

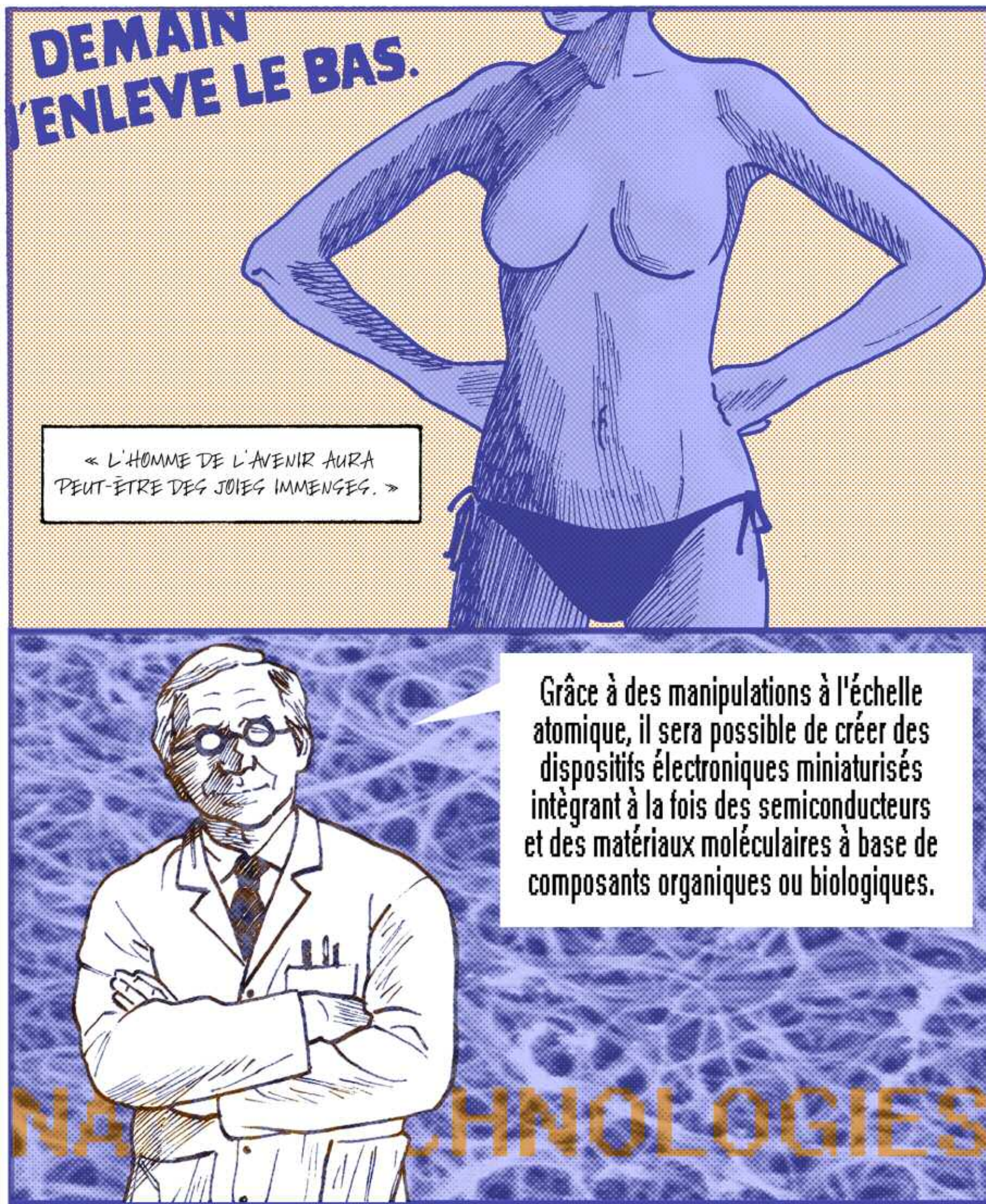
Retour sur le futur 6. NANO GÉNÉRATION

Michel Alberganti

En 2035, des usines fonctionneront à l'échelle du nanomètre, c'est-à-dire du milliardième de mètre, réalisant le vieux rêve de l'homme : créer de la matière à partir de ses composants élémentaires, les atomes.

