

positif que l'on peut choisir. Préciser et affiner les méthodes de transformation pour obtenir de telles machines réversibles pouvant se substituer aux machines non réversibles, en limitant le coût en temps et en mémoire, est bien évidemment essentiel pour que le calcul réversible soit utilisable avec efficacité.

b) La transformation automatique de programmes non réversibles en programmes réversibles est possible, mais ces transformations ne doivent pas être menées trop brutalement. Il y a sur ce thème une multitude de progrès à faire en considérant des méthodes adaptées à des classes particulières de programmes.

c) Pour faciliter l'écriture de programmes réversibles, on conçoit des langages de programmation de haut niveau avec des compilateurs associés qui produisent automatiquement des versions réversibles des programmes qu'on écrit. En particulier, on a développé des compilateurs de ce type pour le langage C. Un langage dénommé Janus, en l'honneur du dieu romain à deux visages, a été proposé dès 1986 : il est à la fois compact et puissant, puisqu'on peut, en quelques dizaines de lignes, programmer une machine de Turing universelle.

d) Plutôt que de programmer sans s'occuper de la réversibilité, puis de confier à un outil le soin de transformer le programme, il est plus efficace de concevoir directement des programmes réversibles. Pour des applications particulières, ces derniers optimiseront au mieux les temps de calcul et le volume de mémoire nécessaire à leur fonctionnement. De nombreux systèmes de codage (par exemple de compression sans pertes, ou en cryptographie) sont logiquement réversibles, tout simplement parce qu'il faut pouvoir décoder ce qu'on a codé. Aujourd'hui, ils ne sont pas programmés de manière réversible : on utilise par exemple des ET des OU, qui ne sont pas réversibles, et donc même si la transformation correspondant au codage est globalement réversible, ce qui est calculé lors du déroulement du programme ne l'est pas. Repenser ces programmes pour qu'ils soient réversibles est sans doute la meilleure façon de procéder. C'est

important, car ce type de programmes est d'usage très courant.

e) Tous les types de programmes, dont ceux par exemple destinés à la génération de suites pseudoaléatoires ou ceux utilisant de nombreuses opérations arithmétiques, font l'objet d'études particulières pour développer les bonnes méthodes qui en produiront des versions réversibles.

f) Les portes logiques réversibles, les circuits réversibles, la synthèse et l'optimisation de circuits réversibles sont maintenant assez bien compris et maîtrisés, même si les surcoûts créés par la réversibilité restent importants et ennuyeux pour les circuits complexes.

g) Des puces dotées de jeux d'instructions réversibles sont étudiées et perfectionnées.

h) Enfin, l'utilisation de modèle de calculs quantiques réversibles est l'objet d'attentions et de recherches dont l'aboutissement concret, même s'il n'est pas immédiat, pourrait devenir la solution pour perpétuer le rythme de progrès de nos machines.

Derniers doutes ?

Signalons quand même que certains théoriciens, physiciens ou philosophes des sciences, ont longtemps refusé d'admettre le principe de Landauer. Ils ont parfois prétendu qu'il n'y avait pas de minimum de dépense lors des opérations logiquement irréversibles. Dans le cas de l'ordinateur à mouvement brownien, on a aussi argumenté qu'il y avait bien d'autres dépenses inévitables. Parfois encore, c'est l'idée d'un lien entre réversibilité thermodynamique et la réversibilité logique qui est apparue inconcevable ou même absurde. Des reformulations du principe de Landauer ont été proposées, par exemple par Charles Bennett, pour éviter ces critiques.

Quelles seront les réactions des sceptiques face aux récentes expérimentations qui soutiennent le principe de Landauer ? Même si des discussions se poursuivront pour formuler le plus soigneusement possible ces questions délicates, le lien entre réversibilité logique et thermodynamique est avéré et l'informatique réversible sera un instrument de progrès pour les ordinateurs futurs. ■

L'AUTEUR



J.-P. DELAHAYE est professeur émérite à l'université de Lille et chercheur

au Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille [CRISTAL].

