

ses lignes cinglantes sont révélatrices d'une certaine réalité. En véhiculant la possible frustration de Magnien, alors mort depuis près de 30 ans, son témoignage tardif reflète le fonctionnement collectif du « bureau de traduction de Dijon », où l'apprentissage concomitant de la langue et la traduction se forgeaient en atelier d'écriture.

Une facilité pour les langues

On ignore comment Mme Picardet apprit l'anglais et l'italien, langues qu'elle est la première du groupe à traduire, respectivement dès 1774 et 1782, alors que Magnien n'apparaît qu'en 1781. Morveau affirme qu'elle a « beaucoup de facilité pour les langues » et, comme lui, comme bien d'autres traducteurs de l'époque et proba-

blement comme Magnien un peu plus tôt, elle apprend le suédois « à force de collationner » les traductions sur les originaux, après avoir peut-être commencé par en polir les ébauches de ce dernier, revues par Morveau. Les traductions dijonnaises à partir du suédois sont d'abord signées Magnien (« M.M. de Dijon » ou « M. Mgn de Dijon »); « Mme P*** de Dijon » apparaît 11 mois plus tard.

Motivée par ses propres intérêts, poussée par ses proches et par le milieu, Mme Picardet en apprit assez, à l'aide de dictionnaires et de collaborateurs, pour traduire des textes scientifiques avec une rigueur et une élégance constatées par les critiques. Elle fut ainsi femme de sciences, autant qu'une femme pouvait l'être en France à l'époque, exerçant une influence sur son domaine comme sur la traduction et la presse scientifique naissante. ■

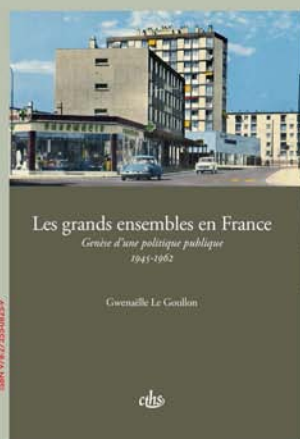
■ À ÉCOUTER

Le jeudi 11 décembre, de 14h à 15h, Patrice Bret participera avec Adeline Gargam, docteure en littérature française, à une émission de **La marche des sciences**, sur *France Culture*, consacrée aux femmes de sciences. Il y reviendra sur le rôle et l'influence de Mme Picardet dans la diffusion des sciences au siècle des Lumières.

www.franceculture.com

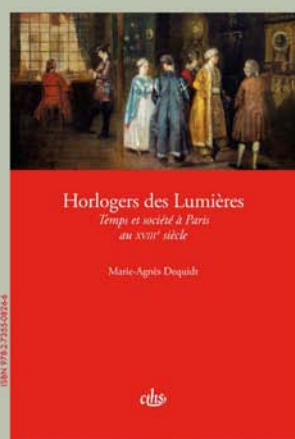
Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

une collection complète d'instruments de travail pour la recherche en sciences humaines



Les grands ensembles en France
Gwenaëlle Le Goulon

360 pages
15 x 22 cm
br.
28 €



Horlogers des Lumières
Marie-Agnès Dequidt

400 pages
15 x 22 cm
br.
29 €

Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques • ventes@cths.fr • vente en librairie ou sur notre site : www.cths.fr • Distribution Sodis

LOGIQUE & CALCUL

Une seule intelligence ?

Fabriquer de l'intelligence est un défi que l'informatique veut relever. Quand elle réussit, c'est toujours de manière limitée et en évitant d'aborder de front l'intelligence humaine, qui reste mystérieuse.

Jean-Paul DELAHAYE

L'idée qu'il existe plusieurs types d'intelligence séduit le grand public, car elle évite à chacun de se trouver en un point précis d'une échelle absolue et parce que chacun espère bien exceller dans l'une des formes d'intelligence dont la liste tend à s'allonger. Cette pluralité d'intelligences a été proposée par le psychologue américain Howard Gardner : dans son livre *Frame of Mind* de 1983, il énumère huit types d'intelligence. Très critiquée, par exemple par Perry Klein de l'Université d'Ontario qui la considère tautologique et non réfutable, cette théorie est à l'opposé d'une autre voie de recherche affirmant qu'il n'existe qu'une sorte d'intelligence à concevoir mathématiquement avec l'aide de l'informatique et de la théorie du calcul.

Dames, échecs, go

Évoquons d'abord l'intelligence des machines et la discipline informatique dénommée « intelligence artificielle ». Il faut l'admettre, aujourd'hui, les machines réussissent des prouesses qu'autrefois tout le monde aurait qualifié d'intelligentes. Nous ne reviendrons pas sur la victoire définitive de l'ordinateur sur les meilleurs joueurs d'échecs, consacrée en 1997 par la défaite de Garry Kasparov (champion du monde) face à l'ordinateur *Deep Blue*, unanimement saluée comme un événement majeur de l'histoire de l'humanité.

À cette époque, pour se consoler peut-être, certains ont remarqué que les meilleurs programmes pour jouer au jeu de go étaient d'une affligeante médiocrité. Or, depuis quelques années, des progrès spectaculaires ont été réalisés et aujourd'hui les machines, sans égaler les champions et les professionnels, ont atteint le niveau des très bons joueurs amateurs. En mars 2013, le programme *Crazy Stone* du chercheur français Rémi Coulom, de l'Université de Lille, a battu le joueur professionnel japonais Yoshio Ishida qui, au début de la partie, avait laissé un avantage de quatre pierres au programme. Le programme est considéré avoir un niveau de « sixième dan » (classement KGS) : il y a environ une dizaine de joueurs français à ce niveau, et moins de 500 dans le monde.

Le succès de l'intelligence artificielle au jeu de dames anglaises est absolu. Depuis 1994, aucun humain n'a battu le programme canadien *Chinook* et, depuis 2007, on sait que le programme joue une stratégie optimale, impossible à améliorer. Pour le jeu d'échecs, on sait qu'il existe aussi des stratégies optimales, mais leur calcul semble hors d'atteinte pour plusieurs décennies encore.