Cet article de science-fiction n'est pas né de l'imaginaire. Il projette dans un futur proche les tendances et programmes déjà lancés en 2005.

Illustrations : Philippe Squarzoni



C'EST incroyable... Incroyable... » L'œil rivé à son nanoscope 3D, Lee Whang ne peut s'empêcher de répéter inlassablement ce mot. En ce 7 août 2035, la scène qui le rend à la fois fébrile, incrédule et émerveillé mérite à l'évidence un tel qualificatif. Il est 2 heures du matin. Lee est seul. Le laboratoire des nanosciences de l'université de Shanghai est désert en cette période estivale. Tous ses collègues sont partis en vacances. Lee n'a pu s'y résoudre. Une sorte de pressentiment... Impossible de détourner le regard de la scène. Tremblant, le chercheur déplace lentement la pointe de son instrument. « Incroyable... » Ce qu'il observe n'est autre qu'une usine fonctionnant à l'échelle du nanomètre, c'est-à-dire du

inaccessible et qui reste, pour l'homme « *infiniment éloigné de comprendre les extrêmes* », aussi inconcevable aujourd'hui que l'immensité de l'Univers pour Pascal. Si le XX^e siècle a inauguré la conquête spatiale, la première partie du XXI^e ouvre les portes du nanomonde. D'abord avec la génétique, qui décrypte les codes du vivant depuis la publication, en 2001, du brouillon du séquençage du génome humain. Ensuite avec les systèmes micro-électromécaniques (MEMS) et le génie moléculaire. La réunion de ces techniques amorce une révolution industrielle d'une ampleur comparable à celle qu'a engendrée la maîtrise de l'électricité à partir de la fin du XIX^e siècle. Alors que l'homme a dû se contenter, pendant des millénaires, d'exploiter l'extraordinaire

richesse des ressources naturelles, il est en passe de pouvoir les créer à partir de leurs composantes élémentaires. Avec les nanotechnologies, on peut, en théorie, faire un vrai diamant en manipulant directement des atomes de carbone. Ou, à l'inverse, décomposer des déchets jusqu'au niveau de leurs constituants : carbone, hydrogène, oxygène, etc. Son vieux rêve démiurgique prend corps. Lee en est l'un des premiers témoins.

Sous les yeux du scientifique, un embryon d'atelier moléculaire fonctionne en silence. Il observe la première installation nanométrique de production d'hydrogène à partir de méthane. Sur l'écran de l'ordinateur de contrôle, la quantité d'atomes d'hydrogène produite augmente régulièrement. Bien sûr, le compteur n'indique qu'un nombre de molécules (ensemble d'atomes) qui peut paraître infime... Mais le principe qui les fournit est unique.

Une bactérie exploitée par des nanomachines et des nanorobots extrait le précieux hydrogène à partir de clathrates, ces hydrates de gaz dont d'immenses gisements ont été découverts dans le sol gelé des zones polaires et au fond des mers. Au centre du dispositif, sept bactéries artificielles *Mycoplasma genitalium*, dont le génome a été modifié et même entièrement reconstruit pour qu'elles produisent des atomes d'hydrogène à partir du méthane.

Cette création biologique renvoie les OGM au rang de bricolage d'amateurs. Tout a commencé en 2002, lorsque l'Institute for Biological Energy Alternatives (IBEA) a obtenu une subvention de 3 millions de dollars du ministère américain de l'énergie. L'institut a été fondé par le biologiste Craig Venter, l'ancien directeur de Celera Genomics - qu'il quittera en janvier 2002 -, rendu célèbre par la publication, en février 2001, de la séquence du génome humain.