BIBLIOGRAPHIE

*J. Hong *et al.*, Experimental test of Landauer's principle in single-bit operations on nanomagnetic memory bits, *Science Advances*, vol. 2[3], e1501492, 2016.

*J. P. S. Peterson *et al.*, Experimental demonstration of information to energy conversion in a quantum system at the Landauer limit, *Proc. R. Soc. A*, vol. 472[2188], avril 2016.

*Y. Jun *et al.*, High-precision test of Landauer's principle in a feedback trap, *Physical Review Letters*, vol. 113, 190601, 2014.

K. Perumalla, *Introduction to reversible computing*, CRC Press, 2013.

*A. Bérut *et al.*, Experimental verification of Landauer's principle linking information and thermodynamics, *Nature*, vol. 483, pp. 187-189, 2012.

P. Uzan, Physique, information statistique et complexité algorithmique, *Philosophia scientiae*, vol. 11-2, 2007 (<https://philosophiascientiae.revues.org/347#text>).



Retrouvez la rubrique Logique & calcul sur www.pourlascience.fr

SCIENCE & FICTION

Un sommeil de glace

Pour traverser la Galaxie sans avoir à supporter de longs et ennuyeux voyages, rien n'égale le sommeil cryogénique. En refroidissant le corps, on en ralentit le métabolisme – un principe qui a des applications médicales.

Roland LEHOUCQ et Jean-Sébastien STEYER – Illustration : Marc BOULAY

D'innombrables œuvres de fiction invoquent un procédé qui interrompt temporairement la vie avant de la relancer. Si la sorcière de *Blanche Neige*, publiée en 1812 par les frères Grimm, utilise plutôt la magie pour plonger l'héroïne dans le sommeil artificiel, les histoires plus récentes sont dans un registre plus technique. Ainsi, dans *Star Wars : L'Empire contre-attaque* (Irvin Kershner, 1980), Han Solo est congelé dans de la carbonite, un matériau fictif, avant d'être remis au chasseur de primes Boba Fett.

Dans le louable souci de leur éviter l'ennui d'un interminable voyage interstellaire, les protagonistes de *La Planète des singes* (Franklin Schaffner, 1968), d'*Alien* (Ridley Scott, 1979) ou d'*Avatar* (James Cameron, 2009) sont eux aussi plongés en « animation suspendue », aussi nommée « stase » ou « sommeil cryogénique ». Comme le suggère cette dernière expression, il semble que, pour atteindre cet état, la température corporelle ait diminué au point que les fonctions métaboliques sont presque à l'arrêt.

Le refroidissement est sans doute la technique la plus utilisée dans les œuvres de fiction. *Hibernatus* (1969), d'Édouard Molinaro, raconte l'histoire d'un individu congelé vivant et réanimé soixante-cinq ans après, situation que l'on retrouve dans l'album *Le Savant fou*, de Tardi (1977), où une poignée de scientifiques ramènent à la vie un pithécantrophe conservé dans une gangue de tourbe gelée provenant de Sibé-



DANS LE FILM PASSENGERS (Morten Tyldum, 2016), les deux héros se réveillent de leur sommeil cryogénique trente ans après avoir été endormis, alors que le voyage est loin d'être terminé...

rie. La congélation permet une sorte de voyage dans le futur, comme dans le film *Demolition Man* (Marco Brambilla, 1993), où les criminels sont condamnés à une longue peine d'hibernation dans un cryopénitencier.

Il est bien connu que le froid préserve les aliments en ralentissant les réactions chimiques de décomposition ainsi que l'activité et la prolifération de microorganismes. Mais peut-on utiliser cette technique sur un humain ? L'idée d'utiliser le froid pour induire une animation suspendue de l'organisme n'est pas récente. Ainsi, Hippocrate (460-370 avant notre ère) suggérait de placer les soldats blessés dans la neige pour les maintenir en vie. En outre, la médecine a relevé quelques cas de personnes tombées dans des eaux glacées mais que l'on a pu réanimer, bien que leur cœur se soit arrêté.