L'intelligence des machines ne se limite plus aux problèmes bien clairs de nature mathématique ou se ramenant à l'exploration d'un grand nombre de combinaisons. Cependant, les chercheurs en intelligence artificielle ont découvert, même avec les jeux de plateau cités, combien il est difficile

d'imiter le fonctionnement intellectuel humain : aux jeux de dames, d'échecs ou de go et bien d'autres, les programmes ont des capacités équivalentes aux meilleurs humains, mais ils fonctionnent très différemment. Cela ne doit pas nous interdire d'affirmer que nous avons mis un peu d'intelligence dans les machines : ce ne serait pas *fair-play*, face à une tâche donnée, d'obliger les machines à l'affronter en imitant servilement nos méthodes et modes de raisonnement.

Véhicules intelligents

Le cas des véhicules autonomes est remarquable aussi de ce point de vue. Il illustre d'une autre façon que lorsque l'on conçoit des systèmes nous imitant à peu près pour les résultats, on le fait en utilisant des techniques le plus souvent totalement étrangères à celles mises en œuvre en nous par la nature, et que d'ailleurs nous ne comprenons que très partiellement : pour le jeu d'échecs par exemple, personne ne sait décrire les algorithmes qui déterminent le jeu des champions.

La conduite de véhicules motorisés demande aux êtres humains des capacités qui vont bien au-delà de la simple mémorisation d'une quantité massive d'informations et de l'exploitation d'algorithmes traitant rapidement et systématiquement des données symboliques telles que des positions de pions sur un damier. Nul ne doute que pour conduire comme nous des

1. Des tests d'intelligence où la machine gagne

Les tests d'intelligence inventés par le psychologue français Alfred Binet (1857-1911) ne sont sans doute pas un bon moyen de mesurer l'intelligence des machines. En effet, des programmes dont il est impossible de soutenir qu'ils sont réellement intelligents obtiennent d'assez bons scores à certains de ces tests.

Par exemple, en 2003, Pritika Sanghi et David Dowe ont écrit un programme qui obtient un score proche du score humain moyen dans une grande variété de tests du type illustré ici.

Ce programme, pas très compliqué, se fonde sur quelques principes simples fréquemment utilisés par les créateurs de tests. En le perfectionnant, ce programme atteindrait probablement les meilleurs scores humains. Cela ne prouve pas que les programmes sont intelligents, mais plutôt que ces tests sont insuffisants pour caractériser et mesurer l'intelligence générale.

Une catégorie particulière de tests est d'ailleurs bien mieux réussie par la machine que par l'homme, et vous pouvez vous-même en faire l'expérience. Considérons par exemple la suite de nombres entiers :

3, 4, 6, 8, 12, 14, 18, 20, 24, 30, 32, 38, 42;

La question est : quels sont les trois nombres venant logiquement derrière ? Vous reconnaissez la suite des nombres premiers augmentés d'une unité : $2+1$, $3+1$, $5+1$, $7+1$, $11+1$, $13+1$, $17+1$, etc. Les nombres qui suivent sont donc : $43+1$, $47+1$, $53+1$, soit 44, 48, 54.

Il existe un site Internet (<https://oeis.org/>) qui répond parfaitement à ce type de tests :

L'« Encyclopédie des suites numériques en ligne » de Neil Sloane. En lui soumettant la question, il trouve instantanément la bonne réponse. Il propose d'ailleurs d'autres réponses que vous n'auriez pas imaginées. Celle qu'il indique en second est : nombres n tels que pour tout entier k premier avec n et supérieur à k^2 , le nombre $n - k^2$ est premier. Cette seconde

Considérez la suite



Quel dessin parmi ces quatre continue la suite ?



réponse logique conduirait à proposer les trois entiers : 48, 54, 60. Elle est beaucoup plus compliquée que la première et ne serait bien évidemment pas la réponse que donnerait un système programmé à partir de l'Encyclopédie à qui on demanderait de fournir une seule réponse.

La perspicacité de ce système est bien supérieure à celle d'un être humain. Pour vous en convaincre, essayez de résoudre les énigmes posées par les cinq suites suivantes :

- A : 11, 12, 14, 16, 20, 21, 23, 25, 29
- B : 11, 31, 71, 91, 32, 92, 13, 73
- C : 3, 7, 14, 23, 36, 49
- D : 1, 2, 4, 5, 10, 20, 29, 58, 116

E : 1, 4, 5, 7, 8, 11, 13, 14, 16, 22, 25, 28, 31, 34

Les réponses sont indiquées en gras ci-dessous. Toutes ces réponses sont trouvées instantanément par le programme de l'Encyclopédie, et on peut lui soumettre des questions bien plus difficiles. Il n'est cependant pas raisonnable de considérer que ce programme est en quoi que ce soit intelligent. Il se contente d'aller rechercher la suite qu'on lui propose dans une base de données (soigneusement complétée depuis des années), et il fournit la plus simple des réponses (la notion de simplicité étant déterminée par le contenu de l'encyclopédie qui classe les

Complétez le tableau

2	4	8
3	6	12
4	8	?

suites). Le succès du programme provient de sa mémoire et de sa capacité à la parcourir rapidement sans erreur, alors qu'un humain, face à ce type de problèmes, mène des calculs de tête et tente directement de repérer des structures. Comme c'est le cas pour de nombreuses applications d'intelligence artificielle, la réussite – extraordinaire ici – du logiciel est obtenue par une méthode sans aucun rapport avec celle mise en œuvre par une intelligence humaine.

Récemment, on a réussi à programmer un système informatique pour qu'il joue et gagne à un jeu, *Jeopardy!*, demandant apparemment de

maîtriser un grand nombre de connaissances de culture générale et, en même temps, de comprendre le langage naturel (l'anglais).

Très populaire aux États-Unis, *Jeopardy!* existe depuis 1962 et ressemble au jeu *Questions pour un champion*. Les questions (géographie, littérature, arts, sport et sciences) sont formulées en anglais courant et les réponses doivent l'être aussi. La machine reçoit les questions par écrit et donne ses réponses par synthèse vocale. La rapidité des réponses intervient dans certaines phases du jeu. Le programme Watson créé par la

firme IBM a été confronté à deux champions humains du jeu en février 2011. Le programme l'emporta, montrant qu'un système informatique convenablement programmé pouvait s'attaquer à des défis comportant à la fois un

traitement du langage naturel et la maîtrise de connaissances sur des sujets variés et étendus.

Aujourd'hui, Watson sert à développer des outils d'expertise en médecine, pour la formation des médecins.

