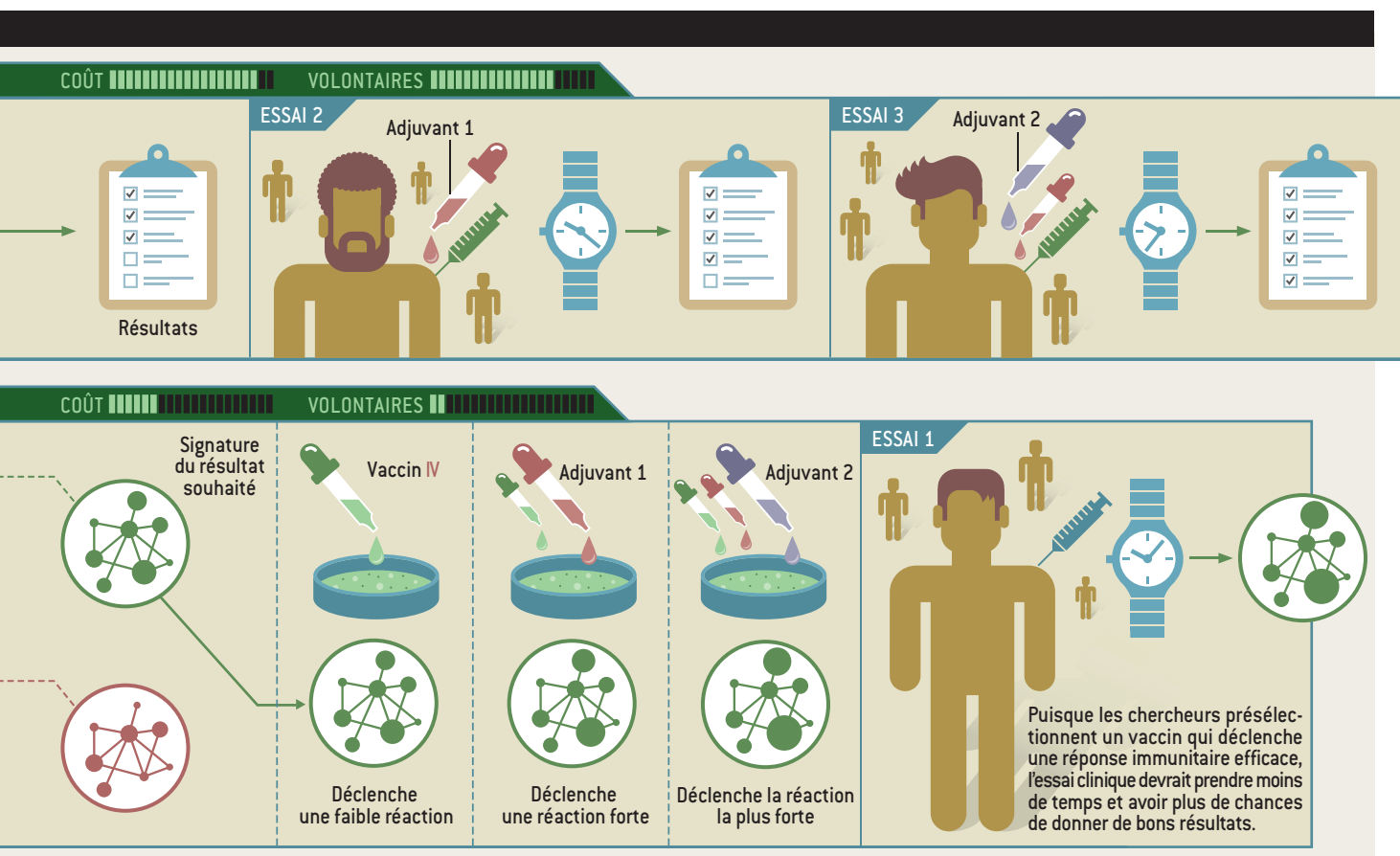




McElrath, du Centre de recherche sur le cancer Fred Hutchinson à Seattle. Nous avons découvert que le vaccin MRKAd5/HIV-1 activait des milliers de gènes pendant les 24 heures qui suivaient l'injection, ce qui confirmait une très forte activation des lymphocytes T. Nous avons aussi constaté que ces gènes concernaient les principaux acteurs du système immunitaire inné. Mais en examinant des échantillons de sang prélevés sur des sujets ayant des anticorps anti-Ad5 (appartenant au groupe qui présentait une susceptibilité accrue à l'infection par le VIH), nous avons constaté que leur système immunitaire inné était très affaibli.

Cette déficience imprévue a probablement favorisé l'infection des personnes vaccinées exposées ultérieurement au virus. Nous essayons de confirmer cette hypothèse et de comprendre pourquoi la puissante activation des lymphocytes T n'a procuré aucune protection.

L'approche de la biologie des systèmes semble plus adaptée pour tester les vaccins expérimentaux et évaluer leur protection. L'objectif est de concevoir des vaccins dont on sait par avance qu'ils déclencheront les

réactions immunitaires souhaitées (voir l'encadré ci-dessus). Les biologistes ont déjà accompli des progrès notables, par exemple en comprenant comment certains adjuvants stimulent le système immunitaire.

Prochaines étapes

Nous avons examiné les réseaux de gènes activés par un grand nombre d'adjuvants. Certains d'entre eux activent des gènes stimulant les lymphocytes T, tandis que d'autres favorisent la production d'anticorps. En combinant nos connaissances sur les adjuvants et la signature moléculaire d'une « réaction immunitaire idéale », nous pensons optimiser la conception de vaccins contre certains agents pathogènes.

Les agents pathogènes responsables des épidémies de sida, de paludisme et de tuberculose ont jusqu'à présent tenu en échec les vaccins classiques. En utilisant la nouvelle approche de la biologie des systèmes, nous espérons mieux comprendre les réactions du système immunitaire et concevoir des vaccins plus efficaces contre ces fléaux.