Toujours en médecine, on utilise l'hypothermie induite et contrôlée pour ralentir le métabolisme de l'organisme (ou d'un organe particulier) et lui permettre ainsi de mieux résister à un manque d'oxygène. Par exemple, certaines opérations cardiaques nécessitent d'arrêter le flux sanguin pendant le travail du chirurgien. À température normale, les cellules nerveuses ne survivent que quelques minutes sans l'apport d'oxygène du sang. Au-delà, le cerveau subit des dégâts irréversibles et le sujet meurt.

Le chirurgien utilise donc la technique dite de cardioplégie froide, qui consiste à

© Sony Pictures Entertainment (2016)



LA CRYOGÉNISATION CONSISTE
à préserver le corps à très basse température, souvent dans l'espoir d'un futur où sa maladie, aujourd'hui incurable, aura un traitement. Cette idée semble relever de la science-fiction, mais que nous réserve vraiment l'avenir ?

installer une circulation sanguine extra-corporelle et à refroidir le cœur à moins de 35 °C. On peut alors l'arrêter et l'opérer. Avec le réchauffement de cet organe, en fin d'intervention, les battements cardiaques reprennent en général. Samuel Tisherman a testé une technique encore plus extrême à l'hôpital de Pittsburgh. Il a montré qu'en refroidissant le corps jusqu'à 10 °C grâce à une solution physiologique introduite dans le réseau sanguin, on peut stopper la circulation durant une trentaine de minutes. Cette technique n'est pas sans risques, car, à basse température, la coagulation ne se fait quasiment plus.

La congélation des tissus est encore plus problématique. Si l'on sait conserver à très basse température de petites quantités de matière organique vivante, du sperme ou des cellules souches par exemple, on en est loin pour des organes ou des corps entiers. En effet, quand des tissus sont gelés, des cristaux de glace se forment à l'intérieur des cellules. La glace occupant plus de volume que l'eau liquide, les cristaux intracellulaires finissent par détruire les parois de la cellule. On constate aisément ce phénomène lors de la décongélation d'un steak : une fois revenue à température ambiante, la viande libère un « jus » qui n'est rien d'autre que du liquide intracellulaire.

Certains organismes vivants se sont adaptés à des conditions climatiques rigoureuses. Ainsi, les poissons des glaces du groupe des notothenioïdes vivent dans les

eaux froides de l'Antarctique. Ils sont capables de vivre à des températures corporelles qui descendent parfois à -6 °C, car leur foie sécrète des protéines antigels. En enrobant les microcristaux de glace qui se forment dans le sang, ces protéines les empêchent de croître, ce qui protège l'animal de la congélation. À l'inverse, certaines grenouilles soumises au climat glacial de l'Alaska restent entièrement gelées pendant deux mois avant de se réveiller quand le climat s'y prête. Leurs organes résistent à l'apparition de lésions fatales grâce au sang de ces amphibiens qui contient un taux élevé de glucose, d'urée et de glycolipides, des antigels naturels.

Un marchand de sommeil cryogénique

Ces difficultés n'ont pas empêché de vendre le « miracle » de la cryogénisation des corps pour conjurer la mort. L'universitaire américain Robert Ettinger a popularisé cette idée dans son livre *La Perspective de l'immortalité* publié en 1962. En 1976, il a fondé l'institut Cryonics, où son corps, ainsi que celui de plus de deux cents personnes, est conservé *post mortem* à -196 °C dans l'attente d'une très hypothétique résurrection.

En attendant que la technique rende éventuellement réversible la cryoconservation des corps vivants, des progrès non cryogéniques ont porté sur l'animation suspendue de mammifères qui n'hibernent

pas naturellement, tels que les souris ou les chiens.

