

cnrs

le journal

Hors-série
Mai 2012



L'héritage d'**ALAN TURING**

- L'inventeur de l'ordinateur
- Le pionnier de l'intelligence artificielle

cnrs

dépasser les frontières

En **2012**,
le CNRS
rend hommage

à **ALAN**
TURING
(1912-1954)

PRÉCURSEUR DE L'INFORMATIQUE MODERNE

www.cnrs.fr/turing2012/

Témoignages, films, agenda des événements...



dépasser les frontières



Éditorial

PAR PHILIPPE BAPTISTE, DIRECTEUR
DE L'INSTITUT DES SCIENCES DE L'INFORMATION
ET DE LEURS INTERACTIONS (INS2I) DU CNRS

Que peut-il y avoir de commun entre un théorème abstrait de mathématiques et l'univers numérique qui bouleverse notre quotidien ? Rien, *a priori*. Pourtant, quand le mathématicien Alan Turing résout en 1936 le problème de la décision, question fondamentale de la logique posée quelques années plus tôt par Hilbert et Ackermann, il pose la première pierre de notre monde numérique. Dix ans plus tard, le même Alan Turing participe d'ailleurs à la conception et à la mise en œuvre des premiers ordinateurs.

Comment le mathématicien a-t-il pu contribuer de manière décisive à des avancées fondamentales et technologiques si diverses ? Grâce à son incroyable machine de Turing, modèle abstrait d'ordinateur qui permet de définir précisément la notion de calcul et d'algorithme. Ce saut conceptuel majeur, associé à l'apparition des premières machines programmables, annonce l'ère de l'ordinateur et du numérique.

Les travaux de Turing restent toujours d'actualité : théorie de la calculabilité, théorie de la complexité, théorie de la preuve et complexité de Kolmogorov sont autant de domaines de recherche qui trouvent leur source dans les formalisations du précurseur de l'informatique. Aussi extraordinaire que cela puisse paraître, les contributions d'Alan Turing ne s'arrêtent pas là. Il a participé, pendant la Seconde Guerre mondiale, au décryptage des codes secrets allemands, conçus grâce à la fameuse machine Enigma. Il a posé une question centrale de l'intelligence artificielle : une machine peut-elle penser ? Enfin, il a cherché à comprendre des processus morphogénétiques et a expliqué, par exemple, comment apparaissent les rayures des zèbres.

Cryptologie, intelligence artificielle, mathématiques, informatique, biologie : Alan Turing est le symbole éclatant de l'art de faire dialoguer les disciplines. Ses travaux sont au cœur des sciences de l'information et de la grande révolution numérique que nous connaissons aujourd'hui.

4 | 8 Un génie au destin brisé

À l'occasion du centenaire de la naissance d'Alan Turing, *CNRS Le journal* revient sur le parcours du célèbre mathématicien britannique, dont l'héritage demeure incroyablement vivace aujourd'hui.



9 | 12 Les prémices de l'ordinateur

En 1936, Alan Turing démontre qu'on ne peut pas tout calculer de manière automatique, en imaginant un concept de machine qui inspire encore le fonctionnement de nos ordinateurs.

13 | 17 Sur la piste de l'intelligence artificielle

En mettant au point son concept de machine universelle, puis son fameux test visant à déterminer si une machine peut penser, Alan Turing a ouvert la voie aux travaux sur l'intelligence artificielle.



18 | 19 Culture

Retrouvez tous les événements du CNRS – livres, films, expositions, sites Internet, conférences... – consacrés à Alan Turing.

cnrs
le journal

Rédaction : 1, place Aristide-Briand – 92195 Meudon Cedex
Téléphone : 01 45 07 53 75 Télécopie : 01 45 07 56 68 Mél. : journal-du-cnrs@cnrs-dir.fr
Le journal en ligne : www2.cnrs.fr/journal/
CNRS (siège) : 3, rue Michel-Ange – 75794 Paris Cedex 16

Directeur de la publication : Alain Fuchs Directrice de la rédaction : Brigitte Perucca
Directeur adjoint de la rédaction : Fabrice Impériali

Rédacteur en chef adjoint : Matthieu Ravaut Chefs de rubrique : Fabrice Demarthon, Frédérique Laubenheimer, Charline Zeitoun
Assistante de la rédaction et fabrication : Laurence Winter Ont participé à ce numéro : Denis Delbecq, Laurianne Geffroy

Secrétaire de rédaction : Isabelle Grandrieux Conception graphique : Céline Hein Iconographe : Stéphanie Tritz

Couverture : Library and Archive Center, King's College Cambridge, AMT/K/7/38

Photogravure : Scoop Communication Impression : Groupe Morault, Imprimerie de Compiègne – 2, avenue Berthelot – Zac de Mercières – BP 60524 – 60205 Compiègne Cedex ISSN 0994-7647 AIP 0001309 Dépôt légal : à parution

Photos CNRS disponibles à : phototheque@cnrs-bellevue.fr ; <http://phototheque.cnrs.fr/>

La reproduction intégrale ou partielle des textes et des illustrations doit faire obligatoirement l'objet d'une demande auprès de la rédaction.



Histoire À l'occasion du centenaire de la naissance d'Alan Turing, *CNRS Le journal* revient sur le parcours du célèbre mathématicien britannique, dont l'héritage demeure incroyablement vivace aujourd'hui, dans le monde scientifique mais aussi au-delà.

Un génie au destin brisé

PAR CHARLINE ZEITOUN

Le 7 juin 1954, Alan Mathison Turing, mathématicien de génie fraîchement élu membre de la Royal Society de Londres, inventeur de l'ordinateur, précurseur de l'intelligence artificielle, est retrouvé mort, allongé sur son lit, à l'âge de 41 ans. Près de lui, une pomme empoisonnée au cyanure est à moitié entamée. Selon les sources officielles, il s'agit d'un suicide. Depuis deux ans, l'homme était humilié par la justice britannique qui ne lui avait épargné la prison qu'à condition qu'il subisse une castration chimique par traitement hormonal. Son tort : être homosexuel dans une Angleterre encore ultraconservatrice où la loi condamne de telles mœurs. Durant la Seconde Guerre mondiale, ce scientifique hors pair avait contribué à briser le code secret de la marine allemande et à éviter ainsi l'invasion de l'Angleterre.

UNE ENFANCE LOIN DE SA FAMILLE

Alan Turing est né à Londres en 1912. Le climat de Madras, en Inde, où son père doit regagner son poste d'administrateur colonial, est jugé peu favorable à la santé des enfants. Encore nourrisson, Alan est donc placé avec son frère aîné près d'Hastings, au sud de la Grande-Bretagne, dans la famille d'un colonel où l'on pense que l'éducation des garçons doit en faire des hommes, des durs, des vrais. Les fils Turing ne verront leurs parents que de manière occasionnelle durant leur enfance.

À 10 ans, le jeune Alan dévore les *Merveilles de la nature que tout enfant devrait connaître*. « L'ouvrage raconte comment l'embryon se développe à partir d'une cellule fécondée en suivant les lois de la physique et de la chimie », commente



01 Portrait d'Alan Turing réalisé par le bras-robot du projet Aikon, mené actuellement à l'université de Londres. Le père spirituel de l'informatique a en quelque sorte été dessiné par sa propre création.

ALAN TURING EN 6 DATES

23 JUIN 1912	Naissance à Londres
1939-1942	Décodage du système de cryptage allemand Enigma
1945	Projet de la machine universelle ou ordinateur
1950	Publication de l'article « L'ordinateur et l'intelligence »
1952	Publication de l'article « La base chimique de la morphogénèse »
7 JUIN 1954	Décès à l'âge de 41 ans



Jean Lassègue, philosophe au Centre de recherche en épistémologie appliquée¹, à Paris, et auteur d'une biographie de Turing (lire p. 19). C'est une révélation : le corps y est présenté comme une gigantesque machine. Alan se met en tête qu'il est possible de déterminer les lois qui régissent sa construction à l'aide des sciences de la nature. Dès lors, il ne cesse de se passionner pour le décodage des secrets de la vie et la nature de l'esprit.

LES ANNÉES D'INTERNAT

À l'âge de 14 ans, l'adolescent rejoint l'internat de la très stricte Sherborne Grammar School, où l'on privilégie « les valeurs propres à l'éducation de gentleman, le grec et la littérature par rapport aux matières scientifiques », précise Jean Lassègue. *Les résultats du jeune homme sont médiocres. Il est jugé brouillon et malhabile et, comble du scandale dans un milieu imbu de culture classique et de morale victorienne, il fait de l'algèbre pendant les cours d'instruction religieuse*. Peu sociable, Turing ne trouve de réconfort que dans les cours de sciences. Impressionné par cet élève qui, à ses heures perdues, développe des calculs très complexes, son professeur de mathématique plaide sa cause auprès du directeur de l'école et le sauve du redoublement.

L'année suivante, en 1927, Alan fait à l'école une rencontre déterminante. Il s'appelle Christopher Morcom, est âgé d'un an de plus que lui et se passionne pour les sciences et les mathématiques. C'est



02 Turing courant le 3 miles (4,8 km) du Laboratoire national de physique en 1946.
03 Alan, croqué par un camarade vers 1920, semblant davantage fasciné par la pousse des marguerites que par son match de hockey...

le coup de foudre. Avec cette relation, sans doute platonique, le jeune Turing prend conscience de son homosexualité, alors sévèrement réprimée dans l'Angleterre de ce début du xx^e siècle. Mais Christopher meurt d'une tuberculose bovine à 19 ans.

« La vocation d'Alan Turing est liée à ce drame : il a sans doute pensé qu'il se devait d'incarner le destin scientifique qui était promis à son ami décédé », analyse Jean

Lassègue. Selon le philosophe, cette étonnante idée le hantera toute sa vie. Et on peut y entrevoir, en filigrane, la source de ses futurs travaux, dans lesquels il invente un concept devenu aujourd'hui d'une absolue évidence : il est possible de dissocier une machine et les programmes qui la font fonctionner. Tout comme le jeune homme devait s'imaginer que son corps, sa machine, pourrait porter, comme un programme, l'esprit de Christopher...

