

TOUJOURS PLUS HAUT

La technologie et la science se renforcent mutuellement pour propulser l'économie mondiale de plus en plus haut

Joel Mokyr

Ces dernières années, nombre d'économistes remettent en question la capacité du progrès technologique à propulser l'économie toujours plus haut malgré la baisse de la croissance démographique et la hausse des ratios de dépendance (Gordon, 2016). Pour les tenants de cette théorie, les solutions à portée de main ont pour la plupart été trouvées, et il deviendra de plus en plus difficile de progresser davantage (Bloom *et al.*, 2017).

D'autres rétorqueront que, grâce à la science, il est possible de monter encore plus haut pour trouver des solutions de plus en plus élaborées. Grâce à l'amélioration fulgurante des connaissances scientifiques, de nouvelles découvertes technologiques sont encore susceptibles de transformer nos vies dans un avenir proche, tout comme elles l'ont fait au cours du siècle et demi écoulé depuis la Guerre de sécession aux États-Unis, soutiennent les défenseurs de cette thèse.

Pourquoi est-il plausible que le progrès scientifique continue sur sa lancée ? le progrès technologique n'a



pas seulement une incidence directe sur la productivité ; il s'élève aussi toujours plus haut par ses propres moyens en mettant à la disposition de la science des outils toujours plus puissants. L'être humain a une capacité limitée à effectuer des mesures de haute précision, à observer l'infiniment petit, à surmonter les illusions d'optique et autres illusions sensorielles, et à effectuer rapidement des calculs complexes. La technologie consiste notamment à nous aider à surmonter les limites que l'évolution nous a imposées et à découvrir des phénomènes naturels que nous n'étions pas censés voir ni entendre — ce que Derek Price (1984) a appelé la « révélation artificielle ». La révolution scientifique du XVII^e siècle a en grande partie été rendue possible par l'amélioration d'instruments et d'outils, comme l'ont démontré le télescope de Galilée et le microscope de Hooke.

Les progrès scientifiques de l'ère moderne ont eux aussi été tributaires des outils à la disposition des chercheurs. Grâce à l'association de microscopes améliorés et de meilleures techniques de laboratoire, il a été possible de découvrir la théorie des germes, qui est sans aucun doute l'une des plus grandes avancées médicales de tous les temps. Le XX^e siècle a vu se multiplier le nombre d'exemples démontrant l'impact de l'amélioration des instruments et des techniques scientifiques. L'un des plus grands triomphes de la science moderne est la radiocristallographie. Cette technique a été déterminante pour découvrir la structure et la fonction de nombreuses molécules biologiques, notamment des vitamines, des médicaments et des protéines. Son application la plus célèbre a sans aucun doute été la découverte de la structure de la molécule d'ADN, mais son utilisation a également apporté de précieuses contributions à 29 autres projets lauréats du prix Nobel.

Parmi les outils traditionnels utilisés à notre époque, le microscope reste l'un des plus remarquables, puisque son utilisation est fondamentale pour assouvir la soif omniprésente de miniaturisation — autrement dit, pour comprendre et manipuler le monde à une échelle de plus en plus petite. Le microscope à effet tunnel, inventé au début des années 80, a permis de lancer la recherche au niveau nanoscopique. Plus récemment, le microscope de fluorescence à super-résolution de Betzig–Hell, qui a valu à ses concepteurs le prix Nobel de chimie, est, par rapport au microscope de Leeuwenhoek, l'équivalent d'une bombe thermonucléaire par rapport à un pétard. Il en va de même du télescope, puisque le télescope révolutionnaire

de Hubble va bientôt être remplacé par le télescope spatial beaucoup plus sophistiqué de James Webb.

Deux puissants outils scientifiques qui ne sont disponibles que depuis peu et qui représentent une véritable rupture avec le passé sont le calcul informatique intensif (avec notamment des techniques pratiquement illimités de stockage et d'exploration de données) et la technologie laser. Ces deux outils ont, bien entendu, trouvé d'innombrables applications directes dans la production de biens d'équipement et de biens de consommation. L'impact de l'ordinateur sur la science est allé bien au-delà de l'analyse d'énormes bases de données et de l'analyse statistique habituelle : une

Le progrès technologique n'a pas seulement une incidence directe sur la productivité ; il s'élève aussi toujours plus haut par ses propres moyens en mettant à la disposition de la science des outils toujours plus puissants.

nouvelle ère de science des données est apparue, dans laquelle les modèles sont remplacés par de puissants calculateurs de mégadonnées. Ces ordinateurs de grande puissance recourent à des algorithmes d'apprentissage automatique pour détecter des schémas inconcevables par l'esprit humain. Plutôt que de travailler sur des modèles, ils détectent des régularités et des corrélations, même si ces dernières sont « tellement alambiquées que le cerveau humain ne peut ni les mémoriser ni les prédire » (Weinberger, 2017, 12).