✓ BIBLIOGRAPHIE

T. Querec *et al.*, Systems biology approach predicts immunogenicity of the yellow fever vaccine in humans, *Nature Immunology*, vol. 10, n° 1, pp. 116-125, 2009.

R.-P. Sékaly, The failed HIV Merck vaccine study: a step back or a launching point for future vaccine development?, *Journal of Experimental Medicine*, vol. 205, n° 1, pp. 7-12, 2008.

H. Saïdi *et al.*, HMGB1-dependent triggering of HIV-1 replication and persistence in dendritic cells as a consequence of NK-DC cross-talk, *PLoS ONE*, vol. 3(10), e3601, 2008.

Les robots font de la science

Ross King

Des machines peuvent-elles émettre des hypothèses, réaliser des expériences et évaluer les résultats, sans l'intervention de l'homme ? Des prototypes montrent que oui.

Peut-on automatiser la recherche scientifique ? Il ne s'agit pas d'automatiser les expériences – cela se fait déjà –, mais de construire une machine qui découvrirait de nouvelles connaissances scientifiques. Depuis dix ans, mon équipe et moi développons un tel robot scientifique.

Pourquoi construire un robot scientifique ? Nous avons deux motivations. La première est de mieux comprendre la science. Le physicien Richard Feynman remarquait que « ce que je ne sais pas créer, je ne le comprends pas ». Dans la même ligne philosophique, tenter de construire un robot scientifique nous oblige à prendre des décisions concrètes reliant des objets abstraits et physiques, des phénomènes observés et théoriques, ainsi que nos différentes façons de poser des hypothèses.

Notre seconde motivation est technologique. Les robots scientifiques pourraient rendre la recherche plus productive et rentable. Certains problèmes scientifiques sont si complexes qu'ils nécessitent une importante quantité de travail : il n'y a pas assez de chercheurs pour tout faire. L'automatisation pourrait résoudre ce problème.

En science, l'informatique a connu d'importants progrès, par exemple l'automatisation des laboratoires à « haut débit » pour le séquençage de l'ADN et la recherche de nouveaux médicaments (avec les techni-

ques dites de criblage). Les ordinateurs effectuent même des opérations moins évidentes : ils analysent aussi des données et commencent à produire des hypothèses scientifiques. En chimie par exemple, les programmes d'apprentissage automatique aident à la conception de nouvelles molécules. L'intérêt d'un robot scientifique serait de combiner ces techniques pour automatiser l'ensemble de la démarche scientifique : formuler des hypothèses, concevoir et réaliser des expériences pour tester ces hypothèses, interpréter les résultats et recommencer le cycle jusqu'à ce que de nouvelles connaissances soient trouvées.

Sommes-nous capables de mettre au point un robot scientifique qui puisse vraiment accomplir cette démarche ? Les caractéristiques de deux robots que nous avons conçus, et de quelques autres dans le monde, suggèrent que oui.

Un robot scientifique nommé Adam

C'est dans les années 1960 et 1970 que des chercheurs de l'Université Stanford, aux États-Unis, ont pour la première fois tenté d'appliquer l'intelligence artificielle à la découverte scientifique. Ils ont conçu un programme informatique nommé DENDRAL pour analyser les données de spectrométrie de masse, et le programme

apparenté, Meta-DENDRAL, a été l'un des premiers systèmes d'apprentissage automatique. Les scientifiques voulaient créer des instruments capables de chercher des signes de vie sur Mars dans le cadre de la mission *Viking* de la NASA en 1975. Mais la tâche était trop importante pour la technologie de l'époque.

Depuis, des programmes tels que *Prospector* (pour la géologie), *Bacon* (pour l'exploration de terrains) et des successeurs plus récents ont automatisé certaines tâches proposant des hypothèses et des expériences à mettre en œuvre. Toutefois, la plupart de ces automates ne réalisent pas eux-mêmes les expériences. C'est pourtant une composante nécessaire si l'on veut que les systèmes à intelligence artificielle fonctionnent même de façon semi-indépendante.

Notre robot, Adam, n'est pas un humanoïde ; c'est un laboratoire automatisé qui remplit un petit bureau (voir l'encadré page 71). L'équipement comprend notamment un congélateur, trois robots pour manipuler les liquides, trois incubateurs, une centrifugeuse, et chaque composant est automatique. Adam a aussi un « cerveau » réalisant des calculs : c'est un ordinateur qui fait des raisonnements, contrôle les ordinateurs individuels actionnant le matériel, et compare les résultats des expériences à ceux prédits selon chaque hypothèse.

Adam réalise des expériences sur les mécanismes de croissance des microbes ; il sélectionne des souches microbiennes et des milieux de culture (des liquides nécessaires à leur développement), puis observe comment les souches se multiplient dans le milieu sur plusieurs jours. Le robot peut tester seul environ 1 000 combinaisons de souches et de milieux par jour. Nous avons conçu Adam afin qu'il étudie un domaine important de la biologie : la génomique fonctionnelle, à savoir les relations entre les gènes et leurs fonctions.

La première étude concernait la levure *Saccharomyces cerevisiae*, un micro-organisme constitué d'une seule cellule et utilisé pour faire du pain ou de la bière par exemple. Les biologistes s'intéressent surtout à cette levure en tant que « modèle » pour comprendre comment fonctionnent les cellules humaines. Les levures ont beaucoup moins de gènes que les cellules humaines et se multiplient rapidement et facilement. Bien que le dernier ancêtre commun des hommes et des levures ait vécu il y a environ un milliard d'années, l'évolution conserve de nombreux caractères, de sorte que l'on peut considérer que ce qui est vrai pour une levure l'est aussi pour une cellule humaine.