LE TEMPS DES PREMIERS ARTICLES

Entre 1931 et 1935, Turing poursuit des études de mathématiques pures au King's College, à Cambridge. Il publie ses premiers articles, obtient une bourse de recherche et résout l'épineux problème dit de la décision, formulé par David Hilbert à la fin des années 1920 (lire p. 9). Grâce à son article sur ce problème, qu'il finalise en 1936, Turing précise de manière complètement originale la notion de calcul. « Il parvient à établir une limite entre ce qui est calculable et ce qui ne l'est pas », explique Jean Lassègue. Ce qui est calculable peut être prédit : le résultat sera toujours le même. Le non-calculable, c'est ce qui résiste à ce déterminisme, c'est ce qui peut évoluer de manière imprévisible, comme cela arrive parfois en physique.

« Surtout, Turing montre que ce qui est calculable peut être décomposé en un nombre fini d'étapes pouvant chacune être réalisée par une machine », poursuit Jean Lassègue. Cette fameuse machine de Turing, qui n'existe alors que sur le papier, n'est autre que le *computer* (littéralement, « machine à calculer ») ou ordinateur. Alan n'a que 24 ans. Il rejoint alors l'université de Princeton, aux États-Unis, où il prépare un doctorat de logique mathématique



Pierre Lescanne, du Laboratoire de l'informatique du parallélisme¹, à Lyon

« Je me prends à rêver que, comme le signale Andrew Hodges dans sa biographie, Turing aurait pu postuler à l'université de Nancy. Je pense que la France, à l'époque sans doute moins puritaine que l'Angleterre, aurait pu offrir un cadre adéquat à ce scientifique génial, prolifique et polyvalent. Que se serait-il passé alors ? »

1. Unité CNRS/ENS Lyon/Inria/UCBL.

04



© ULLSTEIN BILDANG-IMAGES

sous la direction d'Alonzo Church. John von Neumann, sommité des mathématiques et de la physique, lui propose de devenir son assistant, mais le chercheur préfère rentrer en Angleterre. Nous sommes en 1938. Les menaces d'un conflit avec l'Allemagne se précisent.

AU SERVICE DES RENSEIGNEMENTS

« À son retour, Alan Turing est recruté par le service britannique du chiffre, le *Government Code and Cypher School*, qui vient de s'installer à Bletchley Park, près d'Oxford », signale Jean Lassègue. Le but de cette unité : décrypter les messages radios que les Nazis échangent avec leur redoutable flotte de sous-marins (*lire l'interview ci-contre*). Grâce à l'ingéniosité de Turing et de ses collègues, la plupart des messages allemands interceptés sont décryptés dès 1942. Selon l'historien Philippe Breton, du laboratoire Culture et société en Europe², à Strasbourg, des dizaines de milliers de vies humaines ont été épargnées grâce cette prouesse. Pour Shaun Wylie, ami d'Alan rencontré à Princeton et retrouvé à Bletchley Park, « mieux valut que la sécurité ne fut rien de son homosexualité : il aurait sans doute été viré et nous aurions perdu la guerre... »³.

Après la guerre, Turing peut enfin se consacrer à la matérialisation de la machine idéale conçue dans son article de 1936. Il entre au Laboratoire national de physique, près de Londres, où il rédige

05



04 05 La machine Enigma des Nazis permute les lettres tapées sur le clavier grâce à un système de rotors. Le modèle très sophistiqué, à quatre rotors, utilisé par la marine allemande, fut craqué dès 1942 par les Anglais avec l'aide de Turing.

© AKG-IMAGES

06 L'ordinateur ACE, dont Turing achève les plans en 1946, ne marchera qu'en 1950 du fait de lenteurs administratives. Ici, la version améliorée de 1958.

en trois mois le projet de construction d'un prototype d'*Automatic Computing Engine (ACE)*. Il ne s'agit pas d'un simple calculateur, comme pour les projets américains concurrents, mais d'une machine susceptible de traiter n'importe quel type de données. Les plans vite achevés, Turing laisse programmeurs et ingénieurs construire l'ACE, qui n'entrera en service qu'en 1950.

06



© NATIONAL PHYSICAL LABORATORY/GROWIN COPYRIGHT/SPR. COSMOS

Entre-temps, il a rejoint, en octobre 1948, l'équipe de Max Newman à l'université de Manchester. Et c'est en fait là-bas que, en juin de la même année, le premier programme au monde fonctionne sur un ordinateur conçu lui aussi en grande partie d'après les idées de Turing. Paradoxalement, en cette période de concrétisation de ses travaux, le scientifique commence à se désintéresser de cette informatique naissante. « *Parce que son ambition profonde allait bien au-delà, révèle Jean Lassègue. Il voulait construire un équivalent du cerveau capable de penser.* »

LA MACHINE À PENSER

Ainsi, Turing se concentre désormais sur la possibilité conceptuelle de prêter une intelligence à des machines. En octobre 1950, il publie son article intitulé « L'ordinateur et l'intelligence » dans la revue philosophique *Mind*. Souvent considéré comme posant la base de ce qui deviendra l'intelligence artificielle, le texte s'ouvre sur le jeu de l'imitation, dans lequel le chercheur imagine le moyen pour une machine de se faire passer pour un être humain (*lire p. 13*).

LE DÉCRYPTAGE DES CODES SECRETS NAZIS

François Morain, du Laboratoire d'informatique de l'École polytechnique¹, détaille le rôle déterminant joué par Turing pendant la Seconde Guerre mondiale.

En septembre 1939, Alan Turing rejoint le manoir de Bletchley Park, quartier général des services de renseignement britannique, pour briser le système de cryptage des sous-marins allemands, réputé inviolable. Il y parvient avec ses collègues dès 1942, contribuant à éviter l'invasion de l'Angleterre. Comment ont-ils fait ?

François Morain : Bletchley Park était une usine à décrypter dans laquelle la quasi-totalité des mathématiciens de Cambridge et d'Oxford s'étaient enrôlés, travaillant dans des baraquements et faisant les trois-huit. Les réflexions de Turing sur le calcul le plaçaient en première ligne pour participer à cette entreprise. La marine allemande utilisait une machine à crypter, Enigma. Il s'agissait d'une version ultrasophistiquée d'autres modèles allemands du même nom, employés par les armées de terre et de l'air, et déjà étudiés par les services de renseignement polonais. Ces derniers avaient en effet construit des "bombes", machines qui permettaient de tester toutes les clés de chiffrement

possibles dans un minimum de temps. Faire vite était indispensable, car la clé changeait tous les jours.

Turing n'a-t-il fait qu'utiliser les bombes conçues et construites par les Polonais ?

F. M. : Non, les bombes des Polonais ne permettaient de casser que les premières versions d'Enigma. Turing a participé à la construction de bombes adaptées à la version utilisée par la marine. Surtout, il a exploité différentes faiblesses dans la façon dont les Allemands utilisaient leur système de codage. Ils commençaient, par exemple, leurs messages par des formules de politesse assez convenues, de type *Herr Kommandant*, faciles à deviner. Tout comme les messages très courts et stéréotypés qu'ils envoyaient régulièrement pour donner la météo ou annoncer qu'il ne se passait rien. En cryptanalyse, justement, on cherche souvent d'abord à deviner ce que des mots veulent dire et ensuite on teste si la clé de chiffrement ainsi définie fonctionne sur l'ensemble du ou des messages. C'est dans



© INRIA

cette approche déductive que Turing a fait preuve d'une grande intuition pour réduire le nombre de combinaisons à tester. C'est là que résident la prouesse et l'intelligence.

Que peut-on dire de l'apport de Turing à la cryptographie ?

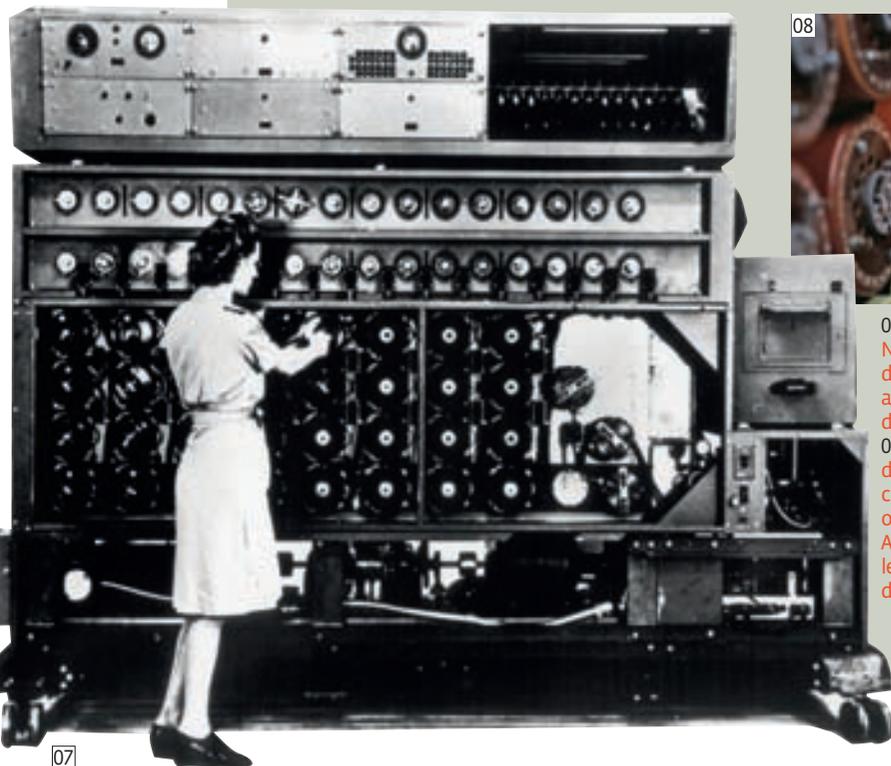
F. M. : Peu de choses en réalité. Ses travaux n'ont jamais fait l'objet de publications scientifiques. On ne dispose que de son carnet de laboratoire, inaccessible jusqu'en 1996 à cause du secret militaire, et qui n'a pas été rédigé de manière scientifique. Il y consigne tout ce qu'il sait, mais on ignore la part entre ses propres réflexions et les informations glanées auprès des autres scientifiques et agents des services secrets. Ensuite, il faut bien comprendre la distinction entre la cryptographie, science du chiffrement qui nécessite la production d'algorithmes et de théories, et la cryptanalyse, qui consiste à casser un code secret. Il n'y a pas de théorie du cassage. Il s'agit essentiellement d'avoir l'intelligence et l'astuce d'exploiter les faiblesses d'un système ou de son utilisation par les opérateurs humains. Quoi qu'il en soit, la façon dont Turing y est parvenu à l'époque, sans ordinateur, reste un immense tour de force et fait partie de la mythologie de la discipline.