A : Nombres à partir de 10 dont la somme des chiffres est un nombre premier (30, 32, 34).

B : Nombres premiers écrits à l'envers à partir de 10 (14, 34, 74).

C : Le nombre en position n est la somme de n^2 et du n -ième nombre premier (66, 83, 104).

D : Diviseurs de 580 (145, 290, 580).

E : Nombres qui, précédés de 2 et suivis de 1, donnent des nombres premiers (35, 37, 38).

véhicules motorisés, l'ordinateur doit analyser des images variées et changeantes : où est le bord de cette rue jonchée de feuilles d'arbres ? Quelle est la nature de cette zone noire à 50 mètres au centre de la chaussée, un trou dangereux ou seulement une tache d'huile inoffensive ? Etc.

Conduire une voiture avec nos méthodes nécessiterait la mise au point de techniques d'analyse d'images bien plus subtiles que celles que nous savons programmer aujourd'hui. Aussi, les systèmes de pilotage automatisé tels que ceux de la firme *Google* « conduisent » tout à fait différemment des humains. Ces *Google cars* exploitent en continu un système GPS de géolocalisation très précis et des « cartes » indiquant de manière bien plus détaillée que toutes les cartes habituelles, y compris celles de *Google maps*, la forme et le dessin des chaussées, la signalisation routière et tous les éléments importants de l'environnement. Les voitures *Google* exploitent aussi des radars embarqués, des lidars (*light detection and ranging*, systèmes optiques créant une image numérique en trois dimensions de l'espace autour de la voiture) et des capteurs sur les roues.

Ayant déjà parcouru plusieurs centaines de milliers de kilomètres sans accident, ces voitures sont un succès de l'intelligence artificielle, et ce même si elles sont incapables de réagir à des signes ou injonctions d'un policier au centre d'un carrefour, et qu'elles s'arrêtent parfois brusquement lorsque des travaux sont en cours sur leur chemin. Par prudence sans doute, les modèles destinés au public présentés en mai 2014 roulent à 40 kilomètres par heure au plus.

Avec ces machines, on est loin de la méthode de conduite d'un être humain. Grâce à sa capacité à extraire de l'information des images et son intelligence générale, le conducteur humain sait piloter sur un trajet jamais emprunté, sans carte, sans radar, sans lidar, sans capteur sur les roues et il n'est pas paralysé par un obstacle inopiné !

Les questions évoquées jusqu'ici n'exigent pas la compréhension du langage écrit ou parlé. Pourtant, contrairement aux annonces de ceux qui considéraient le langage comme une source de difficultés insurmontables pour les machines, des succès remarquables

ont été obtenus dans des tâches exigeant une bonne maîtrise des langues naturelles.

L'utilisation des robots-journalistes inquiète car elle est devenue courante dans certaines rédactions telles que celles du *Los Angeles Times*, de *Forbes* ou de *Associated Press*. Pour l'instant, ces automates-journalistes se limitent à convertir des résultats (sportifs, ou économiques par exemple) en courts articles.

Des robots journalistes

Il n'empêche que, parfois, on leur doit d'utiles traitements. Ainsi, le 17 mars 2014, un tremblement de terre de magnitude 4,7 se produisit à 6 h 25 en heure locale au large de la Californie. Trois minutes après la secousse, un petit article d'une vingtaine de lignes était automatiquement publié sur le site Internet du *Los Angeles Times* donnant des informations sur l'événement : lieu de l'épicentre, magnitude, heure, comparaison avec d'autres secousses récentes. L'article exploitait des données brutes fournies par le *US-Geological Survey Earthquake Notification Service* et résultait d'un algorithme dû à Ken Schwencke, un journaliste programmeur. D'après lui, ces méthodes ne conduiraient à la suppression d'aucun emploi, mais rendraient au contraire le travail des journalistes plus intéressant. Il est vrai que ces programmes sont pour l'instant confinés à la rédaction d'articles brefs exploitant des données factuelles faciles à traduire en petits textes, qu'un humain ne rédigerait sans doute pas mieux.

Un autre exemple inattendu de rédaction automatique d'articles concerne les encyclopédies *Wikipedia* en suédois et en filipino, l'une des deux langues officielles aux Philippines (l'autre est l'anglais). Le programme *Lsjbot* mis au point par Sverker Johansson a en effet créé plus de deux millions d'articles de l'encyclopédie collaborative et est capable d'en produire 10 000 par jour. Ces pages engendrées automatiquement concernent des animaux ou des villes et proviennent de la traduction, dans le format imposé par *Wikipedia*, d'informations disponibles dans des bases de données déjà informatisées. L'exploit a été salué, mais aussi critiqué. Pour se justifier, S. Johansson indique que ces

pages peu créatives sont utiles et fait remarquer que le choix des articles de l'encyclopédie *Wikipedia* est biaisé : il reflète essentiellement les intérêts des jeunes blancs, de sexe masculin et amateurs de technologies. Ainsi, l'encyclopédie *Wikipedia* suédoise comporte 150 articles sur les personnages du livre de Tolkien, *Le Seigneur des Anneaux*, et seulement une dizaine sur des personnes réelles liées à la guerre du Vietnam : « Est-ce vraiment le bon équilibre ? », demande-t-il.

S. Johansson projette d'engendrer une page par espèce animale recensée, ce qui ne semble pas stupide. Pour lui, ces méthodes doivent être généralisées, mais il pense que *Wikipedia* a besoin aussi de rédacteurs qui écrivent de façon plus littéraire que *Lsjbot* et soient capables d'exprimer des sentiments, « ce que ce programme ne sera jamais capable de faire ».

Beaucoup plus complexe, et méritant mieux l'utilisation de l'expression « intelligence artificielle », est le succès du programme *Watson* d'IBM au jeu télévisé *Jeopardy !* (voir l'encadré 1).

La mise au point de programmes résolvant les mots-croisés aussi bien que les meilleurs humains confirme que l'intelligence artificielle réussit à développer des systèmes aux étonnantes performances linguistiques et oblige à reconnaître qu'il faut cesser de considérer que le langage est réservé aux humains. Malgré ces succès, on est loin de la perfection : pour s'en rendre compte, il suffit de se livrer à un petit jeu avec le système de traduction automatique en ligne de *Google*. Une phrase en français, (a), est traduite en anglais, (b), puis retraduite en français, (c). Parfois cela fonctionne parfaitement, on retrouve la phrase initiale ou une phrase équivalente. Parfois, le résultat est catastrophique, comme ici :

(a) La subtilité manque aux machines qui semblent stupides.