Mais les ordinateurs peuvent faire plus que calculer des données : ils savent aussi simuler et, ce faisant, ils peuvent s'approcher de la solution d'équations diaboliquement complexes, permettant aux chercheurs d'étudier des processus physiologiques et physiques jusque-là mal compris, de concevoir de nouveaux matériaux et de simuler des modèles mathématiques de processus naturels qui ont à ce jour défié toutes les tentatives de solutions analytiques. Ces simulations

Si l'histoire des deux premières révolutions industrielles a été dominée par l'énergie, l'avenir pourrait bien être le théâtre de progrès révolutionnaires dans l'évolution de nouveaux matériaux.

ont donné naissance à de tout nouveaux domaines de recherche « computationnelle », dans lesquels la simulation et le traitement de métadonnées se complètent efficacement pour résoudre des problèmes de la plus haute complexité. Un certain nombre de chercheurs ont pu rêver d'un tel outil par le passé, mais ce n'est qu'au cours de ces dix dernières années qu'ils auront pu travailler à un tel niveau, qui aura inévitablement une incidence sur nos capacités technologiques et donc sur la productivité, et vraisemblablement aussi sur le bien-être économique.

Avec l'avènement de l'informatique quantique, la puissance de calcul dans nombre de ces domaines pourrait être démultipliée. De la même façon, l'intelligence artificielle, qui même si elle reste préoccupante pour certains qui craignent de la voir se substituer non seulement aux tâches routinières, mais aussi aux spécialistes du savoir hautement qualifiés, pourrait bien devenir l'assistante de recherche la plus performante au monde, même si elle ne pourra jamais devenir le meilleur chercheur au monde (*Economist*, 2016, 14).

La technologie laser est un outil scientifique tout aussi révolutionnaire ; lorsque les premiers lasers ont été mis au point, leurs inventeurs auraient dit qu'il s'agissait d'une technique « en quête d'application ». Mais, dans les années 80, les lasers étaient déjà utilisés pour refroidir des micro-échantillons à des températures extraordinairement basses, permettant d'énormes progrès en physique. De nos jours, les lasers sont déployés dans une gamme impressionnante d'applications scientifiques. L'une des plus importantes est la spectroscopie par claquage laser, outil étonnamment polyvalent utilisé dans un vaste éventail de domaines qui nécessitent une rapide analyse chimique au niveau de l'atome, sans préparation d'échantillon. La télédétection par laser ou LIDAR (light radar) est une technique de relevé au laser qui crée des images extrêmement détaillées en trois dimensions, utilisées en géologie, sismologie, télédétection et physique atmosphérique, et qui a récemment contribué à réviser radicalement à la hausse nos estimations de la taille et de la sophistication de la civilisation précolombienne Maya au Guatemala. Mais les lasers sont aussi un outil mécanique qui permet de procéder à une ablation (extraction) de matériaux dans le but de les analyser. N'importe quel type d'échantillon solide peut faire l'objet d'une ablation au laser pour être ensuite soumis à une analyse ; nul besoin de répondre à un critère de taille ni de réaliser une procédure de préparation de l'échantillon. Et les interféromètres au laser ont été utilisés pour détecter

les ondes gravitationnelles postulées par Einstein, l'une des découvertes les plus convoitées de la physique moderne.

Le siècle de la biologie

Et pourtant, il y a encore beaucoup plus. Comme l'a remarqué Freeman Dyson, si le XX^e siècle a été le siècle de la physique, le XXI^e siècle sera celui de la biologie. Les progrès récents de la biologie moléculaire et de la génétique permettent de révolutionner la capacité de l'homme à manipuler d'autres êtres humains. Le progrès le plus remarquable est la baisse des coûts du séquençage du génome, à un niveau qui rend la loi de Moore dérisoire en comparaison, puisque ces coûts sont passés de 95 millions de dollars en 2001 à environ 1.250 dollars en 2015.