Adam a étudié les enzymes, des protéines qui catalysent, c'est-à-dire favorisent et accélèrent, des réactions biochimiques particulières : comment la levure les utilise-t-elle pour se multiplier et produire des déchets à partir de son milieu de culture ? Bien que les scientifiques étudient ces mécanismes depuis plus de 150 ans, ils n'en comprennent pas tous les détails. Ils connaissent de nombreuses enzymes produites par la levure, mais dans certains cas, ils ignorent les gènes qui les codent. Adam a pour objectif de découvrir ces gènes.

Pour faire des découvertes, Adam doit disposer d'importantes connaissances scientifiques. Nous avons programmé Adam avec un bagage approfondi de données sur le métabolisme et la génomique fonctionnelle des levures. Certains disent qu'Adam détient des informations plutôt qu'il n'a des « connaissances ». Le débat philosophique est ouvert. Mais nous pensons que le terme de connaissances est justifié, parce qu'Adam les utilise pour raisonner et guider ses interactions avec l'environnement.

La logique permet à Adam de représenter ses connaissances. Elle a été inventée il y a 2 400 ans pour décrire la connaissance

avec plus de précisions que ne le permet le langage. La logique est la façon la plus juste de représenter les données scientifiques et d'en échanger entre robots et êtres humains. De façon pratique, en intelligence artificielle, la logique peut aussi être un langage de programmation, ce qui permet aux connaissances d'Adam d'être interprétées comme un logiciel informatique.

Lui fournir des connaissances

Pour lancer les recherches d'Adam, nous l'avons programmé avec de nombreuses données. Par exemple, chez *S. cerevisiae*, le gène *ARO3* code une enzyme nommée 3-deoxy-D-arabino-heptulosonate-7-phosphate (DAHP) synthase. Nous avons également fourni à Adam des données liées, par exemple que cette enzyme catalyse une réaction chimique transformant les composés phosphoénolpyruvate et D-érythrose 4-phosphate en 2-dehydro-3-deoxy-D-arabino-heptonate 7-phosphate et phosphate.

Ces faits forment un modèle du métabolisme de la levure, qui comprend des connaissances sur les gènes, les enzymes et les métabolites (de petites molécules

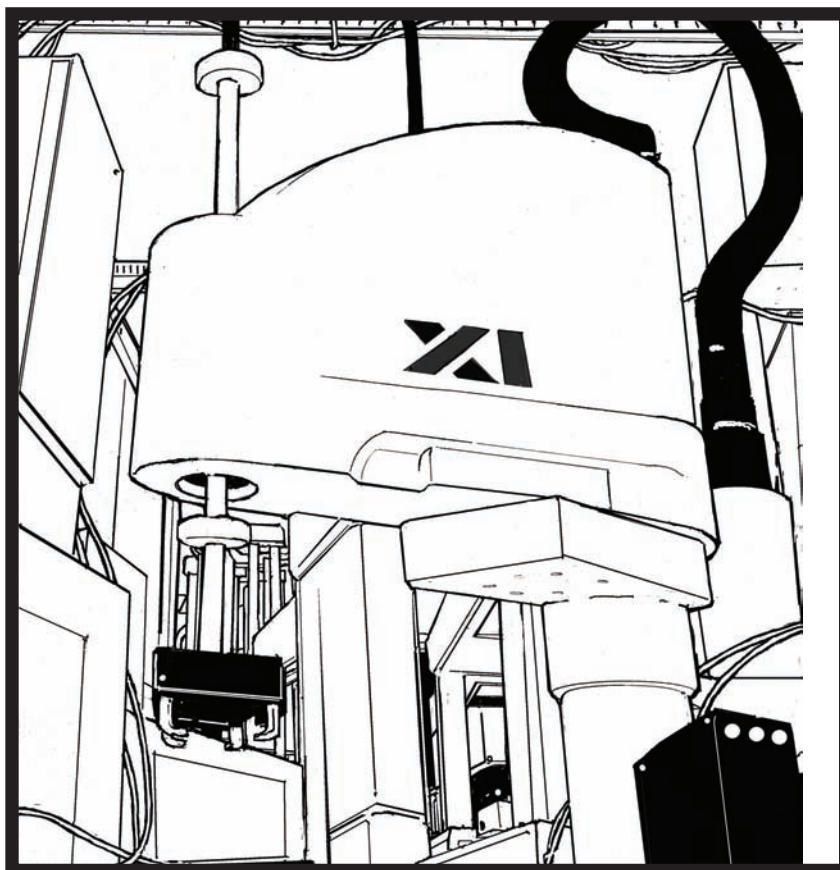
L'ESSENTIEL

✓ La conception et la réalisation de certaines expériences scientifiques exigent beaucoup de travail humain.

✓ Un robot prototype, nommé Adam, émet des hypothèses sur les gènes de levure et leurs fonctions, conçoit des expériences et les réalise.

✓ Avec l'intelligence artificielle et l'équipement robotique, Adam a découvert trois gènes particuliers de levure.

✓ L'intervention de l'homme est nécessaire au fonctionnement d'Adam, mais, ensemble, les hommes et les machines obtiendraient davantage de résultats.



David Johnson

produites par le métabolisme). À l'inverse d'une encyclopédie, ce modèle est converti en un logiciel qui peut agir sur les données pour faire des prédictions. Un robot scientifique peut alors combiner des modèles scientifiques abstraits avec la robotique de laboratoire pour tester et améliorer automatiquement les modèles.

Quand les chercheurs travaillent, ils formulent des hypothèses, puis les testent expérimentalement. De même, Adam émet des hypothèses nouvelles concernant la biologie de la levure, puis il en déduit les conséquences avec son modèle de métabolisme. Il réalise ensuite des expériences pour voir si les hypothèses concordent avec les observations.