(b) The lack subtlety machines that seem stupid.

(c) Les machines manque de subtilité qui semblent stupides.

Nous sommes très loin aujourd'hui de la mise au point de dispositifs informatiques susceptibles de passer le « test de Turing » conçu en 1950. Alan Turing voulait éviter

de discuter de la nature de l'intelligence et, plutôt que d'en rechercher une définition, proposait de considérer qu'on aura réussi à mettre au point des machines intelligentes lorsque leur conversation sera indiscernable de celle des humains.

Passer le test de Turing

Pour tester cette indiscernabilité, il suggérait de faire dialoguer par écrit avec la machine une série de juges qui ne sauraient pas s'ils mènent leurs échanges avec une machine tentant de se faire passer pour un humain ou avec un humain véritable. Lorsque les juges ne pourront plus faire mieux que répondre au hasard pour indiquer qu'ils ont eu affaire à un homme ou une machine, le test sera passé. Concrètement, faire passer

le test de Turing à un système informatique S consiste à réunir un grand nombre de juges, à les faire dialoguer aussi longtemps qu'ils le souhaitent avec des interlocuteurs choisis pour être une fois sur deux un humain, et une fois sur deux le système S; les experts indiquent, quand ils le souhaitent, s'ils pensent avoir échangé avec un humain ou une machine. Si l'ensemble des experts ne fait pas mieux que le hasard, donc se trompe dans 50 % des cas ou plus, alors le système S a passé le test de Turing.

Turing, optimiste, pronostiqua qu'on obtiendrait une réussite partielle au test en l'an 2000, les experts dialoguant 5 minutes et prenant la machine pour un humain dans 30 % des cas au moins. Turing avait, en gros, vu juste : depuis quelques années, la version partielle du test a été passée, sans qu'on

puisse prévoir quand sera passé le test complet, sur lequel Turing restait muet.

Le test partiel a par exemple été passé le 6 septembre 2011 à Guwahati, en Inde, par le programme *Cleverbot* créé par l'informaticien britannique Rollo Carpenter. Trente juges dialoguèrent pendant quatre minutes avec un interlocuteur inconnu qui était dans la moitié des cas un humain et dans l'autre moitié des cas le programme *Cleverbot*. Les juges et les membres de l'assistance (1334 votes) ont considéré le programme comme humain dans 59,3 % des cas. Notons que les humains ne furent considérés comme tels que par 63,3 % des votes.

Plus récemment, le 9 juin 2014 à la *Royal Society* de Londres, un test organisé à l'occasion du soixantième anniversaire de la mort de Turing permit à un programme

2. Le concours de compression de Marcus Hutter

Face à une série de données, l'intelligence permet de prévoir la suite mieux que ne le ferait le hasard. On montre que cette capacité de prévision est équivalente à la capacité de compresser les données reçues. À condition d'imaginer des jeux de données très variés, cette conception de l'intelligence est considérée par certains comme absolue.

C'est elle qui sert d'ailleurs de base à la « théorie générale de l'intelligence » de Marcus Hutter. Ce dernier, pour illustrer l'idée et parce qu'il est convaincu que la compression de données est nécessaire et suffisante pour caractériser et mesurer l'intelligence d'un être animal, humain ou mécanique, a créé un concours fondé sur une épreuve de compression de données. Ce concours est ouvert à tous et permet de gagner tout ou partie d'une somme de 50 000 euros que M. Hutter a lui-même engagée.

Le prix (nommé *Hutter prize*, voir <http://prize.hutter1.net/>) propose une épreuve unique de compression d'un texte numé-

rique énorme. Un fichier de 100 millions de caractères extrait de l'encyclopédie *Wikipedia* est proposé aux candidats et doit être compressé au mieux par les programmes qui sont soumis. Au départ, le fichier, grâce à une méthode de compression classique, a été réduit à 18 324 887 caractères. Cela correspond à un gain d'environ 81 %. Chaque candidat proposant un programme réalisant une amélioration de N % par rapport au gagnant précédent remporte la somme de $(N/100) \times 50\,000$ euros. Si par exemple vous concevez et programmez un compresseur qui fait gagner 5 % par rapport au dernier gagnant, vous

emportez 2500 euros. La compression dont il s'agit ici est bien sûr une compression sans perte : à partir du fichier compressé, le programme de décompression (associé au programme de compression) doit reconstituer exactement les 100 millions de caractères du fichier initial proposé par M. Hutter. Des limites concernant la taille du programme de compression et son temps de calcul sont imposées (voir les détails sur le site Internet décrivant le prix).

Depuis le lancement du concours, plusieurs programmes ont réussi à améliorer le taux de compression. On en est aujourd'hui à un fichier compressé de 15 949 688 caractères. Claude Shannon, le créateur de la théorie de l'information, a évalué que le langage naturel porte en gros un bit d'information par caractère, ce qui correspond dans notre cas à un fichier



UNE COMPRESSION RÉALISÉE
par le sculpteur César.

compressé de 12 500 000 caractères. Il y a donc encore de la marge, d'autant que l'exploitation fine des régularités de notre monde reflétée dans l'encyclopédie *Wikipedia* permettrait peut-être une compression encore meilleure que celle évaluée par Shannon.

nommé *Eugene Goostman* de duper 10 des 30 juges réunis (33 % d'erreur). Victimes de la présentation biaisée que donnèrent les organisateurs de ce succès, somme toute assez modeste, de nombreux articles de presse dans le monde entier parlèrent d'un événement historique, comme si le test complet d'indiscernabilité homme-machine avait été réussi. Ce n'était pas du tout le cas, puisque le test avait d'ailleurs encore été affaibli : l'humain que le système

Ainsi, l'intelligence artificielle réussit aujourd'hui assez brillamment à égaler l'humain pour des tâches spécialisées (y compris exigeant une certaine maîtrise du langage), ce qui parfois étonne et doit être reconnu comme des succès d'une discipline qui avance régulièrement. Cependant, elle le fait sans vraiment améliorer la compréhension qu'on a de l'intelligence humaine, qu'elle ne copie quasiment jamais ; cela a en particulier comme conséquence qu'elle