Propos recueillis par C. Z.

1. Unité CNRS/École polytechnique.
2. François Morain donnera une conférence intitulée « Turing et la cryptanalyse » le 20 septembre (lire p. 19).

CONTACT :
François Morain
> morain@lix.polytechnique.fr

CLÉ DE CHIFFREMENT
Logique selon laquelle telle lettre est remplacée par telle autre.



08

07 "Bombe" de l'US Navy construite d'après les "bombes" anglaises, avec l'aide de Turing.

08 Reconstitution de l'une de ces machines qui ont permis aux Alliés de décrypter les messages codés des Allemands.

© J. KINGHOLMES/BLETCHLEY PARK TRUST/SPL/COSMOS



© SSP/L'EMERGE

« Par ailleurs, après avoir construit l'ordinateur, machine déterministe qui exploite dans toute son extension le domaine de ce qui est calculable, Turing se heurte aux processus biologiques qui entretiennent avec le déterminisme un rapport tout autre », note Jean Lassègue. Impossible, par exemple, de prédire les aléas de l'évolution des formes (des feuilles d'une plante, de mâchoires d'animaux, etc.) au fil de microchangements aléatoires étalés sur des milliers de millénaires. En s'interrogeant sur la régularité de la répartition des feuilles d'une plante et sur ses règles mathématiques, Alan Turing renoue avec sa passion d'enfance. Le secret qu'il s'attache dès lors à percer devient celui de la matière : comment sait-elle quelle forme prendre ? En 1952, il publie sur cette question, dans la revue *Philosophical Transactions of the Royal Society*, un article qui deviendra fondateur en biologie théorique (lire l'encadré ci-contre).

UNE FIN TRAGIQUE

Mais les deux dernières années de sa vie précipitent sa fin tragique. Une aventure avec un jeune homme le conduit au tribunal, où il plaide coupable pour « pratiques indécentes réitérées en compagnie d'un autre homme ». Considérant qu'il a bien trop de travail pour aller en prison, il accepte l'alternative qu'on lui propose : la castration chimique. Ils peuvent bien faire ce qu'ils veulent de son corps pense-t-il,

09 Conçu suivant des plans de Turing, cet ordinateur anglais nommé Deuce, commercialisé en 1956, s'est vendu à 30 exemplaires. Sa puissance équivaut à celle d'une simple calculatrice d'aujourd'hui.



© FOTOLIA

10



11

© LIBRARY AND ARCHIVE CENTER, KING'S COLLEGE CAMBRIDGE, AM17C/25/PN, EURBANK

UNE PASSION POUR LA MORPHOGENÈSE

Fleur de tournesol, pomme de pain, motifs de coquillages... La régularité mathématique de l'organisation des formes dans la nature passionne Alan Turing depuis son enfance. La morphogenèse, étude

des mécanismes de croissance des formes biologiques à partir de la fécondation, devient même une obsession durant les quatre dernières années de sa vie. À l'époque, Watson et Crick sont sur le point

de percer la structure de l'ADN. Mais Turing avait déjà perçu que la génétique ne suffirait pas pour tout décrire. Celle-ci fonctionne selon un code fixe, or il n'existe pas de déterminisme en biologie : les aléas imprévisibles de l'évolution des espèces en témoignent. Dans son article de 1952, Turing est le premier à utiliser les équations différentielles, très complexes, de réaction-diffusion, dans le cadre de la morphogenèse. Sa démonstration est capitale dans l'histoire de la biologie du développement.

Sur ce dessin (11), Turing a pointé et numéroté la position des étamines d'une fleur de tournesol (10), dont l'organisation en double spirale (l'une rouge, l'autre noire) avait déjà été observée par les savants du XIX^e siècle.

son esprit, son logiciel, restera intact... « Mais, sous l'effet des hormones, le voilà transformé en ce qu'il s'imagine être une presque femme. Et si la pensée et le corps entretenaient des liens plus profonds qu'il ne le croyait ? Et s'il s'était trompé ? » interroge Jean Lassègue, se figurant les dernières pensées du mathématicien. Le 7 juin 1954, Alan Turing est retrouvé raide et froid dans son lit. La pomme au cyanure a fait son œuvre.

1. Unité CNRS/Ecole polytechnique.
2. Unité CNRS/Université de Strasbourg.
3. *Vie et mort de l'étrange Dr Turing*, documentaire de Christopher Sykes, 1992.

CONTACTS :

Philippe Breton
> phbreton@club-internet.fr
Jean Lassègue
> jean.lassegue@polytechnique.edu
Pierre Lescanne
> pierre.lescanne@ens-lyon.fr

Informatique En 1936, Alan Turing démontre qu'on ne peut pas tout calculer de manière automatique. Il imagine pour cela un concept de machine dont le principe inspire encore le fonctionnement de nos ordinateurs.

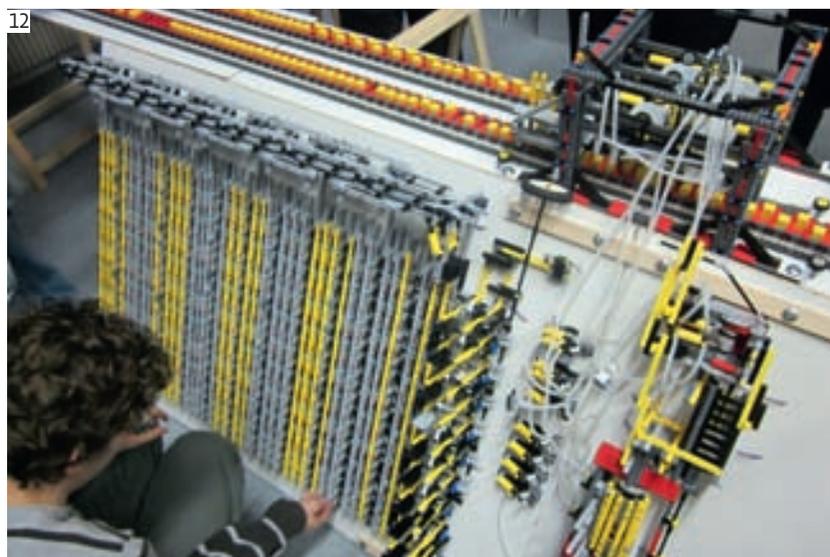
Les prémices de l'ordinateur

PAR DENIS DELBECQ

En 1928, le mathématicien David Hilbert lance un défi à ses collègues, qu'il baptise problème de la décision. Existe-t-il une méthode mécanique qui puisse décider si un énoncé mathématique est vrai ou faux? Au King's College de l'université de Cambridge, Alan Turing s'attelle au sujet. « *La question était de savoir s'il était possible de déterminer si un énoncé est démontrable ou non avec une machine* », raconte Olivier Bournez, directeur du Laboratoire d'informatique de l'École polytechnique. Hilbert est persuadé que la réponse est positive. « *Alan Turing était convaincu du contraire* », explique Nicolas Ollinger, du Laboratoire d'informatique fondamentale d'Orléans¹.

Et le Britannique a raison : en 1936 – il n'a encore que 24 ans –, il publie dans les *Annales* de la Société de mathématiques de

12 Dans le cadre du projet Rubens, des étudiants de l'École normale supérieure de Lyon ont fabriqué une machine de Turing en Lego.



© CC BY-SA

Londres un article qui confirme son intuition et marquera l'histoire de l'informatique à jamais. Pour expliquer sa démarche, il a imaginé une machine fictive qui lui permet de décrire un calcul complexe sous forme d'une séquence d'opérations simples. « *Il a prouvé que ce qui peut être calculé par un humain qui travaille avec du papier et un crayon peut l'être aussi par une machine* », résume Olivier Bournez. Le plus remarquable, c'est que le mathématicien n'a pas eu besoin de construire sa machine ni de s'appuyer sur des exemples : la seule force du raisonnement a suffi.

L'INTUITION DE L'ALGORITHME

Malgré cela, Alan Turing ne dispose pas encore d'un arsenal assez complet pour répondre au problème de la décision posé par Hilbert. Car sa machine ne peut effectuer qu'un seul type de calcul, celui pour lequel elle a été conçue. Elle ne peut donc répondre dans le cas général, comme l'exige la question de Hilbert. Il faut quelque chose de plus souple.

Le mathématicien imagine alors, toujours dans son article de 1936, un outil pour sa démonstration : une machine universelle capable de simuler n'importe quelle autre machine simple. Il suffit de lui fournir, sous forme codée, le programme qu'elle devra exécuter, en plus des données qui seront manipulées. Le concept d'ordinateur est né, tel qu'il existe encore aujourd'hui : une machine reçoit un algorithme – un programme – et les données auxquelles ce dernier s'applique. « *C'est bien Turing qui a formalisé le concept d'algorithme*, confirme Nicolas Ollinger. *Nos ordinateurs sont dérivés de sa machine universelle.* »

Fort de cette machine généraliste, Turing peut enfin s'attaquer au problème de Hilbert. La démonstration est loin d'être évidente. D'abord, il se demande s'il existe une méthode, un algorithme, qui permet de décider si un calcul, quel qu'il soit, s'arrêtera à un moment donné. Turing prouve que ce n'est pas le cas, qu'il est impossible de prévoir qu'un calcul

Thierry Viéville, Laboratoire lorrain de recherche en informatique et ses applications¹

« *Pour que nos citoyen(ne)s comprennent les fondements de ce qui fait la société numérique d'aujourd'hui, afin qu'ils en soient les créateurs et pas seulement les utilisateurs, il fallait choisir un visage à cette mutation de civilisation. Celui de Turing est un fort bon choix. C'est celui de la pluridisciplinarité, de la rigueur technique associée à l'imaginaire créatif. Qu'un antihéros soit l'icône de cette science ne peut que la rendre plus accessible.* »

1. Unité CNRS/Université de Lorraine/Inria.



© C. LEBENSKY/INRIA

peut s'achever. Il va ensuite raisonner par l'absurde. Il démontre que, s'il existe une solution au problème de Hilbert, alors elle peut être utilisée pour montrer qu'il est possible de prévoir la fin d'un calcul. Or il a justement prouvé le contraire. Donc cette fameuse solution au problème de Hilbert n'existe pas. Il n'est pas possible de dire, de manière mécanique, si un énoncé est vrai ou faux. « *Ce qui signifie qu'il y aura toujours du travail pour les mathématiciens* », s'amuse Pascal Koiran, du Laboratoire de l'informatique du parallélisme, à Lyon.

