



Dix autres technologies qui pourraient changer nos vies

ETUDE

Évaluation des choix scientifiques et technologiques

Dix autres technologies qui pourraient changer nos vies

Analyse approfondie

Juillet 2017

PE 598.626

AUTEURS

Éditée par Christian Kurrer et James Tarlton (unité de la prospective scientifique [STOA], Direction générale des services de recherche parlementaire [DG EPRS], Parlement européen)

Contributeurs principaux:

Andrés Garcia, *université de Castille-La Manche, Espagne* (chapitre 7)

Mihalis Kritikos, unité de la prospective scientifique (STOA) (chapitres 9 et 10)

Christian Kurrer, unité de la prospective scientifique (STOA) (chapitres 1, 2, 4 et 8)

Laura Panades, *faculté de droit Truman Bodden, Îles Caïman, affiliée à l'université de Liverpool, Royaume-Uni* (chapitre 3)

James Tarlton, unité de la prospective scientifique (STOA) (chapitres 1, 5 et 6)

Lieve Van Woensel, unité de la prospective scientifique (STOA) (chapitres 5 et 6)

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Gianluca Quaglio (unité de la prospective scientifique [STOA]), Gregor Erbach (unité des politiques économiques, DG EPRS), Lieve Herman et Marc De Loose (Institut flamand de recherche dans les domaines de l'agriculture, de la pêche et de l'alimentation - ILVO, Melle, Belgique) pour leur contribution.

VERSIONS LINGUISTIQUES

Original: EN

Traductions: DE, ES, FR, IT, PL et PT

À PROPOS DE L'ÉDITEUR

Pour contacter la STOA ou pour vous abonner à sa lettre d'information, veuillez écrire à l'adresse suivante: STOA@ep.europa.eu

Ce document est disponible sur l'internet à l'adresse suivante: <http://www.europarl.europa.eu/stoa>

Manuscrit achevé en juillet 2017

Bruxelles, © Union européenne, 2017

CLAUSE DE NON-RESPONSABILITÉ

Le présent document est rédigé à l'attention des membres et du personnel du Parlement européen dans le but de les aider dans leur travail parlementaire. Le contenu de ce document relève de la responsabilité exclusive des auteurs et les avis qui y sont exprimés ne reflètent pas nécessairement la position officielle du Parlement européen.

La reproduction et la traduction sont autorisées, sauf à des fins commerciales, moyennant mention de la source, information préalable du Parlement européen et transmission d'un exemplaire à celui-ci.

PE 598.626

ISBN: 978-92-846-1704-3

doi: 10.2861/271419

QA-01-17-154-FR-N

Sommaire

Introduction	4
1. Voitures électriques.....	6
2. Systèmes intelligents de transport urbain.....	9
3. Transports à lévitation magnétique	11
4. Bois	13
5. Agriculture de précision.....	16
6. Technologies quantiques.....	19
7. Étiquettes d'identification par radiofréquence	22
8. Mégadonnées et soins de santé	25
9. Organoïdes	28
10. Édition génomique	31

Introduction

Les avancées et innovations technologiques ponctuent l'histoire de la civilisation humaine et influencent profondément l'évolution de la vie moderne. Des inventions telles que le tir à l'arc ont révolutionné la chasse, tout comme la roue a révolutionné le secteur des transports. L'arche a radicalement changé les techniques de construction, le métier à tisser a révolutionné le monde du textile et l'impression a transformé le stockage et le partage d'idées. La machine à vapeur a ouvert la voie à la production industrielle, suivie par la démocratisation de l'électricité grâce au moteur électrique. Les vaccins et les antibiotiques ont eu d'importantes répercussions sur la santé et la médecine. L'invention du chemin de fer, de l'automobile et de l'aéronef ont, à leur tour, révolutionné les transports; enfin, le téléphone, la communication mobile et l'internet ont facilité la communication, comme si nous vivions tous dans un village planétaire.