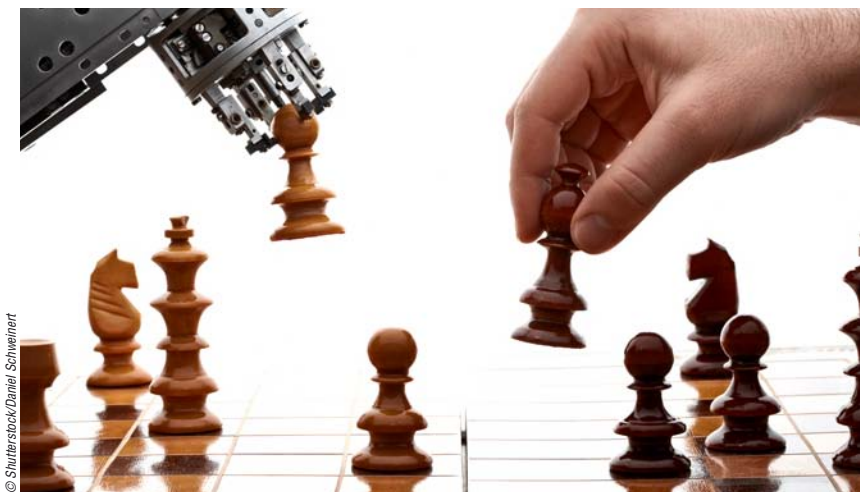
on se trouve. L'identification des régularités, on le sait par ailleurs, permet de compresser des données, et de prédire avec succès les données suivantes qu'on recevra.

Intelligence, compression et prédiction sont liées. Si, par exemple, on vous communique les données 4, 6, 9, 10, 14, 15, 21, 22, 25, 26, 33, 34, 35, 38, 39, 46, 49, 51, 55, 57, et que vous en reconnaissez la structure, vous pourrez les compresser en « les 20 premiers produits de deux nombres premiers » et deviner ce qui va venir : 58, 62, 65, 69, 74, 77, 82, 85, 86, 87, etc.

Ce lien entre intelligence, compression et prédiction a été exprimé de manière formelle par l'informaticien américain Ray Solomonoff vers 1965. Du principe du rasoir d'Ockham *Pluralitas non est ponenda sine necessitate* (les multiples ne doivent pas être utilisés sans nécessité), il proposait une version moderne exprimée ainsi : « Entre toutes les explications compatibles avec les observations, la plus concise, ou encore la mieux compressée, est la plus probable ».

Si l'on dispose d'une mesure de concision permettant de comparer les théories, cette dernière version devient un critère mathématique. La théorie algorithmique de l'information de Kolmogorov, qui propose de mesurer la complexité (et donc la simplicité) de tout objet numérique (une théorie le devient une fois entièrement décrite) par la taille du plus court programme qui l'engendre, donne cette mesure de concision et rend donc possible la mathématisation complète du principe de parcimonie d'Ockham.

L'aboutissement de cette voie de réflexion et de mathématisation a été la théorie générale de l'intelligence développée par l'informaticien allemand Marcus Hutter, dont le livre *Universal Artificial Intelligence* publié en 2005 est devenu une référence. En utilisant la notion mathématique de concision, une notion mathématisée d'environnement (ce qui produit les données desquelles un système intelligent doit tenter de tirer quelque chose) et le principe mathématisé d'Ockham de Solomonoff, M. Hutter définit une mesure mathématique universelle d'intelligence. Elle est obtenue comme la réussite moyenne



© Shutterstock/Daniel Schweinart

informatique simulait était censé n'avoir que 13 ans et ne pas écrire convenablement l'anglais (car d'origine ukrainienne !).

Non, le test de Turing n'a pas été passé, et il n'est sans doute pas près de l'être. Il n'est d'ailleurs pas certain que les tests partiels fassent avancer vers la réussite au test complet. En effet, les méthodes utilisées pour tromper brièvement les juges sont fondées sur le stockage d'une multitude de réponses préenregistrées (correspondant à des questions qu'on sait que les juges posent) associées à quelques systèmes d'analyse grammaticale pour formuler des phrases reprenant les termes des questions des juges et donnant l'illusion d'une certaine compréhension. Quand ces systèmes ne savent plus quoi faire, ils ne répondent pas et posent une question. À un journaliste qui lui demandait comment il se sentait après sa victoire, le programme *Eugene Goostman* de juin 2014 répondit : « Quelle question stupide vous posez, pouvez-vous me dire qui vous êtes ? ».

n'est pas sur le point de proposer des systèmes disposant vraiment d'une intelligence générale, chose nécessaire pour passer le difficile test de Turing qui reste hors de portée aujourd'hui (si on ne le confond pas avec ses versions partielles !).

À la recherche de l'intelligence générale

Ces tentatives éclairent les recherches tentant de saisir ce qu'est une intelligence générale. Ces travaux sont parfois abstraits, voire mathématiques, mais n'est-ce pas le meilleur moyen d'accéder à une notion absolue, indépendante de l'homme ?

Quand on tente de formuler une définition générale de l'intelligence, vient assez naturellement à l'esprit l'idée qu'être intelligent, c'est repérer des régularités, des structures dans les données dont on dispose, quelle qu'en soit leur nature, ce qui permet de s'y adapter et de tirer le maximum d'avantages de la situation évolutive dans laquelle

d'une stratégie dans l'ensemble des environnements envisageables.

Cette dernière notion (dont nous ne formulons pas ici la version définitive avec tous ses détails techniques) est trop abstraite pour être utilisable directement dans des applications. Cependant, elle permet le développement mathématique d'une théorie de l'intelligence et fournit des pistes pour comparer sur une même base abstraite, non anthropocentrée et objective, toutes sortes d'intelligences. Contrairement à l'idée de H. Gardner, cette voie de recherche soutient que l'intelligence est unique, qu'on peut dépasser le côté arbitraire des tests d'intelligence habituels pour classer sur une même échelle tous les êtres vivants ou mécaniques susceptibles d'avoir un peu d'intelligence.