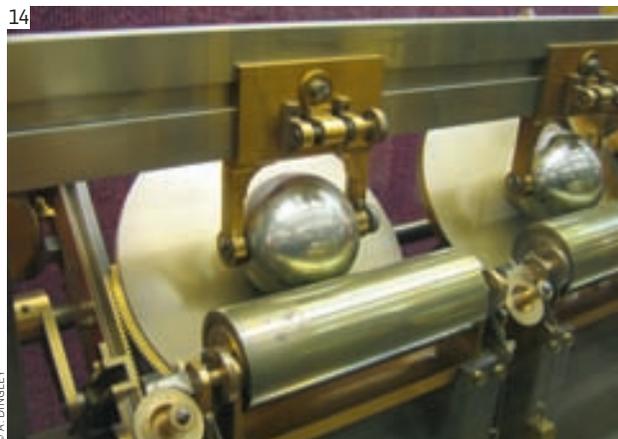
UNE MÉTHODE SIMPLE

Quelque temps auparavant, l'Américain Alonzo Church était arrivé au même constat qu'Alan Turing, mais par une autre démarche, baptisée *lambda calcul*. « *L'approche de Turing n'était pas la première. Mais c'est la plus simple et la plus naturelle. C'est pour cette raison qu'elle*



© TDPOR/WIKIMEDIA COMMONS

14



© A. DINGLEY

est passée à la postérité », précise Pascal Koiran. On sait aujourd'hui que les deux méthodes, et d'autres imaginées depuis, sont parfaitement équivalentes et affichent les mêmes potentialités : qu'on construise un ordinateur suivant les idées de Turing, de Church ou de n'importe quel autre principe, ce qui n'est pas calculable pour un ordinateur ne le sera pas non plus pour un autre.

Même les systèmes dits analogiques qui, historiquement, ont précédé les ordinateurs numériques et leurs séries de 0 et de 1, seraient incapables de dépasser cette limite. Une machine analogique manipule

13 L'ordinateur analogique Akat-1, construit en 1959 par le Polonais Jacek Karpinski. 14 Détail de la machine inventée par Lord Kelvin et par son frère, James Thomson, pour calculer la hauteur des marées.

des signaux continus : du courant électrique, un mouvement mécanique ou de la lumière. Au XIX^e siècle, Lord Kelvin calculait la hauteur des marées avec un assemblage de tiges, de sphères et de disques, tandis que les artisans américains de la Seconde Guerre mondiale ont profité des tables de balistique calculées par Vannevar Bush au Massachusetts Institute of Technology.

Et, si le calcul analogique a rapidement été supplanté par l'ordinateur après la guerre, il reste un objet d'étude. « *Même si ce n'est pas totalement démontré, nous pensons qu'un système analogique ne peut pas calculer ce qui n'est pas calculable avec un ordinateur numérique au sens de Turing* », explique Olivier Bournez. « *On ne peut pas imaginer de modèle physiquement réalisable et plus puissant que celui de Turing à cause des lois de la physique*, poursuit Pascal Koiran. Tous les ordinateurs doivent les respecter. »

Soixante-seize ans après leur publication, les résultats de Turing n'en finissent pas de jouer des tours aux informaticiens. Le fait qu'il existe des choses non calculables les empêche, par exemple, d'être sûrs à 100 % qu'un programme ne

comporte pas de bug ou que le logiciel de vol d'une fusée ne va pas s'égarer dans une boucle de calcul infini et causer sa perte. « *Il existe bien des systèmes qui analysent le code informatique pour y déceler des erreurs*, remarque Olivier Bournez. *Mais il y a beaucoup de limitations. Il n'est pas facile de contourner la notion d'incalculabilité démontrée par Turing. Savoir qu'on ne peut pas tout programmer ni tout vérifier est très frustrant pour un informaticien !* »

LES DÉFIS QUI RESTENT À RELEVER

De même, les théoriciens font beaucoup d'efforts depuis les années 1970 pour évaluer la difficulté des calculs. « *C'est ce que l'on appelle la théorie de la complexité algorithmique. Il s'agit d'évaluer comment le coût en ressources – le temps de calcul et la mémoire – évolue au fur et à mesure qu'on augmente la taille des données* », explique Guillaume Theyssier, chercheur au Laboratoire de mathématiques de l'université de Savoie². Ce qui permet, par exemple, de savoir si un doublement du nombre de paramètres à gérer va doubler, décupler ou multiplier par mille le temps de calcul.

Dans la théorie de la complexité, les informaticiens regroupent dans la classe P les problèmes qui peuvent être résolus avec un temps de calcul raisonnable. On appelle cela un temps polynomial : trier des nombres du plus petit au plus grand ; déterminer si un nombre entier est premier (c'est-à-dire divisible seulement par un et par lui-même)... Une autre classe, baptisée NP, rassemble des problèmes dont une solution peut être vérifiée dans un temps raisonnable.

C'est le cas du problème d'un voyageur de commerce qui prépare sa tournée : « *Existe-t-il un trajet inférieur à une certaine distance, mille kilomètres par exemple, qui relie les villes où je dois me rendre ?* » Vérifier que la longueur d'un trajet préétabli traversant trente villes est inférieure à une distance donnée est facile, puisque cela ne demande qu'une trentaine d'additions. En revanche, trouver le ou les trajets ne l'est pas forcément. Avec un ordinateur, calculer un parcours en partant des coordonnées des villes est un terrible

UNE MACHINE ENTRÉE DANS LA LÉGENDE

→ Alan Turing a imaginé une machine mécanique qui manipulerait des informations – des lettres ou des chiffres – suivant des règles définies dans une table. Une machine capable de résoudre un problème unique, pour lequel elle aura été conçue. On peut la représenter comme un appareil qui comporte un ruban de papier de longueur infinie portant une succession de cases et un registre mémorisant l'état de la machine. L'opérateur (une tête de lecture/écriture) peut lire et écrire le contenu d'une case – une lettre tirée d'un alphabet fini (nos 26 lettres ou les 10 chiffres, par exemple) –, et se déplacer d'une case vers la gauche ou vers la droite. À partir d'un mot d'entrée noté sur le ruban, la machine va exécuter une instruction qui peut être : « Si la machine est dans l'état q et

qu'elle lit le chiffre 1 sur le ruban, alors écrire le chiffre 2, passer dans l'état q' et déplacer la tête d'une case vers la droite, commente le chercheur Nicolas Ollinger. À chaque étape, la machine cherche dans sa table l'instruction à appliquer et l'exécute, jusqu'à ce qu'elle ait l'ordre de s'arrêter. » Pour établir un parallèle avec nos ordinateurs, la taille de la mémoire est représentée par la longueur du ruban, et le temps de calcul, par le nombre d'opérations à accomplir sur ce ruban. « Un exemple classique est la reconnaissance de langage, indique Nicolas Ollinger. Selon le mot d'entrée, l'appareil doit répondre "oui" si c'est un palindrome, c'est-à-dire un mot qui se lit indifféremment de gauche à droite et de droite à gauche, et "non" dans le cas contraire. »

15 Illustration de la théorie du "castor affairé", exemple d'incalculabilité : une machine de Turing, avec un nombre fixe d'instructions, doit écrire un maximum de 1 sur son ruban avant de s'arrêter. Or il est impossible de déterminer le nombre maximal de 1 atteignable.

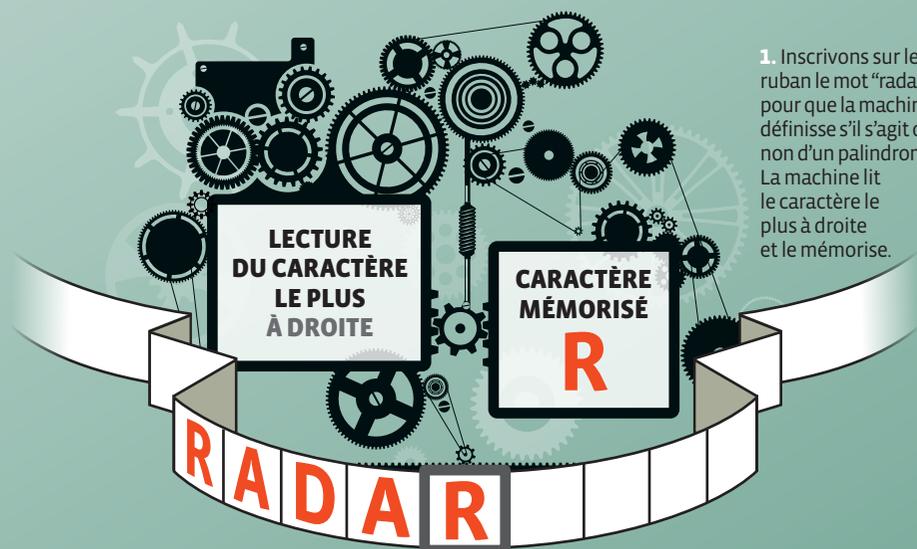
© G. THEYSSIER

casse-tête : entre 4 points, il y a 6 trajets différents possibles ; pour 8, il existe plus de 5 000 chemins ; et pour 13, on en recense près de 480 millions...