Si toutes ces technologies ont largement profité à l'humanité, elles ont parfois eu des conséquences négatives et imprévues, auxquelles les civilisations ont dû faire face. Souvent, elles ont bouleversé les habitudes et l'ordre social, semant le désordre et causant du tort. La société a dû apprendre comment utiliser au mieux l'innovation.

Les avancées technologiques se poursuivent aujourd'hui, à un rythme toujours plus effréné. Il devient de plus en plus important pour la société et les responsables politiques d'anticiper l'émergence de possibles innovations décisives, de commencer, très tôt, à analyser leurs éventuels avantages et effets néfastes, et d'élaborer une réponse concertée afin de maximiser leurs bienfaits et de minimiser tout dommage.

Ces réponses préventives peuvent prendre différentes formes: une législation réglementant les technologies (interdisant, éventuellement, certaines utilisations); une action publique soutenant le développement des technologies ou facilitant leur introduction par l'intermédiaire de normes et de réglementations; l'éducation et le déploiement d'efforts de vulgarisation afin que la société en tire davantage parti; ainsi que des mesures de compensation pour les groupes de la société qui risquent de pâtir des nouvelles technologies.

Les institutions de l'Union européenne ainsi que les institutions nationales des États membres et de plus en plus d'institutions politiques internationales et mondiales sont les principales sources d'élaboration des politiques du XXI^e siècle. Non seulement les politiques de l'Union touchent plus de 500 millions d'Européens, mais elles exercent aussi une influence croissante sur les tendances et avancées mondiales dans des domaines tels que le changement climatique, la durabilité et l'utilisation rationnelle des ressources, le commerce, les soins de santé, la résolution des conflits régionaux et la réduction de la pauvreté.

Pour plus d'efficacité, le Parlement européen doit souvent voir au-delà du programme politique à court terme et chercher des avancées à plus long terme en lançant, de façon proactive, des débats et en développant en amont des démarches en matière de politique publique.

Le Parlement assume ce rôle proactif au quotidien, lors d'auditions organisées par des députés individuels et de débats au sein des groupes politiques ou des commissions. Le panel de l'évaluation des choix scientifiques et technologiques (STOA) joue un rôle essentiel dans ce processus de réflexion. À leur demande, la STOA leur apporte son soutien aux commissions parlementaires pour la conception de politiques à long terme à l'aide d'études prospectives. En outre, elle lance de façon proactive des travaux afin de déterminer les avancées technologiques qui pourraient avoir de profondes répercussions sur la société et qui, en tant que telles, devraient être incluses dans le programme politique.

En 2015, la direction générale des services de recherche parlementaire du Parlement européen (DG EPRS) a publié une étude intitulée «Dix technologies qui pourraient changer nos vies: impacts potentiels et

conséquences des politiques», dont chaque chapitre met en évidence une technologie particulière, ses promesses et ses possibles conséquences négatives, ainsi que le rôle que pourrait et devrait jouer le Parlement européen dans l'orientation de ces avancées. Le présent document poursuit la réflexion en présentant dix technologies supplémentaires qui requièrent une attention accrue de la part des responsables politiques.

Les progrès technologiques ne sont pas classés dans un ordre d'importance particulier; le classement ne dépend ni de leurs incidences, ni du niveau d'urgence. Les sujets de la présente étude ont été choisis de telle sorte qu'ils reflètent les nombreux thèmes sur lesquels la STOA a décidé de se concentrer dans le cadre du huitième mandat du Parlement.

L'objectif de la publication n'est pas uniquement d'attirer l'attention sur ces dix technologies en particulier: il consiste également à susciter la réflexion sur ces avancées technologiques qui n'en sont peut-être encore qu'à leurs débuts, mais qui pourraient tout de même avoir d'importantes répercussions sur nos vies dans un avenir proche ou lointain.