Malgré la difficulté à mettre en œuvre pratiquement la théorie (par exemple pour concevoir de meilleurs tests d'intelligence, ou des tests s'appliquant aux humains comme aux dispositifs informatiques), on a sans doute franchi un pas important avec cette théorisation complète. Conscients de son importance pour la réussite du projet de

l'intelligence artificielle, les chercheurs ont maintenant créé un domaine de recherche particulier sur ce thème de « l'intelligence artificielle générale » qui dispose de sa propre revue spécialisée, le *Journal of General Artificial Intelligence* (à accès libre).

Dans le but sans doute d'éviter à la discipline de se satisfaire du développement de sa partie mathématique, un concours informatique a été créé par M. Hutter. Il utilise l'idée que plus on peut compresser, plus on est intelligent. Pour gagner et empocher une partie des 50 000 euros mis en jeu, il faut compresser au mieux le contenu de l'encyclopédie *Wikipedia* considéré comme une sorte d'image miniature de la richesse de notre univers (voir l'encadré 2).

La nouvelle discipline aidera peut-être les chercheurs à réaliser cette intelligence générale qui manque tant à nos machines actuelles et les oblige à n'aborder que des tâches spécialisées, le plus souvent en contournant les difficultés qu'il y aurait à employer les mêmes méthodes que les humains, qui eux disposent – au moins de façon rudimentaire ! – de cette intelligence générale. ■

■ L'AUTEUR



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

au Laboratoire d'informatique
fondamentale de Lille (LIFL).

■ BIBLIOGRAPHIE

B. Goertzel, *Artificial general intelligence : Concept, state of the art, and future prospects*, *Journal of Artificial General Intelligence*, prépublié en ligne, juin 2014 (<http://tinyurl.com/ln86g5b>).

M. Hutter, *50 000 euros prize for compressing human knowledge*, <http://prize.hutter1.net/>, consulté en 2014.

G. Tesauro et al., *Analysis of Watson's strategies for playing Jeopardy!*, 2014 (<http://arxiv.org/pdf/1402.0571.pdf>).

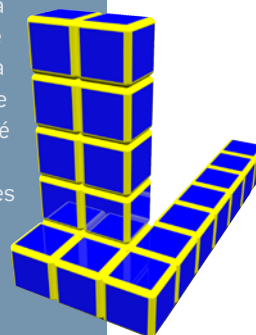
D. Dowe et J. Hernández-Orallo, *How universal can an intelligence test be*, *Adaptive Behavior*, vol. 22(1), pp. 51-69, 2014.

Références supplémentaires
sur le site www.pourlascience.fr

Retour sur les golyèdres

Dans le numéro de septembre 2014, je présentais les « golyèdres », des polyèdres composés de cubes de côté unité accolés, et dont les différentes faces ont des aires valant exactement 1, 2, 3, ..., n . On montrait que la plus petite valeur de n pour laquelle un golyèdre existe est 11 ou 12. Un golyèdre à 12 faces était dessiné, mais cela n'excluait pas l'existence d'un golyèdre à 11 faces, existence qui restait donc en question. Or un tel golyèdre à 11 faces vient d'être trouvé (ci-contre) par Alexei Nigin. Il est assez étrange que ce golyèdre, plus simple que les quatre autres déjà connus, ait été trouvé si tardivement !

Une autre question posée dans l'article a été résolue. Si, pour définir les golyèdres, on remplace les cubes par des tétraèdres réguliers dont chaque face a une aire unité, existe-t-il des golyèdres ? Gilles Esposito-Farèse m'a fait remarquer que le tétraèdre régulier ne pave pas l'espace et donc que, en collant par leur face des tétraèdres réguliers dont les faces ont pour aire l'unité, on ne construit jamais de face ayant plusieurs unités d'aire. Il n'existe ainsi pas de golyèdres faits de tétraèdres réguliers. J'ai cependant une consolation : Aristote pensait aussi que le tétraèdre régulier, comme le cube, pavait l'espace et l'écrivit dans son *Traité du ciel*. Son erreur, inaperçue pendant près de 1 800 ans, fut révélée par Johannes Müller (1436-1476).



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

SCIENCE & FICTION

Les cyborgs sont parmi nous !

À la frontière entre le robot et l'homme, le cyborg est un thème récurrent en science-fiction. Les progrès de la science posent la question de sa définition et de celle de l'humanité. Ne serions-nous pas déjà des cyborgs ?

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ

Un cinquième opus de la saga *Terminator* est en cours de tournage : *Terminator Genisys*. Lors d'une conférence de presse, Arnold Schwarzenegger précise la nature de son personnage : « La manière dont le personnage est écrit, c'est une machine en dessous. C'est un squelette en métal mais, au-dessus, c'est de la peau humaine. Et la peau du Terminator vieillit, exactement comme la peau des êtres humains. Peut-être pas aussi vite, mais elle vieillit véritablement. » Terminator, que l'on pensait artificiel à 100 %, ne serait donc pas un robot mais un cyborg. Ces êtres dépassent aujourd'hui la fiction et posent la question de la frontière de plus en plus ténue entre l'humain et la machine.

Il faut distinguer le cyborg du robot. Le second est composé exclusivement d'alliages métalliques, de composants électroniques et autres matériaux synthétiques (on parle de dispositif « mécatronique »). Sa définition ne pose pas de problème et le robot fait maintenant partie de notre quotidien. Comme son nom l'indique (*robota* signifie « corvée » ou « travail » en tchèque), le robot est créé par l'homme pour le remplacer dans des tâches pénibles et répétitives, du travail à la chaîne à l'exploration sous-marine ou martienne, en passant par la guerre.