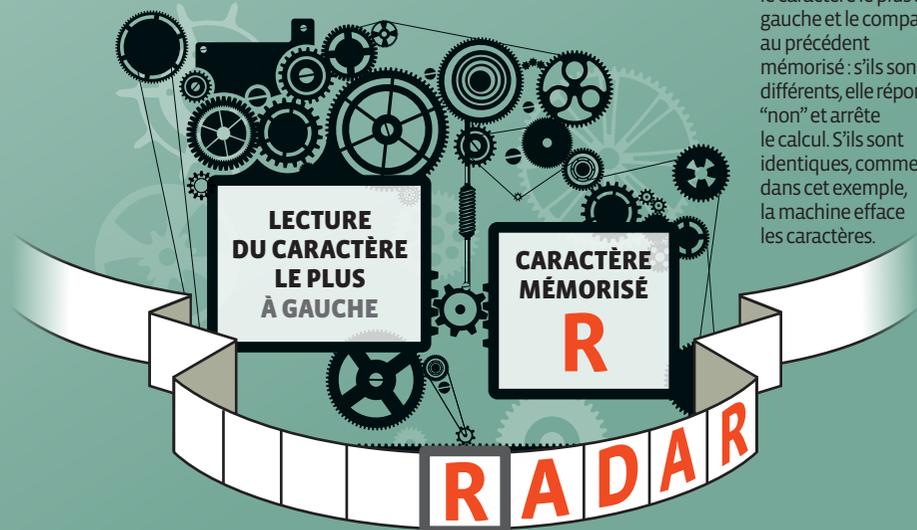
« Une des grandes questions non résolues est de déterminer si les classes des problèmes P et des problèmes NP sont équivalentes. C'est la quête du Graal pour les théoriciens », souligne Pascal Koiran, dont c'est le pain quotidien. En d'autres termes, un problème dont une solution est vérifiable dans un temps raisonnable (la classe NP) peut-il aussi être résolu dans un temps raisonnable (la classe P) ? La réponse est si peu évidente que cette question a été inscrite parmi les sept défis du millénaire lancés en 2000 par l'Institut américain de mathématiques Clay.

L'ÈRE DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE

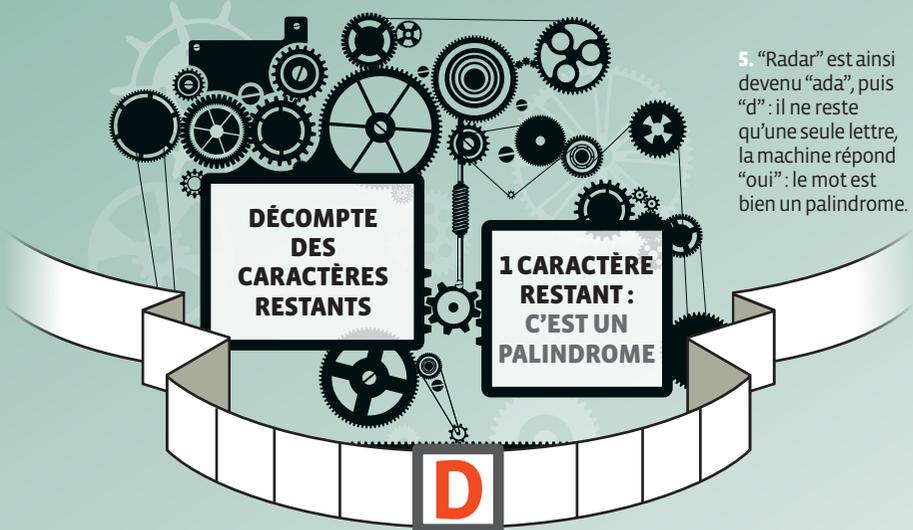
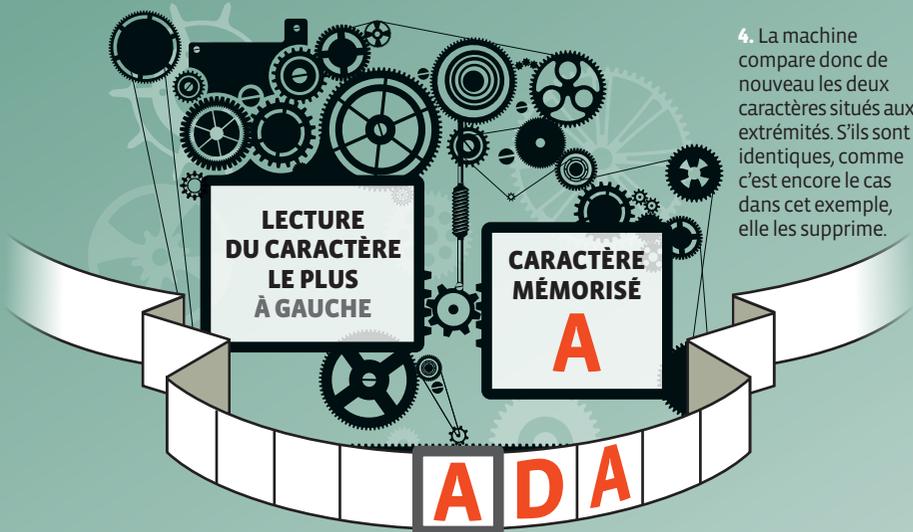
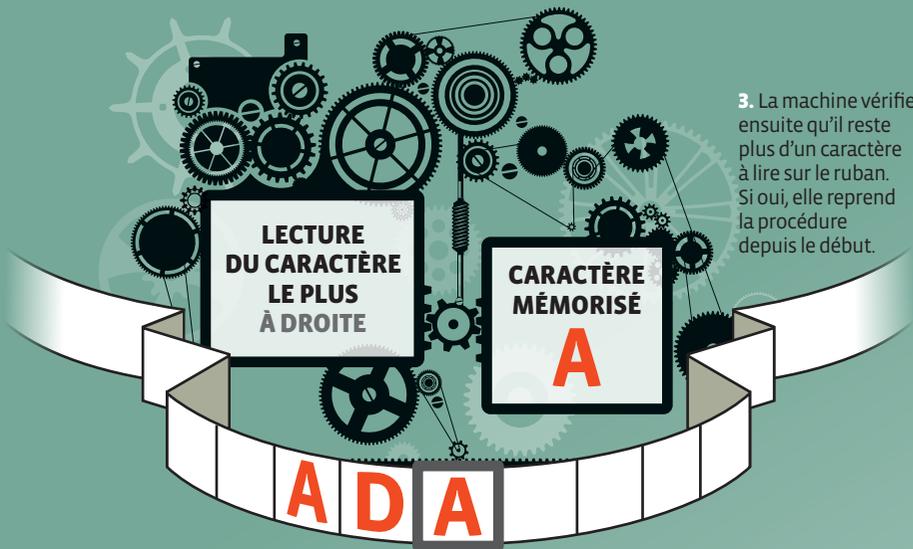
Ces dernières années, une nouvelle discipline est venue enrichir la réflexion des penseurs de l'informatique fondamentale : en 1982, le Prix Nobel de physique Richard Feynman avait proposé de réaliser des calculateurs avec des systèmes reposant sur la physique quantique. Dans un ordinateur classique, une information élémentaire – le bit – peut prendre deux valeurs, le 1 ou le 0, à l'image d'une écluse



1. Inscrivons sur le ruban le mot "radar" pour que la machine définisse s'il s'agit ou non d'un palindrome. La machine lit le caractère le plus à droite et le mémorise.



2. Puis la machine lit le caractère le plus à gauche et le compare au précédent mémorisé : s'ils sont différents, elle répond "non" et arrête le calcul. S'ils sont identiques, comme dans cet exemple, la machine efface les caractères.



ouverte ou fermée. Dans le monde de l'infiniment petit, la réalité dépasse l'entendement : une écluse quantique peut être ouverte, fermée, ou ouverte et fermée en même temps ! Autrement dit, l'analogie quantique du bit – le qubit – peut valoir 0, 1, ou 0 et 1 à la fois.

DES RÉSULTATS IMMUALES ?

Encore très rudimentaires, les premières puces quantiques ne manipulent que quelques-uns de ces qubits à coups d'atomes ou de molécules, bien loin des milliards de bits de nos puces électroniques. Mais, en théorie, un ordinateur quantique serait capable d'effectuer des milliards de milliards de milliards de calculs en même temps, quand les machines les plus puissantes actuellement n'en font que des milliers. Est-ce suffisant pour s'affranchir des difficultés soulevées par Alan Turing il y a près de quatre-vingts ans ? Pour le savoir, les scientifiques ont déjà décrit ce que serait une machine de Turing quantique.

D'après Nicolas Ollinger, les espoirs de révolution demeurent toutefois minces : « Si on parvient à construire des ordinateurs quantiques, on gagnera peut-être beaucoup de temps à résoudre des problèmes qui dépassent aujourd'hui les capacités de nos machines. Mais, en termes de calculabilité, ils ne feront pas mieux : ce qui n'est pas calculable au sens de Turing ne le deviendra pas pour autant. » Les résultats de Turing semblent être une barrière décidément infranchissable !

1. Université d'Orléans/Ensi de Bourges.
2. Unité CNRS/Université de Savoie.

CONTACTS :

Olivier Bournez
> bournez@lix.polytechnique.fr
Pascal Koiran
> pascal.koiran@ens-lyon.fr
Nicolas Ollinger
> nicolas.ollinger@univ-orleans.fr
Guillaume Theyssier
> guillaume.theyssier@univ-savoie.fr
Thierry Viéville
> thierry.vieville@inria.fr

Informatique En créant son concept de machine universelle, puis en mettant au point son fameux test visant à déterminer si une machine peut penser, Alan Turing a ouvert la voie aux travaux sur l'intelligence artificielle de manière décisive.

Sur la piste de l'intelligence artificielle

PAR LAURIANNE GEFFROY

« **Les machines peuvent-elles penser ?** » s'interroge Alan Turing en préambule de l'une de ses publications les plus célèbres¹. La question est abstraite et sans conteste philosophique. Elle ouvre néanmoins très concrètement la voie de l'intelligence artificielle et influencera des générations de chercheurs dans leurs réalisations : moteurs de recherche, réseaux sociaux, analyses d'images, agents virtuels... Mais comment la question d'une machine pensante a-t-elle pu avoir une telle influence ? Tout simplement parce qu'en y répondant Turing propose une définition de l'intelligence et donne, en quelque sorte, le mode d'emploi pour construire cette fameuse machine pensante.

ALAN TURING, L'AUDACIEUX

« *Il fallait vraiment être audacieux et visionnaire pour se poser une question pareille à une époque où les ordinateurs avaient la puissance de calcul d'une montre* », affirme Jean-Paul Haton, chercheur au Laboratoire lorrain de recherche en informatique et ses applications. Effectivement, nous sommes en 1950, l'informatique est balbutiante, et la discipline de l'intelligence artificielle ne fera son apparition officielle qu'en 1956, après la mort de Turing, à la suite de l'atelier d'été organisé par John McCarthy au Dartmouth College.