Démarche

Pour chaque sujet, nous présentons brièvement les enjeux technologiques et les solutions actuellement mises sur pied, l'état d'avancement actuel et la trajectoire d'évolution probable. Nous nous penchons ensuite sur leurs possibles répercussions, volontaires ou non, sur la société en général. Enfin, dans la dernière partie, nous cherchons à définir le rôle particulier que peut jouer le Parlement européen, en tant qu'institution supranationale d'élaboration de politiques, pour apporter une contribution positive à ces mutations technologiques.

1. Voitures électriques

Sommes-nous sur le point de passer aux voitures électriques? Quelles seront alors les conséquences de cette transition sur le climat, sur notre santé et sur notre mode de vie futur?

Au cours du siècle dernier, les voitures sont devenues partie intégrante de notre société. Elles offrent une plus grande flexibilité et sont plus rapides que d'autres modes de transport. De plus, elles restent abordables pour une grande partie de la population. Depuis les débuts de la production de voitures en série, les véhicules sont presque exclusivement alimentés au moyen d'un moteur à combustion interne. Ces moteurs brûlent du carburant fossile, tel que l'essence ou le diesel, afin d'apporter l'énergie nécessaire au fonctionnement du véhicule (pour faire tourner les roues et réaliser d'autres tâches auxiliaires). Cependant, les voitures constituent également une source importante d'émissions de CO₂ dans l'atmosphère, influant sur le climat mondial, mais aussi d'oxyde d'azote (NO_x) et de particules en suspension (PM) qui polluent l'air que nous respirons, notamment dans les zones urbaines. Ces répercussions sont les principaux moteurs du regain d'intérêt que suscite l'utilisation d'énergie électrique pour faire fonctionner nos véhicules.



© Nerthuz / Shutterstock.com

Incidences et évolutions possibles

Les voitures électriques possèdent plusieurs atouts que les voitures dotées d'un moteur à combustion interne n'ont pas. Outre le fait qu'elles polluent moins l'atmosphère et émettent moins de CO₂ (à condition que l'électricité ne provienne pas de centrales alimentées aux combustibles fossiles), les voitures électriques offrent divers autres avantages. En effet, l'entretien de ces véhicules est moins onéreux; ils sont plus silencieux et plus faciles à conduire; ils diminuent notre dépendance à l'énergie importée; ils peuvent avoir un effet positif sur notre balance internationale des paiements et même, éventuellement, contribuer à l'apaisement des conflits internationaux vis-à-vis des ressources naturelles.

Malheureusement, la fabrication de voitures électriques reste plus coûteuse (et émet davantage de carbone) que celle des voitures dotées d'un moteur à combustion interne. En parallèle, les voitures électriques ont une autonomie limitée, généralement de d'environ 300 km entre chaque recharge, et recharger les batteries prend plus de temps que remplir le réservoir avec de l'essence.

Face à ces défis, les États membres ont créé des subventions afin d'aider à établir le marché des véhicules électriques, permettant un accroissement des volumes de production et des ventes qui finiront par tirer les prix vers le bas. Pendant ce temps, des efforts intenses sont déployés afin de perfectionner la technologie des batteries, l'objectif étant de produire des batteries moins chères, plus puissantes et plus légères, ce qui engendrerait une baisse des prix des véhicules tout en élargissant leur gamme.

Quand bien même nous pourrions envisager de façon réaliste que nous serons un jour à même de produire des voitures électriques dont les coûts relativement faibles et l'autonomie élevée correspondront à nos voitures contemporaines dotées de moteurs à combustion interne, un tel scénario pourrait n'être ni nécessaire, ni désirable au vu de l'évolution de nos modes de vie et de nos besoins en matière de mobilité. Le genre de voiture que nous souhaiterons conduire à l'avenir pourrait se révéler extrêmement différent des voitures que nous produisons aujourd'hui.

