec plaisir que le texte de F. Bertola contenait de nombreuses citations, toujours judicieuses, émanant non seulement de savants ou de philosophes cosmologues, mais aussi de poètes visionnaires inspirés par la problématique cosmique : Dante (dont l'immortel chef-d'œuvre, *La divine comédie*, est un voyage initiatique à travers les divers cercles du monde et qui rassemble l'ensemble des connaissances cosmologiques de son temps), Edgar Poe (qui,