D'audace et de vision, Turing n'en manquera pas, puisqu'il répondra à cette question philosophique en mathématicien et élaborera le test qui porte aujourd'hui son nom. La première étape de son raisonnement consiste à reformuler la question de départ, abstraite, en une proposition plus facilement



16 En 1997, Garry Kasparov, le champion du monde d'échecs, est battu par l'ordinateur Deep Blue, mis au point par la société IBM.

démontrable. Ainsi, « *Une machine peut-elle penser ?* » devient « *Une machine peut-elle imiter l'homme ?* » qui, lui, sans conteste, pense...

LE TEST DE L'IMITATION

Le test de Turing sera donc un jeu d'imitation à l'issue duquel une machine pourra être déclarée intelligente ou pas. Dans un premier temps, un interrogateur doit dialoguer avec une femme et un homme ayant pour consigne de se faire passer pour une femme, puis déterminer lequel des deux est réellement une femme. Pour faire abstraction des apparences, de la voix et du visage, les échanges sont dactylographiés. Dans un second temps, l'homme est remplacé par une machine à l'insu de l'interrogateur. Désormais, la machine imite l'homme qui imite la femme. Si l'interrogateur est incapable d'identifier la femme, qu'il ne peut dissocier l'homme et la machine, alors on peut considérer que la machine est intelligente.

Deux présupposés, qui fondent la notion d'intelligence pour Turing, sont requis pour élaborer ce test. En premier lieu, Alan Turing a la certitude que toute activité intellectuelle peut se reproduire

à l'aide de nombres. « *Le calcul, qui vient du mot caillou, consiste à manipuler des objets symboliques pour décrire des opérations de la pensée*, raconte Jean-Gabriel Ganascia, chercheur au Laboratoire d'informatique de Paris 6 (LIP6)². Alan Turing s'est demandé quelle était la puissance de ces objets symboliques, autrement dit, ce que l'on pouvait faire avec des calculs. » Dès 1945, il a l'intime conviction que les fonctions de notre esprit peuvent s'écrire sous forme mathématique à partir d'un nombre fini de symboles que l'on stockerait et que l'on emploierait au fur et à mesure que le raisonnement avance. C'est-à-dire qu'une machine dotée d'une mémoire, d'une bonne base de connaissances et de règles de calcul bien choisies pourrait tout à fait mimer le raisonnement humain.

Ce faisant, il dresse le portrait intuitif de ce qui deviendra l'ordinateur moderne, avec son disque dur, son processeur, son système d'exploitation et ses

L'ERREUR EST HUMAIN !

Pour se faire passer pour un humain, une machine doit avoir sa logique, mais aussi... ses défauts. Alan Turing étayera sa démonstration avec des dialogues imaginaires, précisant les erreurs et les errements humains à reproduire pour donner toutes les chances à la machine de réussir le test. Ainsi, lorsque l'interrogateur demande « *Pourriez-vous m'écrire un sonnet ?* », la machine n'aura qu'à botter en touche, comme le feraient la plupart des gens, et répondre « *Je n'ai aucun talent pour la poésie* ». De la même façon, si l'interrogateur demande « *Ajoutez 34 957 à 70 764* », la machine, après une pause de 30 secondes, pourra fournir une réponse fautive « *105 621* ».

17



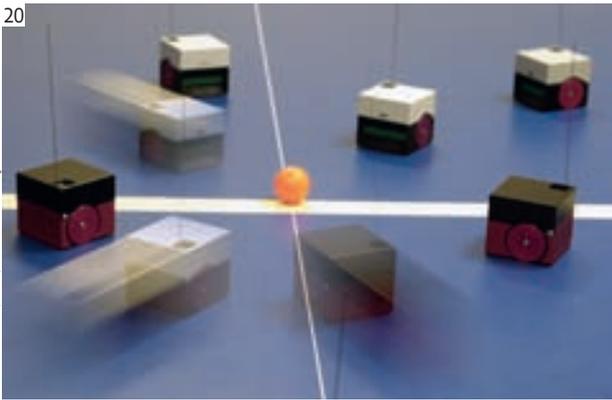
© B. KRAFFT

18



© B. KRAFFT

20



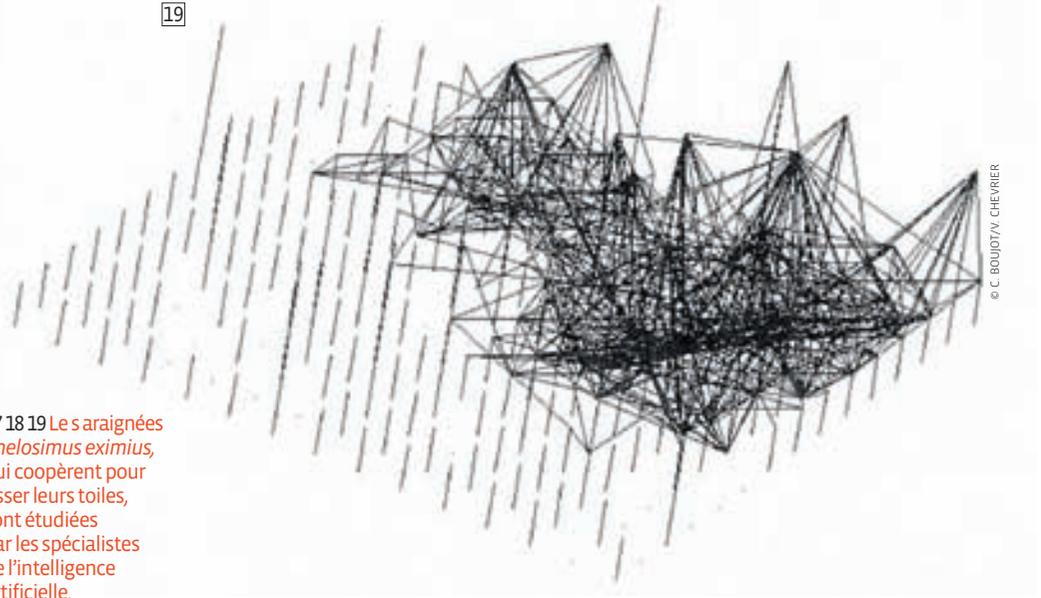
© R. LAMOURÉUX/INRIA/CNRS PHOTO THÈQUE

programmes. « Alan Turing est le père de l'intelligence artificielle, mais aussi, et de façon indissociable, le père de l'informatique », souligne Marie-Christine Rousset, déléguée scientifique au Laboratoire d'informatique de Grenoble³. Une paternité qui lui est à ce point reconnue que certains n'hésitent pas à voir dans le célèbre logo de la "pomme croquée", apposé sur quelques millions d'ordinateurs, un hommage posthume à ce mathématicien visionnaire.

LES LIMITES DES ALGORITHMES

En décrivant sa machine, Turing envisage également ses possibilités. « Il a ouvert le domaine de l'intelligence artificielle tout en montrant qu'il existait des limites, que certaines choses pouvaient être mécanisées et automatisables dans le raisonnement humain, et d'autres pas, poursuit Marie-Christine Rousset. Ces limites, propres aux algorithmes, offrent un cadre fondamental qu'il est indispensable de connaître pour ne pas promettre la lune, ce que beaucoup de chercheurs en intelligence

19



© C. BOUJOTY CHEVRIER

17 18 19 Les araignées *Anelosimus eximius*, qui coopèrent pour tisser leurs toiles, sont étudiées par les spécialistes de l'intelligence artificielle.

artificielle ont fait au départ. » À ce premier présupposé concernant la reproduction de l'intelligence par les nombres s'ajoute un second : l'intelligence est indépendante de la forme. La différence physique entre un homme et une femme n'a donc aucune incidence sur l'intelligence proprement dite, pas plus que la différence de constitution entre un homme et une machine.

« Avec son test, Alan Turing circonscrit vraiment la portée de l'intelligence artificielle en éliminant les aspects physiques et physiologiques », résume Jean-Gabriel Ganascia. Débarassée de la forme, l'intelligence n'est donc plus le propre de l'homme. On peut ainsi la déceler dans la nature, l'évolution des espèces ou certains comportements animaux, et l'utiliser, au même titre que le raisonnement humain, pour créer des

algorithmes destinés à nourrir les machines. « Aujourd'hui, les robots en essaim s'inspirent largement des insectes sociaux, des fourmis ou des abeilles, qui font émerger de l'intelligence à partir d'interactions très simples, informe Jean-Paul Haton. Nous avons, par exemple, modélisé le comportement d'araignées sociales, de type *Anelosimus eximius*, qui coopèrent pour construire leurs toiles. Il s'agit de recherches fondamentales qui pourraient très bien, un jour, inspirer le monde industriel pour les chaînes de fabrication. » À la fin de sa vie, Turing lui-même tentera de mettre en équation la croissance des cellules biologiques, la façon dont celles-ci s'organisent et permettent à l'intelligence d'émerger. Ces travaux sur la morphogenèse devanceront les notions d'algorithme génétique et d'informatique évolutionniste.

21



© A. BADERTSCHER/ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Jean-Gabriel Ganascia, Laboratoire d'informatique de Paris 6

« Le test de Turing circonscrit la portée de l'intelligence des machines. Il évacue le débat sur la conscience ou plutôt sur la reproduction d'une conscience ; il évacue les dimensions perceptives et corporelles de l'intelligence, ainsi que les interrogations métaphysiques. Ce faisant, il a tracé la voie à l'approche pragmatique et empirique qu'a adoptée l'intelligence artificielle et qui a assuré ses indéniables succès pendant plus d'un demi-siècle. »



© C. LEBEDINSKY/CNRS PHOTOTHÈQUE

Pour Alan Turing, les connaissances sont indispensables à la réalisation d'une machine intelligente. Aucune machine ne peut jouer au jeu de l'imitation et réussir à duper l'homme si on ne lui donne pas un solide bagage culturel et des règles logiques pour l'utiliser à bon escient. Cette approche anticipe ainsi ce que seront les systèmes à base de connaissance, l'une des deux voies de l'intelligence artificielle.

LE CERVEAU DÉCORTIQUÉ

Ces connaissances, Turing envisage également que la machine puisse les acquérir toute seule et se met donc à étudier l'organisation et la dynamique de notre cerveau. Il décrit, dans une publication de 1948⁴, des réseaux de neurones artificiels – modélisés sous forme mathématique et destinés, en théorie, à devenir des réseaux électroniques – initialement connectés de façon aléatoire et capables de s'auto-organiser en fonction de l'usage que l'on en fait. C'est la deuxième voie de l'intelligence artificielle.