En 2005, des chercheurs de l'université de Pittsburgh ont réussi à ramener des chiens à la vie après avoir remplacé leur sang par une solution glacée spéciale. Cliniquement morts durant trois heures, les chiens ont été réanimés une fois leur cœur relancé.

Mark Roth, biochimiste de l'université de Washington à Seattle, a utilisé du sulfure d'hydrogène, gaz considéré comme un poison. Il a montré que des souris inhalant durant quelques minutes une faible dose de sulfure d'hydrogène (80 parties par million) perdent connaissance. Leur température chute de 37 à 25 °C et leur rythme respiratoire ralentit jusqu'à moins de 10 respirations par minute (au lieu de 120). Leur métabolisme ralentit et leurs cellules consomment alors moins d'oxygène. Exposées à un air normal après six heures, les souris se sont réveillées en bonne santé.

Dans le futur, ces techniques seront peut-être appliquées à des humains impliqués dans un grave accident, de façon à figer leur état le temps de préparer l'intervention médicale qui leur sauvera la vie. Mais l'application à des astronautes en partance pour une planète lointaine n'est sans doute pas pour demain... ■

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay. Jean-Sébastien STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. Marc BOULAY est sculpteur numérique.

ART & SCIENCE

Les données, objets d'art

Les mégadonnées, ou big data, sont devenues un eldorado pour les acteurs scientifiques, politiques, commerciaux... Les artistes s'en emparent aussi. Certains en font un instrument de dénonciation et invitent à nous interroger sur la place qu'il convient de donner à ces flots d'informations.

Loïc MANGIN

Aujourd'hui, dans de nombreux domaines, l'enjeu est d'exploiter de gigantesques flots de données afin d'en tirer des informations. Par exemple, en 2008, l'équipe de Barack Obama a analysé quantité d'informations pour mieux cerner les opinions politiques des citoyens américains. Nous sommes bel et bien dans l'ère des données massives.

Pour s'y retrouver, on compte sur des algorithmes toujours plus complexes. Cependant, selon l'historien Denis Peschanski, si l'on se contentait des corrélations mises en évidence, sans chercher les liens de causalité et les concepts pertinents, cette association entre données et algorithmes signerait la fin de la théorie. Comment sortir de cette impasse ? Peut-être en recourant à la datavisualisation, c'est-à-dire à la mise en image des informations. On peut alors réfléchir, questionner les données et aller au-delà des corrélations : le regard se fait critique. De fait, on observe un engouement pour la datavisualisation. C'est l'objet de l'exposition *Données à voir* au lieu nommé « La Terrasse : espace d'art de Nanterre », dans les Hauts-de-Seine.

La datavisualisation n'est pas récente. Dès 1869, Charles Joseph Minard, inspecteur général des ponts et chaussées à la retraite, proposa une représentation graphique synthétique du trajet et de l'effectif des armées napoléoniennes lors de la campagne de Russie (1812-1813) ainsi que de la température lors de la retraite.

Près d'un siècle plus tard, au moment des mouvements de contestation des années 1960, la représentation des données, des relations et des pouvoirs a séduit les artistes engagés politiquement. C'est à cette époque qu'ont travaillé notamment Öyvind Fahlström (1928-1979) et Mark Lombardi (1951-2000).

Le premier, Suédois né au Brésil, fut tour à tour poète, journaliste, cinéaste, peintre... Pour sa série *Column [a]*, il élabore des mappemondes très colorées qui mettent en évidence les intérêts économiques américains à travers le monde. Les données figurées (statistiques, économiques, géopolitiques...)

Si l'on se contentait des corrélations mises en évidence, l'association entre données et algorithmes signerait la fin de la théorie

sont présentées selon le code couleur suivant : en bleu les États-Unis, en violet l'Europe, du rouge au jaune les pays socialistes et du vert au marron les « pays du tiers-monde », comme on disait à l'époque. Le bleu dominant l'œuvre, Öyvind Fahlström dénonçait ainsi l'impérialisme américain.