D'abord, Adam a prédit quels gènes pouvaient coder les enzymes. La formulation de telles hypothèses met en jeu différentes capacités de raisonnement (voir l'encadré page 72). Pour ne retenir que les hypothèses les plus vraisemblables, Adam a utilisé ses connaissances. Par exemple, il connaissait une enzyme, la 2-aminoadipate transaminase, dont on ignorait le gène. Cette enzyme catalyse la réaction du 2-oxoadipate avec le L-glutamate pour donner le L-2-aminoadipate et le 2-oxoglutarate (la réaction inverse peut aussi avoir lieu). Ce composé participe à la multiplication des levures ; cette réaction est importante, car elle est une cible potentielle des médicaments antifongiques.

Poser des hypothèses

Pour formuler une hypothèse, à savoir quel gène de la levure pourrait coder cette enzyme, Adam a interrogé sa base de données pour trouver des gènes d'autres organismes qui codent cette enzyme. Ainsi, chez *Rattus norvegicus* (le rat brun ou rat d'égout), un gène nommé *Aadat* code l'enzyme.

Adam a examiné la séquence d'acides aminés de l'enzyme codée par le gène *Aadat* et a cherché une séquence similaire codée par le génome de la levure. Adam sait que si des séquences d'acides aminés se ressemblent, il est raisonnable d'en déduire qu'elles sont « homologues », c'est-à-dire qu'elles partagent un ancêtre commun. Adam sait aussi que si des séquences sont homologues, alors la fonction de leur ancêtre commun a pu être conservée. Par conséquent, à partir de séquences d'acides aminés similaires, Adam peut conclure que les gènes

correspondants peuvent avoir la même fonction. Adam a trouvé trois gènes de levure ayant des séquences semblables à celle d'*Aadat* : *YER152c*, *YJL060w* et *YJL202w*. Il a supposé que chaque gène code l'enzyme 2-aminoadipate transaminase.

Pour tester ses hypothèses, Adam a utilisé les souches de levure de sa collection, conservées dans son congélateur, où chaque souche a un gène qui lui a été retiré. Le robot a examiné dans des conditions particulières la croissance de trois souches de levure, auxquelles il manquait

LE PROCESSUS PERMETTANT À ADAM de faire des hypothèses et de confirmer expérimentalement les connaissances nouvelles ne nécessite pas d'intervention humaine.

respectivement les gènes *YER152c*, *YJL060w* et *YJL202w* ; il les a fait pousser avec des substances chimiques qui participent à la réaction catalysée par l'enzyme.

L'étape suivante serait de faire de multiples expériences avec chaque souche. Les financements de la recherche sont toujours limités, et les scientifiques font souvent la course pour être les premiers à résoudre un problème. Nous avons donc configuré Adam de façon à ce qu'il mette au point des expériences efficaces testant les hypothèses rapidement et à moindre coût. Ainsi, Adam suppose que chaque hypothèse a une certaine probabilité d'être vraie.

Cette supposition est controversée, et certains philosophes, tel l'Autrichien Karl Popper, ont rejeté l'idée que des hypothèses puissent avoir des probabilités associées. Toutefois, la plupart des chercheurs supposent tacitement que certaines hypothèses ont plus de chances d'être vérifiées que d'autres. Par exemple, ils se rangent souvent derrière l'idée du « rasoir d'Occam » : toutes choses égales par ailleurs, une hypothèse simple est plus probable qu'une hypothèse plus complexe. Adam prend également en compte le coût des expériences, que nous définissons comme le prix des produits chimiques utilisés. Une approche plus exacte considérerait aussi le « coût » du temps nécessaire.

Étant donné un ensemble d'hypothèses associées à des probabilités et un ensemble d'expériences ayant un coût, le but que nous avons fixé à Adam est de choisir une série d'expériences qui minimise le coût et élimine toutes les hypothèses

excepté une. Suivre cette approche de façon optimale est difficile à programmer, mais nos analyses ont montré que le choix réalisé par Adam sélectionne des expériences qui résolvent les problèmes plus rapidement et pour un meilleur coût que les autres choix possibles ; par exemple, il met en œuvre l'expérience la moins chère. Dans certains cas, Adam peut concevoir une seule expérience qui vérifie de nombreuses hypothèses. Les êtres humains ont du mal à en faire autant : ils ne considèrent en général qu'une hypothèse à la fois.

Quand le système d'intelligence artificielle d'Adam a déterminé les expériences les plus prometteuses, il utilise ses équipements robotiques pour les réaliser et observer les résultats. Adam n'est pas capable de voir directement les gènes

ou les enzymes ; il mesure quelle quantité de lumière traverse les cultures de levure. Avec ces données, Adam met en œuvre une chaîne de raisonnements compliquée qui lui permet de savoir si oui ou non les indices s'accordent avec les hypothèses sur les gènes et les enzymes. Ces chaînes de raisonnement existent souvent en science ; par exemple, les astronomes déduisent ce qui se passe dans des galaxies lointaines à partir du rayonnement qu'ils observent avec leurs instruments.

Faire des découvertes

Adam a produit et confirmé expérimentalement 20 hypothèses suggérant quels gènes codent des enzymes de la levure. Comme toute découverte scientifique, celles d'Adam devaient être confirmées. Nous avons donc vérifié les conclusions d'Adam avec d'autres sources d'information qui ne lui étaient pas accessibles et de nouvelles expériences que nous avons réalisées nous-mêmes. Sept des conclusions d'Adam étaient connues, une semblait fautive, et 12 constituaient des nouveautés scientifiques.

En vérifiant ces résultats, nous avons confirmé que trois gènes (*YER152c*, *YJL060w* et *YJL202w*) codent l'enzyme 2-aminoadipate transaminase. Pourquoi nul n'avait découvert la fonction de ces gènes auparavant ? Parce que ces trois gènes codent la même enzyme, et celle-ci peut catalyser différentes réactions ; nous n'avions pas affaire à une simple correspondance entre un gène et une fonction enzymatique (le scénario classique). Les expériences et

UN ROBOT QUI FAIT DE LA BIOLOGIE

Adam est un robot scientifique créé à l'Université d'Aberystwyth, au pays de Galles. Il étudie les gènes et leurs fonctions. Récemment, son système d'intelligence artificielle a formulé 20 nouvelles hypothèses portant sur les gènes de la levure susceptibles de coder des enzymes indispensables à sa multiplication. Puis Adam a réalisé des milliers d'expériences pour déterminer quelles hypothèses étaient justes ou fausses. Voici comment il a procédé.