« Ces deux écoles, intitulées Making a mind (imiter la pensée) et Modeling the brain (imiter le cerveau) par le philosophe américain Hubert Dreyfus, se sont longtemps opposées, mais connaissent, depuis le début du XXI^e siècle, un rapprochement certain, signale Jean-Paul Haton. Une troisième voie, fondée sur des méthodes statistiques et probabilistes, a également fait son apparition pour prendre en compte la variabilité naturelle des données. » Cette approche, que l'on couple volontiers aux deux autres, permet, par exemple, de faire de la reconnaissance vocale de qualité en prenant en compte

la variabilité de la voie humaine. *Idem* pour la reconnaissance de l'écriture manuscrite ou le traitement automatique de la langue naturelle.

Quelle que soit la voie utilisée, l'intelligence artificielle a envahi notre quotidien. Elle joue notamment un rôle indispensable dans une société nourrie par un flux constant de vidéos, d'images et de messages en tout genre. Tout un pan de la recherche développe ainsi de nouveaux outils pour compiler, trier et analyser les ressources du Web, des technologies regroupées sous le terme de Web sémantique. « On souhaite développer des moteurs de requête afin de pouvoir interroger le Web par l'intermédiaire d'une question précise, telle "Où est mort Albert Einstein ?", et de pouvoir obtenir en retour une réponse claire et non une liste de documents, illustre Marie-Christine Rousset, qui dirige, pour l'Institut universitaire de France, le projet Intelligence artificielle et Web : extraire et raisonner sur les données du Web. L'une des difficultés est la mise au point d'outils qui restent performants face à la masse phénoménale

d'informations disponibles sur le Web. Le cadre formel de la calculabilité et de la complexité fondé sur le modèle de la machine de Turing est fondamental pour relever ce défi (lire p. 9). L'autre challenge est d'évaluer la qualité des données car, sur le Web, il y a toujours des erreurs ou des opinions divergentes. »

L'ANALYSE DE CONTENUS

Au LIP6, certains chercheurs se concentrent sur l'image et développent des outils pour analyser son contenu : savoir ce qu'elle représente, s'il s'agit d'un objet ou d'une personne, et même de quelle personne exactement. Sur le Web, il est d'ores et déjà possible de faire de la recherche d'images simples par similarité (forme, couleur, texture, etc.) en soumettant au moteur de recherche une requête sous la forme d'une image exemple. Mais la recherche intelligente d'images est loin d'être parfaite. « Il y a toujours un fossé sémantique entre ce que la machine peut faire et les attentes des utilisateurs, réagit Matthieu Cord, spécialiste du traitement de l'image au



À voir sur le journal en ligne : le film *Le Qi d'iCub*.

22 Le robot humanoïde européen iCub a la taille d'un enfant de 3 ans. Ses algorithmes lui permettent d'apprendre à mesurer qu'il interagit avec son environnement.



© L. NATALE

23



© M. OCHS

23 Certains agents virtuels peuvent exprimer des émotions. 24 Mis au point dans le cadre du projet européen Semaine, l'auditeur sensible artificiel (SAL) peut dialoguer avec un humain via un personnage virtuel.

24



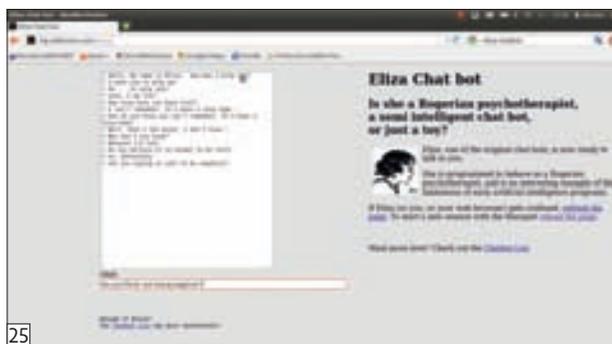
© B. LETTERRIER/CNRS PHOTO THÈQUE

LIP6. En ce moment, avec le projet Asap, nous développons des algorithmes pour faire de la reconnaissance automatique du texte enfoui dans les images ou les vidéos, afin de pouvoir générer des résumés automatiques. Pour nous, c'est très simple, mais pour une machine... »

LA RECONNAISSANCE FACIALE

Les réseaux de neurones artificiels, boostés ces dernières années par l'évolution des technologies et des méthodes d'apprentissage, sont, eux, particulièrement efficaces pour la reconnaissance de visages. « Les réseaux de neurones dernière génération peuvent, à l'image de notre œil, analyser les visages, couche d'information après couche d'information, les mémoriser, puis les reconnaître lorsqu'ils les rencontrent à nouveau », raconte Ludovic Denoyer, spécialiste des réseaux de neurones LIP6.

Parmi les inventions contemporaines en matière d'intelligence artificielle, certaines sont les descendantes directes



25

25 Eliza, l'un des tout premiers agents conversationnels, imite un psychothérapeute lors d'un premier entretien avec son patient.

des machines décrites par Turing dans son test, soit des automates passés maîtres dans l'art de la conversation. Qui n'a jamais été interpellé sur Internet, dans un magasin ou un musée par l'un ces petits personnages animés : « Puis-je vous aider ? Posez-moi votre question. » On appelle ces avatars des *chatbots*, des « robots bavards » en anglais, ou encore des « agents conversationnels » en français. « Il y a deux catégories d'agents conversationnels : ceux qui comprennent

réellement ce qu'on leur dit en réalisant un traitement automatique de la langue, et ceux qui ne comprennent rien à ce qu'on leur raconte, comme Eliza, mais qui ont un système de règles suffisamment malin pour répondre, à peu près bien, à n'importe quelle question », explique Nicolas Sabouret, spécialiste des agents conversationnels au LIP6.

LE SUCCÈS DU ROBOT PSYCHIATRE

Eliza, développé par Joseph Weizenbaum en 1966 pour jouer les apprentis psychiatres, fut l'un des tout premiers agents conversationnels. Il possédait alors moins de 50 mots clés et reformulait la plupart des phrases de son « patient » : « P : Je suis angoissé. – E : Pourquoi dites-vous que vous êtes angoissé ? – P : C'est à cause de ma femme. – E : Parlez-moi de votre famille. » Eliza fut tellement convaincant que certains chercheurs l'imaginaient déjà passer le test de Turing avec succès... Mais, aujourd'hui encore, aucun programme n'a réussi cette prouesse (*lire l'encadré ci-contre*). Les agents de conversation les plus perfectionnés fonctionnent désormais avec 40 000 règles et ont recours à des modèles statistiques, ce qui améliore sensiblement la pertinence de leurs réponses, étend le champ de leur conversation et leur offre même le sens de l'humour (*lire l'encadré p. 13*).

Depuis Turing, les agents conversationnels et les robots compagnons se sont dotés de la parole et de la vision, ce qui a amélioré considérablement leurs

LES "ROBOTS BAVARDS" ONT LEUR PRIX

Tous les ans depuis 1991, le prix Loebner récompense les *chatbots* les plus convaincants, ceux qui imitent l'homme à la perfection (ou plutôt à l'imperfection). Comme dans le scénario imaginé par Turing, des juges dialoguent à l'aveugle avec des hommes et des *chatbots* et doivent deviner qui est qui. Turing avait prédit qu'en l'an 2000 les ordinateurs parviendraient à tromper 30% des juges après cinq minutes de conversation. Cette prédiction ne s'est pas encore réalisée, mais les meilleurs *chatbots* arrivent à duper plusieurs juges, tandis que les humains de la compétition se voient décerner l'étrange titre d'humain le plus humain !



© DR

interactions avec l'homme. Il est d'ailleurs étonnant de constater qu'à travers nos seules expressions faciales un robot arrive à cerner notre état d'esprit et à nous répondre de façon tout à fait pertinente. Ce type de programme est de plus en plus utilisé lors de formations, pour apprendre, par exemple, à gérer un client difficile ou un manifestant agité.

« Dans le cadre du projet européen Tardis, nous allons développer un agent virtuel pour que des jeunes en insertion sociale s'entraînent à passer des entretiens d'embauche, indique Nicolas Sabouret. Le recruteur virtuel n'utilisera que les émotions exprimées par le jeune,

de la levure de boulanger et formulait des hypothèses convaincantes sur la fonction de certains gènes.

Plus récemment, en 2011, le super-ordinateur Watson, d'IBM, capable de répondre en quelques secondes à n'importe quelle question de culture générale, mais aussi de s'abstenir lorsqu'il n'est pas sûr de sa réponse, remportait le jeu Jeopardy. Doté de nouveaux algorithmes et de solides connaissances médicales, Watson va rejoindre l'hôpital Cedars-Sinai, à Los Angeles, pour aider les spécialistes à affiner leur diagnostic ou à proposer un traitement contre le cancer. « On dit toujours que l'intelligence

artificielle n'a pas tenu ses promesses, qu'elle n'a pas réussi à faire un double de l'homme. Mais cela n'a jamais été l'objectif », souligne Jean-Gabriel Ganascia. Aujourd'hui, l'intelligence artificielle doit donc être jugée à l'aune de ses réalisations concrètes, et non pas des rêves fous qu'elle a pu susciter.

1. « Computing Machinery and Intelligence », *Mind*, 1950.
2. Unité CNRS/UPMC.
3. Unité CNRS/Grenoble INP/Inria/UJF/UPMF/ Université Stendhal-Grenoble-III.
4. « Intelligent Machinery », *National Physical Laboratory*, 1948.

26



© G. EVANS/ABERYSTWYTH UNIVERSITY

27



© GETTY IMAGES/AFP

CONTACTS :

Matthieu Cord
> matthieu.cord@lip6.fr

Ludovic Denoyer
> ludovic.denoyer@lip6.fr

Jean-Gabriel Ganascia
> jean-gabriel.ganascia@lip6.fr

Jean-Paul Haton
> jean-paul.haton@loria.fr

Marie-Christine Rousset
> marie-christine.rousset@imag.fr

Nicolas Sabouret
> nicolas.sabouret@lip6.fr

à travers la voix et la reconnaissance des expressions faciales, pour réagir de façon adaptée. Si un jeune se révèle trop désinvolte, l'agent pourra ainsi se montrer cassant dans la question suivante. » D'autres laboratoires se focalisent sur la voix. « Aujourd'hui, il est courant de pouvoir donner des ordres à son téléphone portable mais, d'ici à cinq ans, grâce à un système de traduction instantanée, on pourra discuter en français avec un ami japonais qui parle japonais, illustre Jean-Paul Haton. Ce n'est plus de la science-fiction ! »

26 Le robot Adam émet des hypothèses sur la fonction des gènes. 27 En 2011, l'ordinateur Watson a remporté le jeu Jeopardy. 28 Dans son film 2001, l'odyssée de l'espace, Stanley Kubrick a imaginé un superordinateur doté d'une intelligence artificielle.