Le terme de cyborg (contraction de l'anglais *cybernetic organism*) fait référence, lui, à un mélange entre l'organique et le mécanique, il allie des matériaux artificiels et des tissus vivants. Plus récent, ce concept

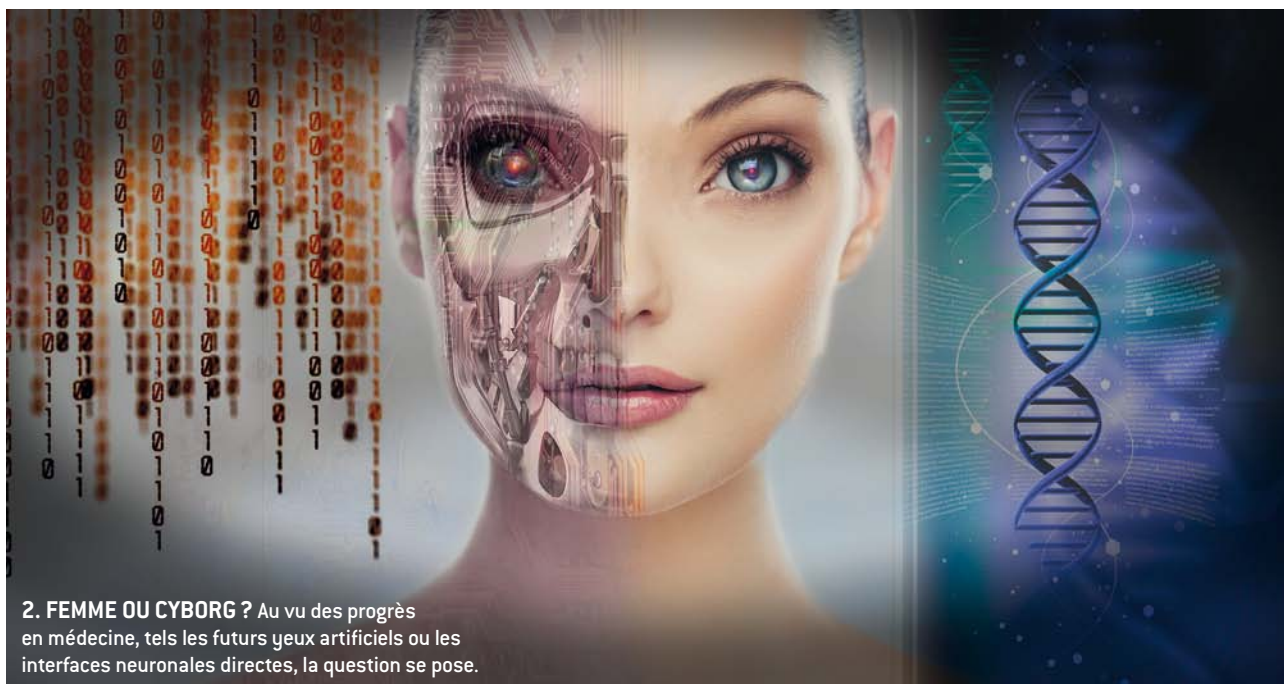


1. TERMINATOR EST UN CYBORG, à mi-chemin entre l'homme et le robot. Son squelette métallique est recouvert de peau organique.

a été développé en 1960 par les Américains Manfred Clynes et Nathan Kline dans un article exposant les avantages d'un humain « augmenté » pour explorer l'espace. Mais déjà Edgar Allan Poe, dans sa nouvelle *The Man That Was Used Up* (L'homme qui était refait, 1839), mettait en scène un homme étrange muni de nombreuses prothèses. Citons aussi Jean de la Hire qui, dans son roman *L'homme qui peut vivre dans l'eau* (1908), introduisit le Nyctalope au cœur artificiel, premier super-héros et cyborg de la littérature !

Bien avant *Terminator*, ces écrivains visionnaires s'étaient donc posé la question : à partir de combien d'implants un homme n'en est-il plus un et quels critères marquent la séparation entre l'homme et le cyborg ? La question se pose aujourd'hui en médecine lorsque l'on pense par exemple aux *pace-makers* – permettant aux victimes d'attaques cardiaques de rester en vie – ou aux prothèses médicales de plus en plus perfectionnées comme le cœur artificiel récemment implanté chez un patient français ou l'œil artificiel, encore en développement.

Ces éléments de technologie « embarquée », qui repoussent les frontières du handicap ou de la mort, font-ils de nous des cyborgs avant l'heure ? Au-delà du fait que notre système immunitaire rejette (ou non) le greffon – qu'il soit synthétique ou biologique –, la question se pose bien sûr en termes philosophiques et éthiques : jusqu'où peut-on « réparer » l'homme ?



2. FEMME OU CYBORG ? Au vu des progrès en médecine, tels les futurs yeux artificiels ou les interfaces neuronales directes, la question se pose.

Dans la série *L'homme qui valait trois milliards*, Steve Austin, astronaute devenu pilote d'essai, est mutilé après un crash. Son œil gauche, son bras droit et ses jambes sont alors remplacés par des prothèses coûteuses qui font de lui un homme « augmenté ».

Il a plus de chance qu'Alex Murphy, ancien policier déclaré cliniquement mort à la suite d'un attentat, mais soigneusement réparé et transformé en Robocop. Ce dernier semble plus près de la machine que de l'homme. Il ne sert alors plus que les intérêts d'une société hypersécuritaire et corrompue : sa mémoire a été effacée et son cerveau est connecté en permanence à la base de données des fugitifs recherchés par la police. Mais, étrangement, ce cyborg fait encore preuve de sentiments humains et se révolte.

Cyborg malgré lui

Cette fiction rappelle celle, véridique, de Johnny Ray. Cet homme souffrait du syndrome d'enfermement (une paralysie totale) après une attaque cérébrale. Le neurologue Philip Kennedy l'a opéré en 1997 et a implanté dans son cerveau une « interface neuronale directe », c'est-à-dire une sorte d'électrode qui transmet aux muscles le signal électrique émis par le cerveau. Le patient a retrouvé une partie de sa motricité jusqu'à son décès en 2002. Les travaux sur les interfaces neuronales ont bien avancé depuis, si bien que l'on parle maintenant de « neuroprothèses » capables de restaurer l'ouïe, la vue et certains

mouvements : il s'agit de rendre à des patients certaines de leurs capacités perdues à la suite d'une maladie ou d'un accident. Ces prothèses, qui raccourcissent la chaîne cerveau-nerfs-muscles et réduisent parfois de plusieurs dixièmes de seconde le temps de réponse, intéressent aussi les militaires : l'armée américaine effectue déjà des recherches dans le but d'améliorer les performances de ses troupes.

L'accélération des capacités techniques, la convergence entre nanotechnologie, biotechnologie, sciences cognitives et techniques de l'information rendent plus crédibles l'hypothèse d'une humanité profondément modifiée par la technique. Cette tendance est encouragée par le mouvement transhumaniste qui promeut la fusion entre l'humain et la machine, d'abord pour réparer, puis pour transformer et augmenter. Mais comment s'assurer qu'un tel monde ne creuse pas des inégalités entre ceux qui ont accès aux techniques et les autres ?