1 Préparation des échantillons

Les bras du robot récupèrent des souches de levure congelées et les placent dans différents puits de plaques de culture qui contiennent un liquide nécessaire à leur développement – un milieu de culture (voir le cartouche en haut).

2 Croissance des levures

L'incubateur chauffe les plaques pendant 24 heures. Toutes les 40 minutes, un bras du robot installe chaque plaque de culture dans un lecteur optique qui contrôle la multiplication des levures (voir le cartouche en bas).

3 Séparation des cellules

Une centrifugeuse fait tourner chaque plaque pour séparer la levure de son milieu de culture.

Congélateur

Incubateur

Lecteur optique

Élimination des déchets

4 Élimination du milieu

Des lavages successifs éliminent la totalité du milieu de culture et les levures sont mises en suspension dans une solution saline.

5 Traitement des levures

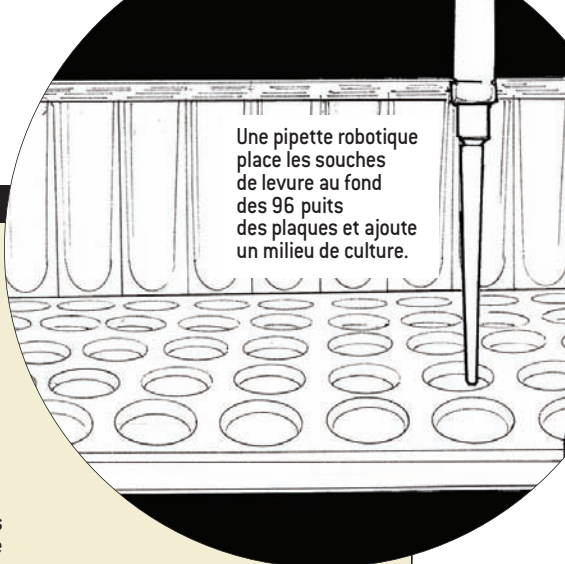
Pour tester différentes hypothèses, le robot ajoute aux levures diverses combinaisons de milieux de culture et de molécules qui pourraient modifier leur métabolisme.

6 Lecture des résultats

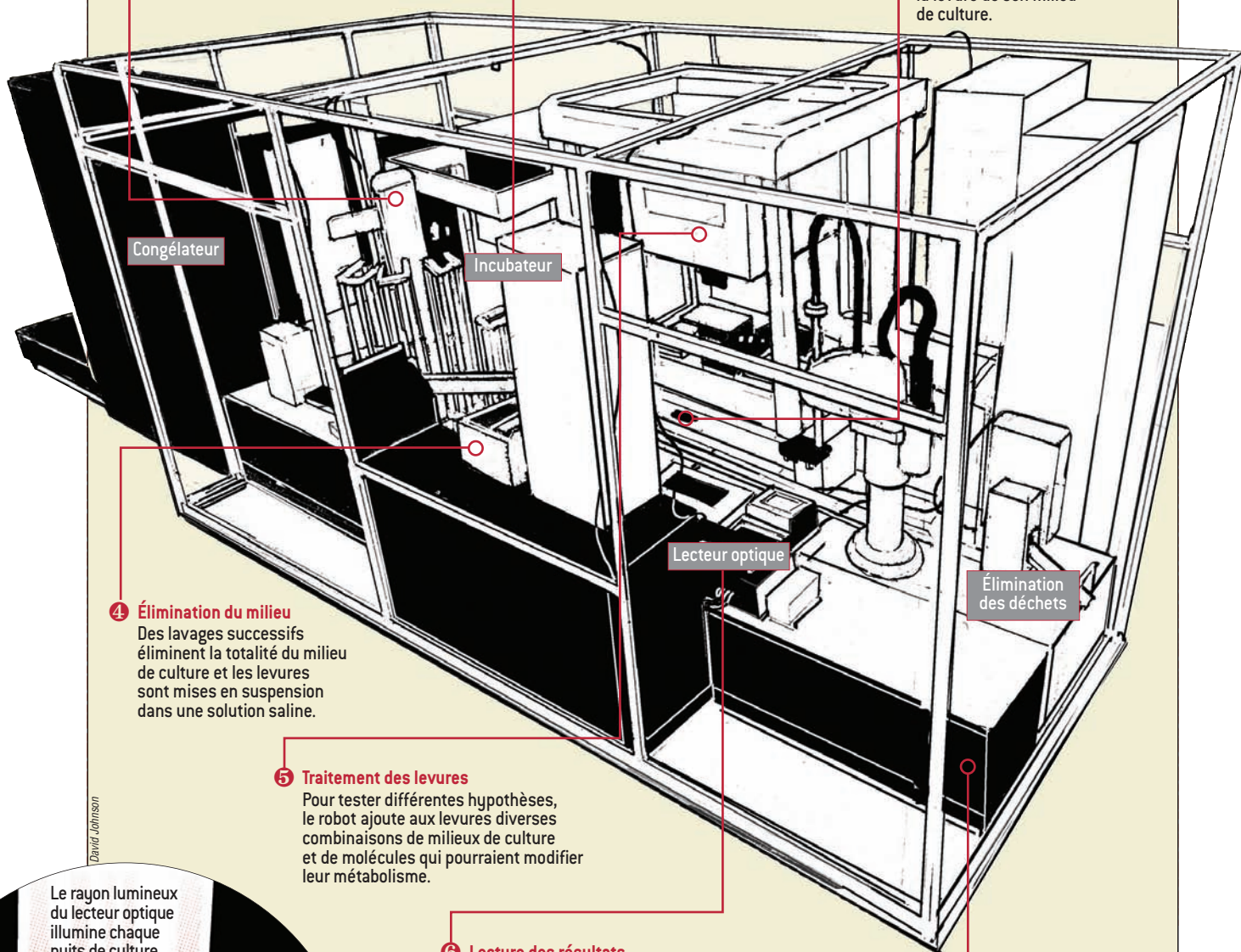
Les plaques restent dans l'incubateur plusieurs jours. Toutes les 20 minutes, un bras robotisé place les plaques dans le lecteur optique qui envoie les données de croissance des levures à un ordinateur.