Longtemps, *Mycoplasma genitalium* n'était restée associée qu'aux inflammations de l'urètre qu'elle provoque chez l'homme. Jusqu'à ce que les chercheurs remarquent son très faible nombre de gènes. Pas plus de 517 (contre environ 34 000 pour l'homme). C'était donc l'organisme simplifié idéal pour les expériences de déconstruction et de reconstruction du chromosome. Les chercheurs estimaient que 265 à 350 gènes pourraient être suffisants pour maintenir cet organisme en vie. Tout en reconnaissant ignorer la fonction d'un tiers de ce patrimoine minimal.

Leur projet visait à extraire le matériel génétique de la cellule, à créer un chromosome artificiel avec les gènes sélectionnés et à le réintroduire dans la bactérie afin de tester ses nouvelles caractéristiques. Il devenait ainsi possible de supprimer certaines capacités indésirables, comme l'adhérence aux cellules humaines de *Mycoplasma genitalium* - prévenant ainsi tout risque d'infection en cas de dissémination accidentelle.

En revanche, on pouvait espérer développer des aptitudes comme la production d'hydrogène. « *Nous pensons que la création d'un chromosome synthétique constitue une étape importante vers la réalisation de nos objectifs car elle permettrait de fabriquer un organisme possédant des qualités idéales pour commencer à traiter nos problèmes énergétiques* », déclarait Craig Venter, alors président de l'IBEA. Mais il restait un long chemin à parcourir. Lee est fasciné par le résultat de plus de trente ans de travail acharné. *Mycoplasma genitalium*, ou plutôt ce qu'est devenue la bactérie et qui n'a plus grand-chose de commun avec son ancêtre génétique, est aujourd'hui capable de se nourrir de méthane et de rejeter de l'hydrogène. Un précieux excrément... Grâce à de multiples interventions sur son ADN, l'organisme est désormais génétiquement programmé pour ingurgiter le méthane et l'eau qui constituent la structure des clathrates. Mais encore faut-il que les déjections de *Mycoplasma* ne se perdent pas. Cela revient à récupérer les atomes d'hydrogène un peu comme l'on recueille le lait lors de la traite des vaches.

L'équipe de l'université de Shanghai dans laquelle travaille Lee s'est attelée à cette tâche en 2025. Après des études spécialisées en nanobiologie, Lee est revenu dans sa ville natale pour intégrer le laboratoire du professeur Mike Goo, un chercheur américain attiré à grands frais en Chine. A 45 ans, le biomécanicien est l'une des stars mondiales de la fabrication des moteurs biomoléculaires.

Au cours de sa jeunesse, dans les années 2010, il a repris les travaux publiés en 2000 par Carlo Montemagno. Alors directeur de recherches à l'université Cornell (Ithaca), le chercheur avait été l'un des premiers à rompre avec la voie initiale des nanotechnologies, celle de la miniaturisation. Cette voie avait permis de fabriquer certains composants mécaniques, comme des roues dentées de quelques microns de diamètre, grâce aux techniques de lithographie et de bombardement ionique sous vide - héritées de l'industrie microélectronique.

Pour passer à l'échelle nanométrique, Carlo Montemagno avait compris qu'il fallait inverser le processus. Construire au lieu de réduire. Cet ingénieur de formation avait fait sensation en réalisant un moteur moléculaire, baptisé F1-ATPase, exploitant les propriétés d'une enzyme, l'adénosine triphosphate (ATP) synthase.

Ce mécanisme biochimique met en mouvement une molécule, utilisée comme rotor, à la vitesse de quelques tours par seconde. Le rendement d'un tel « moteur », alimenté par des protons (ions H⁺), approche les 100 %. Une performance remarquable qui s'explique par le fait que le processus exploité échappe au fameux cycle de Carnot - qui limite le rendement des moteurs thermiques aux alentours de 40 %, dans le meilleur des cas.