Aujourd'hui, deux aspects techniques semblent encore séparer les cyborgs des hommes. Les premiers sont incapables de générer la totalité de l'énergie nécessaire à leur fonctionnement : après chaque mission, Robocop doit revenir dans son laboratoire pour se recharger. Le T-800, modèle initial du Terminator, est censé, grâce à une « batterie nucléaire à iridium », être autonome pendant au moins trois ans. Mais vu la demi-vie courte de l'iridium 192 (74 jours), il aurait été plus adapté d'utiliser une bat-

terie au plutonium 238, déjà employée dans les générateurs thermoélectriques des sondes spatiales et dont la demi-vie est proche de 88 ans. Cependant, ce dispositif n'est pas assez compact pour loger dans le torse du Terminator.

Autre différence essentielle entre le vivant et les cyborgs : les derniers ne sont pas capables de se reproduire en totalité d'une manière indépendante – même si aujourd'hui une imprimante 3D, donc un robot, peut créer des pièces détachées de robot.

Si l'on peut se demander à partir de quel seuil de technologie – et de tolérance – l'homme allié à la machine perd son identité humaine, la question se pose aussi dans l'autre sens : si l'intelligence artificielle devient vraiment performante, à partir de quand une hypothétique machine intelligente deviendrait-elle humaine ? Dans l'excellent manga *Ghost in the Shell* (Masamune Shirow, 1989), certains androïdes – robots de forme humaine – prennent conscience d'eux-mêmes et, désespérés, se suicident. Et Philip K. Dick de nous rappeler, dans son roman devenu référence *Les androïdes rêvent-ils de moutons électriques ?* (1966, adapté à l'écran par Ridley Scott en 1982 sous le titre *Blade Runner*), que des robots doués de compassion valent peut-être mieux que de cupides et égoïstes humains... ■

J.-S. STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. R. LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay.

ART & SCIENCE

Mondrian et les arbres

Une méthode de visualisation de données rend hommage au peintre néerlandais, célèbre pour ses compositions abstraites. Elle est fondée sur l'idée d'arbre, un motif essentiel dans l'évolution de l'œuvre de Mondrian.

Loïc MANGIN

Depuis le 16 octobre 2014 et jusqu'au 15 avril 2015, l'Académie américaine des sciences, à Washington, propose une exposition étonnante. L'une des œuvres exposées est représentée sur la page ci-contre. Une composition du peintre néerlandais Piet Mondrian (1872-1944) ? Pas tout à fait. Même si la ressemblance avec, par exemple, l'œuvre *Composition C (n° III) avec rouge, jaune et bleu* est évidente, il s'agit de bien autre chose. En fait, l'exposition, intitulée *Every AlgoRiThm has ART in it: Treemap Art Project*, est dédiée aux réalisations de Ben Shneiderman, qui est... professeur émérite d'informatique à l'Université du Maryland, à *College Park* ! Quels sont les liens entre le pionnier de l'abstraction et l'informatique ? Ils sont plus profonds qu'il n'y paraît.

D'abord, voyons en quoi consiste l'œuvre qui se prend pour un Mondrian. C'est une *treemap*, c'est-à-dire une façon de visualiser des données. L'idée est de représenter des informations selon un mode hiérarchique dans un espace limité, en l'occurrence un rectangle. Le concept a été inventé par B. Shneiderman lui-même, au début des années 1990.

Confronté à un serveur informatique souvent saturé, il cherche à repérer les fichiers et les dossiers volumineux. Il développe alors une méthode pour représenter l'espace occupé par chacun des éléments du disque de stockage. Le point de départ

est l'arborescence du contenu (le *tree de treemap* signifie *arbre*) : chaque branche est transformée en un rectangle qui est ensuite pavé de rectangles plus petits correspondant aux sous-branches et ainsi de suite jusqu'aux fichiers, eux-mêmes illustrés par des rectangles. À chaque fois, la superficie d'un rectangle est proportionnelle au volume de son contenu (*voir la figure ci-dessous*). Un algorithme se charge de faire en sorte que l'ensemble occupe également un rectangle.



D'autres caractéristiques, telles que la couleur, peuvent aider à se repérer dans l'ensemble des données. En fin de compte, l'arborescence et les éléments qui y sont rattachés sont projetés sur un plan, ou une carte (*map* en anglais), un peu comme si on regardait du dessus un arbre.

Cette technique a fait florès et on l'utilise aujourd'hui pour visualiser et analyser le budget d'un État, les résultats détaillés d'une élection, la nature des exportations d'un pays, la population urbaine mondiale,

les émissions mondiales de dioxyde de carbone... Qu'en est-il de la *treemap* Mondrian ?

B. Shneiderman s'est intéressé au palmarès dressé par une webradio américaine à l'occasion de son dixième anniversaire. Les 20 premiers artistes sont représentés par un rectangle dont la surface rend compte de leur popularité (le nombre de fois où ils ont été écoutés). La couleur correspond au genre : le rock en blanc, la pop en jaune, les musiques alternatives en bleu et le hip-hop en rouge.

Le choix des couleurs de la *treemap* est ici un hommage à Mondrian, et ce n'est pas fortuit. En effet, des historiens de l'art mettent en avant la place centrale du motif de l'arbre qui aurait conduit l'artiste vers l'abstraction.

Schématiquement, jusqu'à la fin des années 1900, les arbres sont fréquents dans les peintures de Mondrian, mais ils sont surtout des éléments dans des paysages où ils sont néanmoins essentiels. C'est le cas de *Arbres le long du Gein* (1907) ou de *Peupliers rouges au couchant* (1908). Ensuite, l'arbre devient le sujet unique, notamment dans *Soir : l'arbre rouge* (1910) et *L'Arbre gris* (1911). Enfin, la transition vers l'abstraction commence avec *Pommier en fleurs* (1912) et *Composition VII* (1913). L'arbre s'estompe et est progressivement remplacé par des lignes verticales et horizontales, vestiges des branches. Mondrian est le père spirituel des *treemaps* ! ■

Le site de l'exposition : <http://bit.ly/1q7QAxg>
Le catalogue de l'exposition : <http://bit.ly/1rG27TX>