7 Analyse des données

Les logiciels d'Adam analysent les résultats, ce qui peut prendre plusieurs heures.

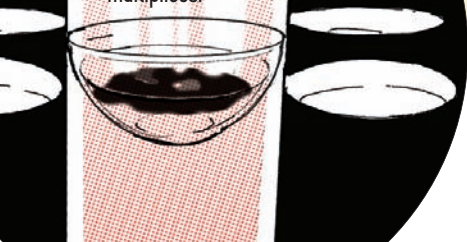


Une pipette robotique place les souches de levure au fond des 96 puits des plaques et ajoute un milieu de culture.



David Johnson

Le rayon lumineux du lecteur optique illumine chaque puits de culture. L'intensité lumineuse qui traverse le puits mesure de combien les levures se sont multipliées.



Un robot scientifique utilise les mêmes alternatives que les hommes pour raisonner. L'une d'elles est la déduction logique (ou l'inférence déductive), qui représente le fondement des mathématiques et de l'informatique. La déduction logique est « fiable ». En d'autres termes, si vous avez pour point de départ une proposition vraie, vous ne pouvez déduire que de nouvelles vérités. Mais en l'absence d'une « théorie du tout », la déduction est insuffisante en science, parce qu'elle ne fournit que les conséquences de ce qui est déjà connu.

La deuxième alternative, l'abduction, n'est pas fiable,

comme le montre l'exemple du cygne ci-dessous : de nombreuses choses sont blanches sans être des cygnes. Cependant, l'abduction permet de produire des hypothèses qui ont une chance d'être vraies. En science, la vérité ne se décide pas par pure déduction à partir de suppositions, mais par l'expérimentation sur le monde réel. Si Adam émet l'hypothèse que Daisy est un cygne, le seul moyen pour Adam de vérifier si cette proposition est vraie consiste à attraper Daisy et à déterminer si c'est un cygne, un canard ou autre chose.

L'induction, comme l'abduction, permet d'avancer des

hypothèses nouvelles. Si tous les cygnes que nous voyons sont blancs, il est naturel d'en déduire, comme l'a fait Aristote, que tous les cygnes sont blancs. Mais l'induction n'est pas fiable, et l'induction de Aristote a été réfutée par la découverte de cygnes noirs en Australie. Nous utilisons tous les jours l'induction. Elle nous rassure sur le fait que le Soleil se lèvera demain et que notre petit déjeuner ne nous empoisonnera pas. Mais le rôle de l'induction en science est controversé, parce que la principale justification de l'induction est qu'en général elle fonctionne, ce qui est, en soi, une induction.

Déduction



Tous les cygnes sont blancs.



Daisy est un cygne.

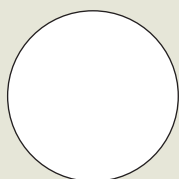


Par conséquent, Daisy est blanche.

Abduction



Tous les cygnes sont blancs.



Daisy est blanche.



Par conséquent, Daisy est un cygne.

Induction



Daisy est un cygne, et blanche.



Danny est un cygne, et blanc.



Dante est un cygne, et blanc (et ainsi de suite...)



Par conséquent, tous les cygnes sont blancs.

Comme les êtres humains, les robots peuvent utiliser diverses méthodes de raisonnement. Ces méthodes peuvent être fiables ou non, mais elles permettent de formuler des hypothèses et de suggérer des expériences, qui peuvent être réalisées pour tester ces hypothèses.

l'analyse statistique d'Adam étaient nécessaires pour résoudre ce problème.

Certaines personnes contestent l'utilisation du terme *robot scientifique* en faisant remarquer, ce qui se défend, qu'Adam ressemble davantage à un assistant qu'à un scientifique. Est-il alors légitime de prétendre qu'Adam a découvert de façon autonome des connaissances scientifiques nouvelles ?

Le robot est-il un scientifique ?

Commençons par le terme *autonome*. Nous ne nous contentons pas seulement d'installer et de régler Adam, puis de revenir quelques semaines plus tard pour voir ses conclusions. Adam est un prototype : son matériel et ses logiciels ont souvent des défaillances, ce qui nécessite l'intervention d'un technicien. Nous devons aussi améliorer ses logiciels. Cependant, le processus permettant à Adam d'émettre des hypothèses et de confirmer expérimentalement les connaissances nouvelles ne nécessite pas d'intervention humaine.

Le terme *a découvert* soulève une discussion datant du milieu du XIX^e siècle, avec lady Ada Lovelace. Fille du poète anglais lord Byron, elle était la collaboratrice de Charles Babbage, la première personne à concevoir une véritable machine à calculer. Certains la considèrent comme la première programmeuse. L'argument de lady Lovelace était le suivant : « La machine analytique n'a nullement la prétention de créer quelque chose par elle-même. Elle peut faire tout ce que nous saurons lui ordonner d'exécuter. » Cent ans plus tard, l'informaticien Alan Turing a proposé un contre-argument sous forme d'analogie avec les enfants. De même que les professeurs ne se voient pas attribuer (tout) le mérite des découvertes de leurs élèves, il serait injuste que les hommes revendiquent tout le mérite des idées de leurs machines. Ces arguments ont une importance commerciale croissante ; par exemple, aux États-Unis, la loi des brevets stipule que seule une « personne » peut « inventer » quelque chose.