Conscient de l'inutilité de réinventer la roue, les chercheurs ont rapidement admis qu'il fallait chercher dans la mécanique biomoléculaire les sources de mouvement dont ils avaient besoin. Mike Goo fut, dans les années 2020, l'un des plus prolifiques chercheurs dans ce domaine, découvrant des dizaines de protéines et d'enzymes capables d'engendrer différents mouvements, de translation ou de rotation. Parallèlement, la modification des génomes de toute une gamme de bactéries permet de fabriquer les fixations de ces organismes reprogrammés sur des supports comme le verre ou le silicium.

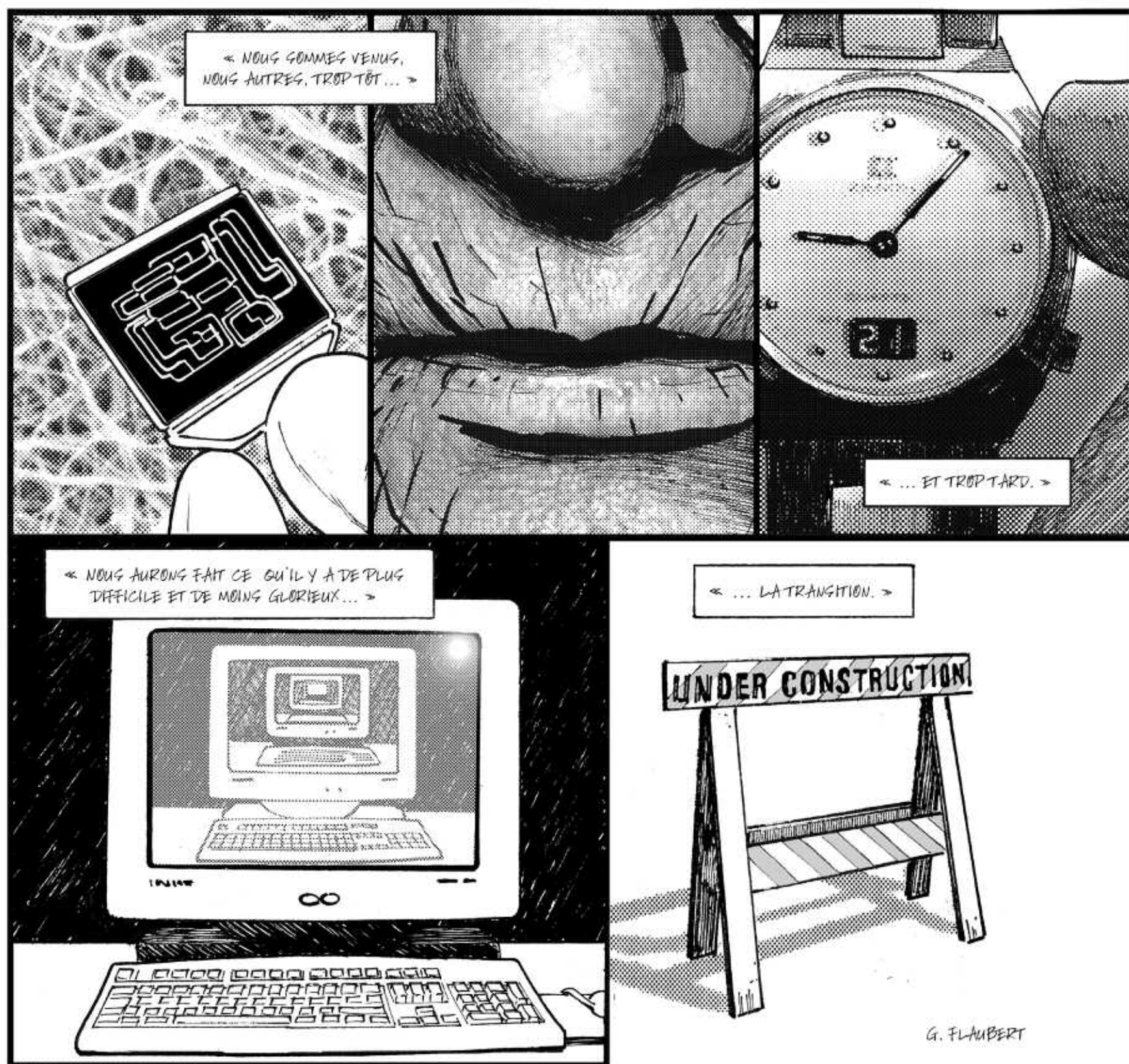
Peu à peu, une subtile répartition des rôles entre matériaux inertes et cellules vivantes a fourni à la nano-ingénierie une palette d'outils entièrement nouveaux. Aux matières inertes sont revenues les tâches purement mécaniques : simples bras manipulateurs d'un micron d'amplitude, trémies, tapis transporteurs, systèmes d'alimentation en atomes, cuves de préparation chimique, magasins de stockage...