28



© MGM/ANG-IMAGES

UN DÉBAT TOUJOURS OUVERT

Alors, les machines peuvent-elles penser ? Le débat reste ouvert. Mais force est de constater que les programmes imaginés par les spécialistes de l'intelligence artificielle réalisent des performances de plus en plus époustouflantes. En 2005, le robot scientifique Adam, de l'université d'Aberystwyth, au pays de Galles, réalisait des expériences sur le génome

Film

Le Modèle Turing

Réalisé par Catherine Bernstein, produit par CNRS Images et Inria, 28 min, 2012 – <http://videotheque.cnrs.fr>

→ **Une dizaine de personnalités scientifiques**, tels le cryptologue Jacques Stern, Médaille d'or du CNRS, le neurobiologiste Alain Prochiantz, les philosophes des sciences Jean Lassègue et Michel Serres, les chercheurs en informatique Véronique Cortier et Laurent Bienvenu, le spécialiste en intelligence artificielle Jean-Gabriel Ganascia ou encore le mathématicien Gérard Berry, évoquent dans ce film l'apport, l'influence et le rayonnement du mathématicien Alan Turing. De ce chercheur reconnu unanimement comme l'un des pionniers de l'informatique et dont les découvertes rayonnent encore de nos jours, ils parlent avec reconnaissance, posant sur lui un regard chaleureux et admiratif. Le film dévoile un homme à la personnalité énigmatique, sensible, à tel point passionné par ses recherches que, lorsqu'il fut condamné

01 Maison d'Alan Turing, à Manchester.
02 De gauche à droite : Jean Lassègue, Michel Serres, Jean-Gabriel Ganascia et Gérard Berry.



© PHOTOS 01-02 - CNRS IMAGES



pour homosexualité, il préféra la castration chimique à la prison. De sa fin tragique – Alan Turing s'est officiellement suicidé –, Michel Serres tire cette conclusion amère : « Cette mort est symbolique d'un rapport entre un individu génial, lucide et salvateur et une société obscurantiste, sottise et criminelle, qui ne le comprend pas. »



Ce film est à voir sur le journal en ligne : www2.cnrs.fr/journal

AVANT-PREMIÈRE |

Le film *Le Modèle Turing* sera diffusé en avant-première le mercredi 6 juin, à 20 heures, dans le cadre du Festival du film de chercheur de Nancy. La projection sera suivie d'un débat en présence, notamment, de Catherine Bernstein, sa réalisatrice, de Catherine Balladur, directrice de CNRS Images et de Jean Mairesse, chercheur au CNRS.

EN LIGNE

> www.filmdechercheur.eu



EXPOSITION |

Interactiv 3.0

Jusqu'au 20 décembre, Espace Turing, Nice (06) – Entrée libre – www.espace-turing.fr

→ **À Nice, l'Espace Turing ouvre ses portes à un large public** dans le cadre de la manifestation pédagogique Interactiv 3.0, consacrée au célèbre mathématicien dont il porte le nom. « L'exposition aborde différents sujets tels que le microprocesseur, les pavages ou les jeux vidéos », précise l'informaticien Marc Monticelli, responsable de l'Espace Turing et organisateur de la manifestation. De nombreuses expériences didactiques viennent compléter ce programme, de même qu'un livret qui est remis aux enseignants.

LIVRE |

L'Intelligence artificielle

Jean-Gabriel Ganascia, Le Cavalier Bleu Éditions, coll. « Idées reçues », 2007 (1^{re} éd.), 128 p. – 9,95 €

→ **Synthétiser les connaissances sur l'intelligence artificielle et tordre le cou aux idées reçues**, telles sont les ambitions du livre de Jean-Gabriel Ganascia, spécialiste du domaine. Parmi ces idées, discutées par l'auteur : « Il n'y a rien à craindre avec les ordinateurs, il suffit de les débrancher », ou encore : « Demain, les robots nous mettront tous au chômage ».



JEU INTERACTIF |

Opera ex machina

L'écho des dialogues
avec une machine
en quête d'identité

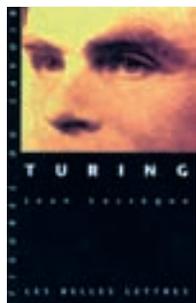
Au mois de juin, en ligne et à Montpellier (34) –
<http://operaexmachina.blogspot.fr>

→ « **Quelle différence y a-t-il entre toi et moi ?** », interroge l'étrange créature appelée **Opera**. « *Moi, je rêve* », répond l'enfant. « *Mais, moi aussi, je rêve !* », réplique la machine tout droit sortie de l'imagination de la plasticienne Cécile Pëndha Thiam. « *Celle-ci s' imagine humaine et cherche à savoir ce qui la différencie de son interlocuteur* », explique l'artiste. « *Les participants au projet ont choisi cet hommage artistique et scientifique pour présenter Turing au grand public* », indique Jean Sallantin, spécialiste en intelligence artificielle. Au mois de juin, cette expérience interactive s'ouvre à tous sur Internet et se prolonge dans la ville de Montpellier *via* des écrans tactiles.



© C. PËNDHA THIAM

→ L'entité virtuelle Opera a été inspirée par les travaux d'Alan Turing sur le dialogue entre l'homme et la machine.

LIVRE |
Turing

Jean Lassègue,
Les Belles Lettres,
coll. « Figures
du savoir », 1998
(1^{re} éd.), 210 p. – 12 €
→ **De son itinéraire
intellectuel aux
décryptages** de ses
travaux et de leurs

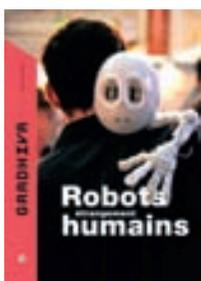
conséquences épistémologiques et philosophiques, cet ouvrage du philosophe Jean Lassègue revisite l'ensemble de l'œuvre d'Alan Turing. Son legs s'avère considérable : « *La mise en rapport de la logique et de la biologie par Turing a transformé radicalement le visage de la science... Reste à en mesurer la valeur et à en approfondir le sens* », conclut l'auteur.

REVUE |

Robots étrangement humains

Gradhiva, n° 15, Denis Vidal et Emmanuel Grimaud (dir.), Musée du quai Branly, mai 2012, 240 p. – 20 €

→ **Faut-il donner aux robots une apparence humaine ? Si quelques traits anthropomorphiques facilitent le premier contact entre les hommes et les machines, une trop grande ressemblance peut**



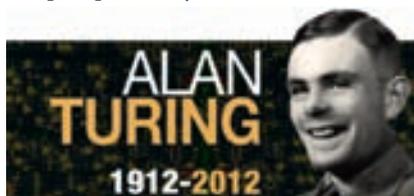
rapidement provoquer un malaise. À travers des exemples concrets, des automates de l'Inde ancienne aux robots les plus perfectionnés, des anthropologues explorent nos relations avec ces machines qui nous ressemblent.

EN LIGNE |

2012, année Turing

www.cnrs.fr/turing2012/

→ **Retrouvez tous les événements organisés par les laboratoires du CNRS à l'occasion de l'Année Turing sur ce site incontournable.** Outre cet agenda, dans une rubrique sous forme de verbatims, des scientifiques, comme Pierre Lescanne, Thierry Viéville ou Laurent Fribourg, et des artistes, tel l'écrivain et scénariste Benoît Peeters, livrent leur point de vue sur l'héritage laissé par Alan Turing : comment le mathématicien prodige et visionnaire a-t-il influencé leur parcours ? pourquoi Turing est-il un repère pour les lycéens du XXI^e siècle ? en quoi le test de Turing joue-t-il un rôle épistémologique majeur ? Ces témoignages vivants et denses disent combien l'œuvre du chercheur reste encore prégnante dans bien des domaines. De nouvelles contributions seront ajoutées tout au long de l'année.



CONFÉRENCES |

Une question résiduelle après Turing : formaliser la notion d'algorithme

Par Serge Grigorieff,
le jeudi 31 mai, Auditorium Ircica, Villeneuve-d'Ascq (59) –
Entrée libre –
www.colloquiumpolaris.fr

Du formel à la forme, Alan Turing et l'apparition de l'informatique

Par Jean Lassègue, le mardi 19 juin, Amphithéâtre Donzelot, Rennes (35) – Entrée libre –
<http://gpl2012.irisa.fr/>

Cycle de six conférences : L'héritage d'Alan Turing, ou comment la machine universelle a bouleversé notre société

Le lundi 2 juillet,
Amphithéâtre Mérieux, ENS,
Lyon (69) – Entrée libre –
www.turing2012.fr
> Turing, du formel logique à la forme biologique en passant par l'informatique
Par Jean Lassègue
> Alan Turing : un inventeur de langages
Par Gilles Dowek
> A. M. Turing, l'audace d'un penseur : le *human computer*, la machine à état discret, la genèse des formes
Par Giuseppe Longo
> La construction et le calcul par Jean-Michel Salanskis
> La thèse de Turing à l'ère du calcul quantique
Par Sophie Laplante
> Calculabilité, langages et machines : Turing et ses contemporains
Par Gérard Berry

Cycle de trois conférences

Salle d'honneur des universités de Nancy (54) – Entrée libre –
www.turing2012.loria.fr
> Turing, la machine et les formes du vivant
Par Giuseppe Longo, le jeudi 13 septembre
> Turing et la cryptanalyse
Par François Morain, le jeudi 20 septembre
> Mécanisme et écriture : Turing dans l'histoire graphique de l'Occident
Par Jean Lassègue, le jeudi 27 septembre



MATHIEU VIDARD

14h - La tête au carré

Echange avec les plus grands scientifiques
qui racontent avec passion et clarté l'actualité
des sciences au quotidien.



franceinter.fr