Enfin, dans quelle mesure peut-on dire qu'Adam découvre des connaissances scientifiques nouvelles ? Certaines des correspondances entre gènes et fonctions enzymatiques de *S. cerevisiae*, dont Adam a fait l'hypothèse et qu'il a expérimentalement vérifiées, sont nouvelles. Bien que ces connaissances soient modestes, elles ne sont

pas triviales. Dans le cas de l'enzyme 2-aminoacide transaminase, Adam a trouvé trois gènes distincts qui pourraient résoudre une énigme vieille de 50 ans. Une partie des conclusions d'Adam pourrait être fautive, toute connaissance scientifique étant provisoire. Cependant, il est peu probable que toutes ses conclusions soient fausses. Cela fait maintenant deux ans que les résultats d'Adam sont dans le domaine public, et personne n'a signalé d'erreur. À ma connaissance, les scientifiques d'autres groupes n'ont pas encore essayé de reproduire les résultats d'Adam.

Adam, puis Ève

Une autre façon d'évaluer si Adam est un scientifique est de voir si l'approche d'Adam pour produire des hypothèses nouvelles est généralisable. Une fois les expériences d'Adam lancées, nous avons développé un deuxième robot. Ève applique les mêmes cycles automatisés de recherche au criblage et à la conception de nouvelles molécules biologiquement actives, une activité médicale et commerciale importante. Les leçons que nous avons tirées de la conception

d'Adam font d'Ève un système plus élégant. Les recherches d'Ève concernent le paludisme, la schistosomiase (la deuxième maladie parasitaire après le paludisme dans le monde), la maladie du sommeil et la maladie de Chagas. Nous n'avons pas terminé la mise au point des logiciels d'Ève, mais le robot a déjà trouvé des composés intéressants pour la lutte contre le paludisme.

D'autres scientifiques développent des robots semblables. Hod Lipson, de l'Université Cornell aux États-Unis, tente d'améliorer la conception de la robotique mobile et de comprendre les systèmes dynamiques. Et certains chercheurs essaient de créer des robots scientifiques dans les domaines de la chimie, de la biologie et de l'ingénierie.

En outre, plusieurs équipes, dont la mienne, veulent automatiser la recherche en physique quantique, en particulier le contrôle des processus quantiques. Par exemple, Herschel Rabitz, de l'Université de Princeton, cherche à utiliser des lasers femtoseconde (10^{-15} seconde) pour créer ou briser des liaisons chimiques.

Si nous acceptons que les robots puissent être des scientifiques, nous aimerions

L'AUTEUR



Ross KING est professeur d'informatique à l'Université d'Aberystwyth, au pays de Galles, au Royaume-Uni.

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

Détails sur www.jardindesplantes.net, dans "l'agenda du jardin"

CONFÉRENCES

Lundi 31 octobre - 18h Cycle « La chimie au Muséum »
La chimie de la mer (M.-L. Bourguet-Kondracki)

FILMS

Reprise du palmarès du Festival International du Film documentaire Océanien 2011

Lundi 3 octobre - 18h
Contact (Grand Prix 2011)
Réal. : B. Dean et M. Butler, Australie, 2009, docu., 78', VOSTFR

Samedi 22 octobre - 15h30
Lucien Kimitete, un homme de la terre des hommes
(Prix du public 2011) Réal. : D. Agniel, Polynésie française, 2010, docu., 52'

MÉTIER DU MUSÉUM

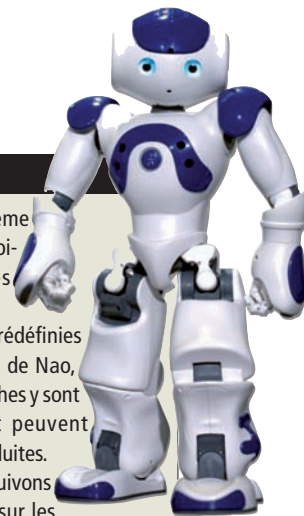
Dimanche 30 octobre - 15h **Chimiste** - D. Buisson et Ch. Bailly

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution
36 rue Geoffroy Saint-Hilaire, Paris 5^e
Métro : Gare d'Austerlitz - Jussieu

BAR DES SCIENCES **Dimanche 16 octobre - 15h30**

La Nature, source de médicaments
En lien avec l'Année internationale de la chimie et la Fête de la Science. Intervenants : Sabrina Krief, primatologue, Christian Milet, biologiste, Jian-Sheng Sun, PDG de DNA Therapeutics SA. Animé par Marie-Odile Monchicourt.

Café-restaurant la Baleine
47 rue Cuvier - Paris 5^e - Métro : Jussieu



Outre ces robots machines dont traite Ross King, d'autres robots sont conçus pour assister des personnes dans leur vie quotidienne, qu'elles soient scientifiques ou non. Chaque année, les derniers fleurons de la robotique s'exposent et s'affrontent dans des compétitions internationales. Notre robot Nao a obtenu le quatrième prix à la compétition libre du championnat *Robocup@Home* tenu à Istanbul le 11 juillet 2011. Contrairement à d'autres robots, notre petit humanoïde est capable d'apprendre de nouvelles activités coopératives en temps réel, par exemple aider une personne à ranger des objets, grâce à un système cognitif artificiel inspiré de celui de l'homme.

Une voie aujourd'hui en plein essor dans le domaine de la robotique est le développement des capacités d'apprentissage des robots. Jusqu'alors, la plupart des robots domestiques réalisaient des tâches préprogrammées dans leurs lo-

giciels et leurs réseaux de neurones, mais n'étaient pas capables d'effectuer une nouvelle activité : ils ne savaient simplement pas apprendre à coopérer pour améliorer leur comportement.