Les cellules vivantes, elles, ont été affectées à la motorisation et aux procédés de production. Elles assurent ainsi bien plus de tâches que l'homme dans une usine d'automobiles, par exemple. Lee, en repensant aux vieux rêves des années 1980 d'ateliers entièrement robotisés, ne peut s'empêcher de voir là une revanche du vivant sur l'inerte... Désormais, les nanorobots sont pilotés non plus par un logiciel mais par une bactérie reprogrammée...

En fait, c'est paradoxalement la réalisation de l'outillage inerte qui s'est heurtée aux problèmes les plus épineux. À l'échelle nanométrique, toutes les lois de la physique sont modifiées. Plus rien ne fonctionne de la même façon, et les chercheurs et ingénieurs ont dû explorer une à une les règles de ce nouveau monde. Créer des matériaux inédits en réassemblant des atomes se heurte à leur caractère « collant ». Sans parler de perturbations quantiques qui ôtent aux manipulations atomiques toute ressemblance avec un confortable jeu de Lego.

Les alchimistes des atomes ont également dû admettre que la maîtrise des liaisons chimiques, c'est-à-dire leur rupture et leur reconstruction, consomme une quantité importante d'énergie qui pèse sur l'économie de l'opération. Ainsi, les nanomatériaux, qui avaient tant fait rêver les pionniers à la fin du XX^e siècle, restent-ils pour l'instant moins nombreux que prévu. Tout au plus servent-ils de support, d'armature et de structure à l'atelier moléculaire.

Face aux innombrables pièges de l'exploration du nanomonde, les ingénieurs ont rapidement admis que les combinaisons générées par la nature présentaient l'avantage inestimable de l'expérience. Des millénaires d'évolution ont façonné le fonctionnement des cellules vivantes. Il ne reste souvent qu'à les détourner légèrement de leurs objectifs naturels pour qu'elles deviennent de précieux auxiliaires. Protéines, enzymes et bactéries se trouvent ainsi au cœur des machines-outils moléculaires conçues par Mike Goo.



Sous les yeux de Lee, l'usine nanométrique continue à produire de l'hydrogène. Les moteurs moléculaires actionnent les pompes qui acheminent le méthane issu des clathrates jusqu'aux sept bactéries *Mycoplasma genitalium*. L'hydrogène synthétisé est aspiré à travers des nanotubes de carbone avant d'être enfermé dans des nanocapsules par des nanorobots obturateurs.

Il suffit alors de prendre livraison de cette production qui permettra d'alimenter aussi bien les piles à combustibles des voitures électriques que les conteneurs nécessaires à la survie des astronautes qui explorent Mars. Une telle production d'hydrogène peut devenir la source d'énergie des prochains siècles, tant les réserves de méthane enfermées dans les clathrates sont immenses.

Ensuite, il faudra trouver des bactéries capables de réaliser la même opération à partir des molécules d'eau (H₂O), en les décomposant en 2 atomes d'hydrogène et un d'oxygène, une voie déjà explorée par de nombreux laboratoires dans le monde.

Lee ne quitte pas des yeux le chronomètre qu'il a déclenché dès que l'installation s'est mise à fonctionner. Dix minutes... Record battu. Jusqu'à présent, l'équipe n'avait jamais réussi à dépasser les six minutes de production. Les bactéries commençaient alors à hoqueter avant de s'arrêter d'absorber le méthane. A chaque échec, Mike Goo remettait le chromosome de *Mycoplasma genitalium* sur le métier. Malgré la faible quantité de gènes, le nombre de combinaisons est immense, et, surtout, des zones d'ombre subsistent.