À l'heure actuelle, de nombreuses personnes possèdent toujours leur propre voiture (même si elles n'en ont généralement qu'une) et désirent, par conséquent, avoir un véhicule qui s'adapte à toutes les situations de conduite: il doit à la fois pouvoir accélérer rapidement à partir d'une vitesse réduite et être aérodynamique à vitesse soutenue; il doit avoir assez de sièges pour accueillir toute la famille lors d'une escapade dominicale, être assez spacieux pour récupérer des meubles auprès de grands magasins discount; il doit être équipé de la climatisation pour l'été, de sièges chauffants pour l'hiver, de matériel stéréo et d'un grand réservoir à combustible pour les longs trajets; il doit aussi être doté du système de mise en veille, idéal pour le trafic discontinu en ville. Il en résulte une voiture «multifonction» extrêmement lourde, et donc énergivore. Ce problème est encore plus marqué pour les voitures électriques, les batteries ajoutant souvent 33 % au poids de la voiture. Ironie de la situation: cela signifie qu'une grande partie de l'énergie stockée dans les batteries est nécessaire uniquement pour accélérer le bloc de batterie de plus en plus lourd.

Toutefois, la nouvelle génération se distancie de plus en plus du système traditionnel consistant à posséder une voiture «personnelle» unique et se tourne vers des modèles de covoiturage. En outre, étant donné que les sociétés de covoiturage offrent à leurs clients un choix de véhicules varié, les différents véhicules n'auront plus besoin d'être aussi polyvalents que les voitures personnelles. Ils pourront au contraire être plus diversifiés, plus légers et, pour la plupart, offrir une autonomie plus faible, requérant des batteries plus légères et augmentant ainsi sensiblement l'efficacité.

En raison de l'intérêt croissant que portent les citoyens aux options de covoiturage, les voitures individuelles pourraient progressivement n'être plus utilisées que par les familles résidant en banlieue, dans des maisons individuelles qui produisent de plus en plus souvent leur propre électricité à l'aide de systèmes photovoltaïques installés sur les toits. Ces systèmes photovoltaïques sont complétés par des systèmes de batteries qui emmagasinent l'énergie produite pendant la journée et la mettent à disposition le soir. Il serait redondant pour ces familles de posséder d'importants dispositifs de batteries à la fois dans leur habitation et dans leur véhicule. Au lieu de cela, pour garantir une efficacité maximale, il serait bon de ne conserver qu'un nombre minimal de batteries installées en permanence dans la voiture (afin de couvrir les besoins des trajets quotidiens) et de laisser le reste des batteries à la maison, reliées au système photovoltaïque, en ne les branchant aux voitures que pour les voyages occasionnels lors des week-ends prolongés ou des vacances.

Le prix de l'électricité joue un rôle significatif sur l'attractivité des voitures électriques. Dans le pire des scénarios, des milliers de voitures électriques qui seraient toutes rechargées au même moment pourraient congestionner le réseau électrique et le rendre plus instable, requérant de nouveaux investissements dans nos réseaux électriques. En revanche, dans le cadre des réseaux intelligents, les voitures électriques qui utiliseraient le surplus d'électricité en n'étant rechargées qu'à certains moments pourraient bénéficier de coûts d'électricité particulièrement faibles, tout en aidant à stabiliser le réseau.

Élaboration d'une politique d'anticipation

On s'accorde généralement à dire qu'un passage réussi à l'électromobilité dépendra des actions, des mesures d'incitation et des programmes d'aide publics. Les propriétaires de voitures sont actuellement ciblés par des mesures qui les encouragent à passer à l'électrique. En outre, l'accent est porté sur la construction d'infrastructures de charge qui permettent aux consommateurs d'utiliser leurs voitures électriques quasiment de la même façon que leurs voitures traditionnelles.