L'Américain Mark Lombardi pratiquait aussi la datavisualisation sans ordinateur. Dans les années 1990, il rédigea plusieurs milliers de fiches de renseignement sur la base d'informations publiques et élaborait des diagrammes en réseau révélant les structures du pouvoir politicoéconomique. Ainsi, *Indian*

Springs State Bank [b] met en évidence les liens entre une banque, la mafia et l'affaire Iran-Contra, ou Irangate (des membres de l'administration Reagan ont vendu illégalement des armes à l'Iran pour financer secrètement les opposants au gouvernement sandiniste du Nicaragua). De son côté, avec *Addendum to Alfred Barr [c]*, l'Américain Ward Shelley propose une chronologie des mouvements artistiques qui l'ont influencé.

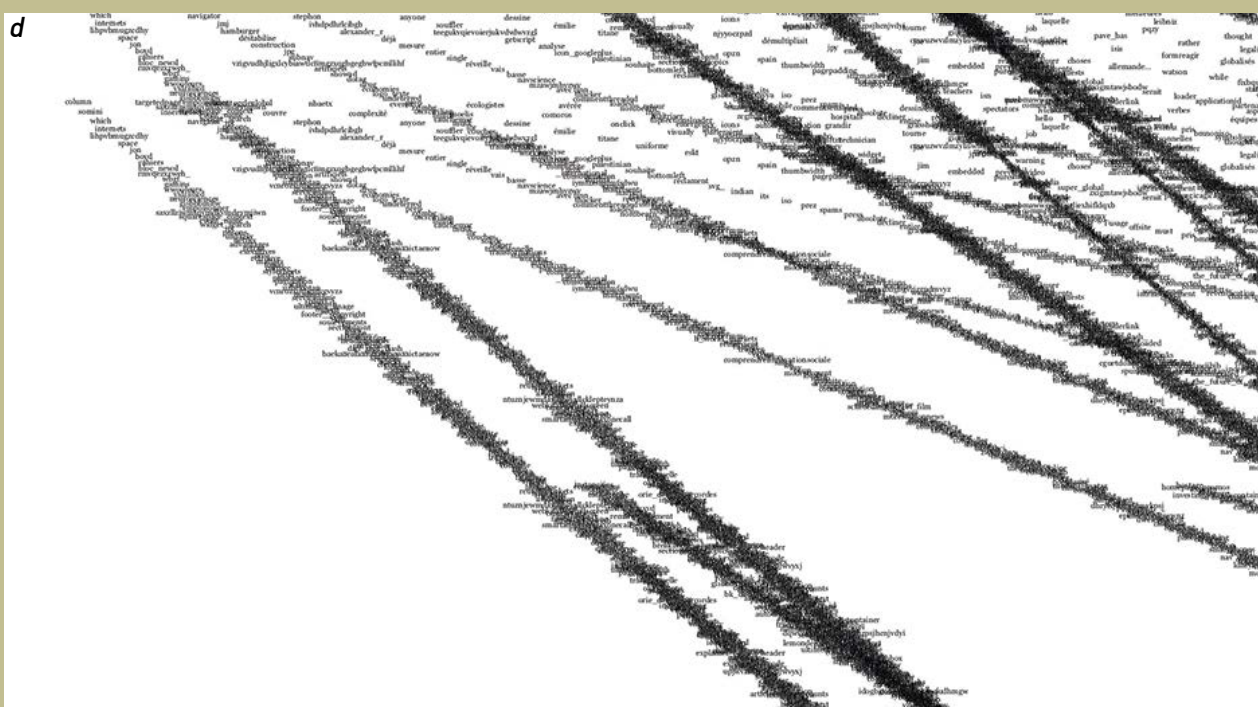
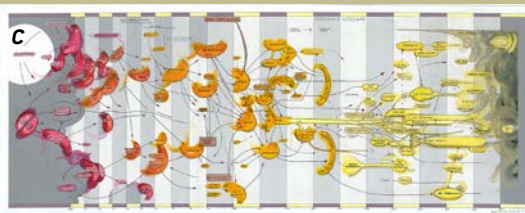
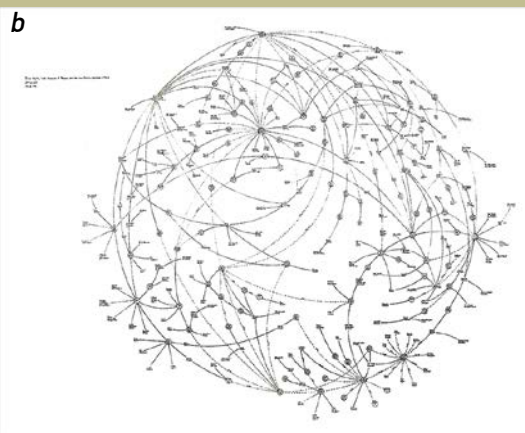
Dernier exemple, le Tunisien Ali Tnani présente *Data Trails [d]*, conçu avec le Suisse Lukas Truniger. Le point de départ est l'apparition soudaine du lac de Gafsa, au sud de la Tunisie, dès 2003. Ce lac devint célèbre en 2014 et l'on parla alors de miracle pour cette région sinistrée : le site s'est mué en une sorte de station balnéaire. Le rêve fut bref, car on découvrit que l'eau, surgie à proximité d'anciennes mines de phosphate, est très polluée. L'installation rend compte de ce désenchantement à partir des divers articles publiés sur Internet, dont les mots sont redistribués selon les motifs qui se succèdent sur un écran.