Lee, de son côté, avait eu l'idée d'explorer d'autres paramètres. En particulier ceux des flux amont et aval de méthane et d'hydrogène. Ces flux sont pilotés par les nanorobots de régulation et des biocapteurs de pression et de débit. Pour Lee, le problème pouvait venir de l'action de ces « organismes-robots » conçus, eux aussi, à l'aide de bactéries modifiées greffées sur des biopompes. Il s'agit en fait des cerveaux de l'atelier, dont l'action régule l'ensemble du processus. Une pression trop faible ou trop forte pouvait perturber *Mycoplasma genitalium*... Mike Goo ne croyait guère à cette piste.

Lee a donc profité de son absence pour vérifier ses hypothèses. Vingt minutes... D'un revers de main, il essuie la sueur qui perle sur son front. Il ne peut détacher son regard de la scène. Peu à peu, les nanocapsules remplies

se multiplient sous l'action des trois nanorobots obturateurs et sont évacuées vers l'aire de stockage gravée dans le silicium qui sert de plancher à l'atelier.

Lee observe maintenant l'opération de mise en bombonnes nanoscopiques. Ces nanorobots bioniques sont les seuls de la chaîne de production à exercer une action mécanique. Mike Goo les a conçus lui-même entièrement à partir de matériau purement organique. Une nanopince est actionnée grâce à une enzyme afin d'appliquer la pression nécessaire à l'obturation.

En les voyant agir ainsi, Lee ne peut s'empêcher de penser aux prédictions formulées par Eric Drexler il y a près de cinquante ans. En 1986, il avait prédit comme inéluctable l'autoréplication des nanorobots. Une perspective qui alimente, depuis, les mouvements anti-nanotechnologies. Lee se rend compte que l'acharnement des chercheurs à faire fonctionner des usines nanoscopiques, sous la pression de l'industrie et des partis politiques qui craignent la crise de la fin du pétrole, les pousse à prendre des risques.

Des nanobiorobots se nourrissant d'une substance très répandue sur Terre capables de s'autoreproduire engendreraient un risque d'invasion majeure. Machinalement, pour se rassurer, Lee recompte le nombre de nanorobots obturateurs. Ils sont désormais cinq...

PHILIPPE SQUARZONI est auteur de bandes dessinées. Après le diptyque politique *Garduno, en temps de paix et Zapata, en temps de guerre*, il a signé *Torture blanche*, sur le conflit israélo-palestinien. Ses derniers albums sont *Drancy-Berlin-Oswiecim*, et *Crash-text*.

SOURCES
Cet article s'inspire des analyses et prévisions réalisées par différents spécialistes, notamment :

IAN HAMLEY, chimiste à l'université de Leeds (Royaume-Uni).
GRAHAM LEGGETT, biologiste à l'université de Sheffield (Royaume-Uni).
RICHARD JONES, professeur de physique à l'université de Sheffield (Royaume-Uni).
JEAN-LOUIS PAUTRAT, physicien spécialiste des semi-conducteurs, chercheur au Centre de l'énergie atomique (CEA).
LOUIS LAURENT, directeur de département de recherche au Centre de l'énergie atomique (CEA).
JEAN-CLAUDE PETIT, directeur des programmes du Centre de l'énergie atomique (CEA).
MARK RATNER, professeur de chimie et directeur associé de l'institut des nanotechnologies de l'université de Northwestern, Illinois (États-Unis).
BERNADETTE BENSUADE-VINCENT, professeur d'histoire et de philosophie des sciences à l'université Paris-X.
ERIC DREXLER, chercheur, président de l'institut Foresight.
CRAIG VENTER, généticien, fondateur de Celera Genomics, président de l'institut Craig Venter, fondateur de Synthetic Genomics.