C'était le cas du robot Nao, un humanoïde autonome interagissant avec l'homme, développé par la Société française *Aldebaran Robotics* depuis 2005. Nao dispose de nombreux capteurs (optique et auditif par exemple), de sorte qu'il reconnaît des voix et des visages, et réalise des tâches – préprogrammées – quand un homme le lui demande.

En collaboration avec les concepteurs de Nao, nous l'avons équipé d'un système cognitif artificiel reproduisant certaines capacités d'apprentissage du cerveau humain.

Le système nerveux humain analyse et ordonne de nouvelles informations, soit en écoutant, soit en observant une démonstration, et les apprend vite. Les neurobiologistes ont

reproduit ces facultés en donnant au robot la capacité d'apprendre : Nao peut observer une séquence d'actions réalisées par l'homme et analyser la façon dont elles sont coordonnées dans le temps. Si le robot ne connaît pas une action, il la mémorise par interaction directe avec son interlocuteur. Il devient autonome et reproduit la tâche apprise, voire l'adapte selon une nouvelle exigence. Par exemple, il peut apprendre à ouvrir et fermer une boîte, en coordination avec une personne qui range un objet dans la boîte ; et si on le change de pièce, il sait toujours effectuer le rangement dans le nouvel environnement.

Pour ce faire, nous avons intégré à Nao plusieurs systèmes : un système de compréhension du discours ; un système d'apprentissage des tâches coordonnées entre deux personnes, dont ne disposait aucun autre robot et qui permet de suivre une série d'actions en l'observant ou en l'écou-

tant ; et un système qui met en mémoire les nouvelles informations.

Sans être prédéfinies dans les circuits de Nao, les nouvelles tâches y sont mémorisées et peuvent donc être reproduites.

Nous poursuivons nos recherches sur les fondements neurologiques de la compréhension et du sens. Nous espérons construire des systèmes cognitifs artificiels encore plus proches du cerveau humain.

Ces robots interactifs seraient-ils des scientifiques ? Nous pourrions en effet apprendre à Nao à réaliser une expérience de neuropsychologie, comme le fait un chercheur, pour répondre à une hypothèse qu'il aurait formulée.

**Peter Dominey
et Stéphane Lallec**

Institut cellule souche et cerveau,
CNRS, Bron

connaître leurs limites. Pour cela, comparons l'automatisation de la science à celle du jeu d'échecs. L'automatisation des échecs est un problème résolu. Les ordinateurs jouent aux échecs aussi bien, voire mieux, que les meilleurs joueurs humains. Une telle maîtrise des échecs par les ordinateurs est possible parce que le monde des échecs est abstrait et clos : 64 cases, 32 pièces. Les sciences partagent la nature abstraite des échecs, mais l'automatisation des sciences sera plus compliquée, car l'expérimentation se fait dans le monde réel. Je pense néanmoins qu'il sera plus facile de développer des robots scientifiques capables de faire des sciences que des systèmes d'intelligence artificielle qui interagissent socialement avec les êtres humains (*voir l'encadré ci-dessus*). En science, nous pouvons penser que le monde réel n'essaie pas de nous tromper, ce qui n'est pas vrai en société.

Aujourd'hui, les maîtres des échecs améliorent leur jeu en utilisant les ordinateurs pour analyser les positions et préparer les attaques. De même, en travaillant de concert, les hommes et les robots scientifiques devraient arriver à des résultats supérieurs à ce que les uns ou les autres pourraient obtenir séparément. Les progrès de l'informatique et des systèmes d'intelligence

artificielle produiront des robots scientifiques encore plus intelligents. Ces créations seront-elles un jour capables de faire des découvertes remettant en question les paradigmes, ou se limiteront-elles à des investigations scientifiques de routine ? Voilà une question clé de la science de demain.

Les hommes et les robots travaillent ensemble

Certains scientifiques, tel le lauréat du prix Nobel de physique Philip Anderson, pensent que la science qui change les paradigmes se fait à un niveau si élevé qu'elle pourrait ne pas être accessible à l'automatisation. Mais un autre Nobel de physique, Frank Wilczek, a écrit que, dans 100 ans, le meilleur physicien sera une machine. L'avenir nous dira qui a raison.

Quoi qu'il en soit, j'entrevois un futur où des réseaux d'êtres humains et de robots scientifiques travailleront ensemble. La connaissance scientifique sera décrite en utilisant la logique et disséminée aussitôt *via* Internet. Les robots vont jouer un rôle de plus en plus important dans les progrès de la science. ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

R. D. King *et al.*, *The automation of science*, *Science*, vol. 324, pp. 85-89, avril 2009.

R. Carnap, *An Introduction to the Philosophy of Science*, édité par Martin Gardner, Dover, 1995.

J. Lederberg, *How DENDRAL was conceived and born*, *ACM Symposium on the History of Medical Informatics, National Library of Medicine*, novembre 1987.

A. M. Turing, *Computing machinery and intelligence*, *Mind*, vol. LIX, pp. 433-460, octobre 1950.

www.espgg.org

Expositions • Ateliers • Démonstrations • Conférences •
Pédibus des sciences • Librairie • Ciné débats •
Rencontres avec des chercheurs •
Café des sciences • Jeux ...

Scolaires
Du mercredi 12 au
samedi 15 octobre
Réservations sur www.espgg.org

Public
Vendredi 14 et samedi 15 octobre 10h-19h
Dimanche 16 octobre 10h-17h



Quartier Les Curie

Quartier Santé

Quartier Transports et Énergies

Quartier Chimie du vivant

Quartier Forêts

Quartier Numérique

Café des sciences

**Entrée
gratuite**

Quartier des sciences

12 au 16 octobre 2011

ESPCI - 10 rue Vauquelin
Paris 5^e

© l'ideocom - 01 47 53 82 10 - Paris - 09/2011



énergie atomique • énergies alternatives