Les artistes ont donc fait des données un matériau à part entière. Un matériau complexe qui émane de l'ensemble de la société et qui l'irrigue en retour. Bien mises en images, on peut en faire l'instrument d'une nouvelle citoyenneté, voire, à en croire Gilles Deleuze, un nouveau modèle de vérité. ■

Données à voir, La Terrasse : espace d'art de Nanterre, du 7 octobre au 23 décembre 2016. Pour plus d'informations : www.nanterre.fr



Quel est le matériau principal de ces œuvres ? La peinture ? L'encre ? Non, il s'agit de données, publiques ou privées, que les artistes interprètent et offrent au regard pour mieux faire ressortir un message ou une information : *Column* par Öyvind Fahlström (a), *Indian Springs State Bank* par Mark Lombardi (b), *Addendum to Alfred Barr* par Wald Schellej (c) et *Data Trails* par Ali Tnani et Lukas Truniger (d).



OFFRE DÉCOUVERTE

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE



1 AN - 12 N^{os}
59€ **24% d'économie**

2 ANS - 24 N^{os}
110€ **29% d'économie**

3 ANS - 36 N^{os}
159€ **32% d'économie**

BULLETIN D'ABONNEMENT

POUR LA SCIENCE

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'Industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

☐ **OUI, je m'abonne à Pour la Science en formule Découverte :**

- ☐ **1 an • 12 numéros • 59€** au lieu de 78,50€ (D1A59E)
- ☐ **2 ans • 24 numéros • 110€** au lieu de 157€ (D2A110E)
- ☐ **3 ans • 36 numéros • 159€** au lieu de 235,50€ (D3A159E)

MES COORDONNÉES

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____

Ville : _____

Tél. : _____

Pour le suivi client (facultatif)

MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Par carte bancaire

N° _____

Date d'expiration _____ Clé _____

Signature obligatoire



PAS471B

Mon e-mail pour recevoir la newsletter Pour la Science (à remplir en majuscule). _____@_____

Grâce à votre email nous pourrions vous contacter si besoin pour le suivi de votre abonnement. À réception de votre bulletin, comptez 5 semaines pour recevoir votre n° d'abonné. Passé ce délai, merci d'en faire la demande à pourlascience@abopress.fr

J'accepte de recevoir les informations de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON et de ses partenaires ☐ OUI ☐ NON

Délai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/01/17 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à Pour la Science.