La technique particulièrement prometteuse est celle qui consiste à *éditer* une paire de bases dans une séquence génétique, grâce aux récentes améliorations du système CRISPR-Cas9. L'autre technique est celle de la biologie de synthèse, qui permet de fabriquer des produits biologiques sans faire intervenir d'organismes vivants. L'idée d'une production de protéines en système acellulaire plane depuis près d'une dizaine d'années, mais ce n'est que récemment que son plein potentiel a été révélé au public, même s'il faudra encore des années avant qu'elle ne se concrétise.

Relation de symbiose

Contrairement à ce que disait l'Ecclésiaste, il y a bien du nouveau sous le soleil. Si l'histoire des deux premières révolutions industrielles a été dominée par l'énergie, l'avenir pourrait bien être le théâtre de progrès révolutionnaires dans l'évolution de nouveaux matériaux. Nommer les époques économiques en fonction de la matière première dominante à ce moment-là (« âge de bronze ») est une habitude ancestrale chez les historiens. Bon nombre de concepts technologiques du passé n'ont pas pu se concrétiser, car les matériaux dont disposaient les inventeurs n'étaient tout simplement pas appropriés pour passer de la conception à la réalité. Mais les récents progrès scientifiques en techniques des matériaux permettent aux chercheurs de concevoir de nouvelles matières de synthèse inimaginables par la nature. Ces matériaux artificiels, mis au point au niveau nanotechnologique, laissent présager l'avènement de matières aux propriétés de dureté, résilience, élasticité, et autres, personnalisées à la demande. De nouvelles résines, des céramiques de pointe, de nouveaux solides et des nanotubes de carbone sont tous en cours de mise au point ou d'amélioration.

L'intelligence artificielle, le laser et le génie génétique semblent remplir les conditions pour être qualifiés de technologies polyvalentes, aux nombreuses applications dans les utilisations les plus diverses en production et en recherche. Il semble incontestable que ces technologies polyvalentes, telles que l'apprentissage automatique, prennent en général du temps avant que leur effet ne se fasse totalement sentir sur l'économie, car par définition, elles nécessitent des innovations et des investissements complémentaires. Mais elles sont annonciatrices de changements en profondeur de la condition humaine dans de nombreuses dimensions.

Aucune de ces prédictions technologiques ne peut être faite avec certitude, et, inévitablement, un certain nombre de progrès verront le jour alors que personne ne les prévoit aujourd'hui, tandis que d'autres progrès prometteurs s'avéreront décevants. Mais le fait que le progrès technologique poursuivra son ascension vertigineuse ne dépend pas de tel ou tel domaine technologique. Il repose sur l'observation que la science et la technologie progressent ensemble en symbiose, en apportant aux scientifiques des outils considérablement plus puissants avec lesquels travailler. Un certain nombre de ces outils

sont connus sous des formes plus élémentaires depuis des siècles ; d'autres sont de véritables innovations, sans précurseur évident.

À l'instar des nouveaux outils et instruments annonciateurs au XVII^e siècle de la révolution scientifique et de l'ère de la vapeur et de l'électricité, l'informatique superpuissante, le laser et nombre d'autres outils de notre ère entraîneront des progrès technologiques qui sont aussi inimaginables aujourd'hui que l'était la locomotive pour Galilée. **FD**

JOEL MOKYR est professeur « Robert H. Strotz » d'économie à la Northwestern University.

Le présent article se fonde sur « The Past and the Future of Innovation: Some Lessons from Economic History », à paraître dans l'ouvrage Explorations in Economic History.

Bibliographie :

Bloom, Nicholas, Charles I. Jones, John Van Reenen, and Michael Webb. 2017. "Are Ideas Harder to Find?" Unpublished working paper, Stanford University, Stanford, CA.

Economist. 2016. "The Return of the Machinery Question." June 25, 1–14.

Gordon, Robert J. 2016. *The Rise and Fall of American Growth*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Price, Derek J. de Solla. 1984. "Notes towards a Philosophy of the Science/Technology Interaction." In *The Nature of Knowledge: Are Models of Scientific Change Relevant?* Edited by Rachel Laudan. Dordrecht, Netherlands: Kluwer.

Weinberger, David. 2017. "Alien Knowledge: When Machines Justify Knowledge."

PODCASTS

du Fonds monétaire international