L'élaboration de politiques d'anticipation devrait se concentrer davantage sur la promotion du développement des voitures que nous souhaiterons conduire à l'avenir et tenir compte de la nouvelle génération, qui recourra certainement davantage aux options de covoiturage. Promouvoir le développement de véhicules électriques légers pour les services de covoiturage serait peut-être plus

pertinent que subventionner le développement de véhicules électriques lourds pour les utilisateurs privés qui souhaitent y retrouver la performance de leurs véhicules actuels.

Nous devrions également nous concentrer sur la façon dont l'électromobilité s'adaptera le mieux à notre mode de vie dans vingt ans, lorsqu'un plus grand nombre de logements privés seront équipés de systèmes photovoltaïques et de systèmes de batteries de stockage. Les changements en matière de mobilité seront en outre motivés non seulement par l'objectif de réduction des émissions de CO₂ et d'autres polluants, mais également par la multiplication des embouteillages en ville provoqués par les voitures particulières. Si nous souhaitons que nos villes restent vivables à l'avenir, il pourrait s'avérer inévitable de redynamiser les solutions de transports publics. Lors de la conception de véhicules électriques, il pourrait donc être approprié d'anticiper cette évolution et de se concentrer sur des véhicules qui complètent les offres de transports publics au lieu de leur faire concurrence.

En conclusion, les mesures publiques visant à promouvoir l'électromobilité pourraient être plus efficaces si, en parallèle, des efforts étaient étroitement coordonnés afin de concevoir de nouveaux modes de mobilité et de nouvelles façons de produire et de distribuer notre électricité.

2. Systèmes intelligents de transport urbain

Comment les technologies de l'information contribuent-elles à réduire les problèmes de circulation dans nos zones urbaines toujours plus congestionnées?

Plus de 70 % des Européens vivent en milieu urbain et ce pourcentage ne cesse d'augmenter, multipliant le nombre d'embouteillages au sein des villes. Les habitants souffrent d'une pollution sonore et atmosphérique de plus en plus importante, les villes devenant, dans l'ensemble, moins vivables.



© Fuyu liu / Shutterstock.com

La récente controverse relative aux émissions des voitures a attiré une attention particulière sur le problème de la pollution atmosphérique due à la circulation des véhicules personnels. Elle a révélé que les efforts déployés pour réduire cette pollution en Europe par l'adoption de réglementations plus strictes sur les émissions sont majoritairement inefficaces. D'aucuns estiment, à juste titre, que le passage de l'essence à l'électrique des véhicules aura des effets notoires sur les niveaux de pollution. Cependant, l'introduction de voitures électriques prendra des années, et le passage à l'électrique en lui-même ne jouera qu'un rôle très limité dans la résolution des problèmes d'encombrement du trafic toujours plus importants.

Ces dernières années, nous avons donc pu observer un regain d'intérêt pour les éventuelles solutions présentées par les systèmes de transport intelligents (STI).

Incidences et évolutions possibles

De nombreuses initiatives ont été lancées afin d'analyser la façon dont les STI peuvent contribuer à fluidifier le trafic et, ainsi, à le rendre plus efficace. De nombreuses possibilités naissent du fait que les voitures deviennent toujours plus intelligentes et communiquent de plus en plus avec leur environnement immédiat. Aujourd'hui déjà, les voitures peuvent adapter leur vitesse à la voiture qui les précède. En outre, les futures possibilités d'interaction avec des signaux routiers intelligents permettront de réduire les retards et la consommation de carburant. Les voitures pourront réserver une place de stationnement avant d'arriver à destination. De nos jours, les systèmes de navigation par satellite peuvent optimiser les itinéraires en fonction de la situation routière en temps réel, mais les systèmes à venir pourraient communiquer entre eux par l'intermédiaire d'un ordinateur central afin d'optimiser le réseau d'itinéraires que tous les véhicules devraient emprunter, évitant ainsi les situations où un nombre trop important de conducteurs souhaite, au même moment, changer de trajet pour suivre une même route apparemment plus rapide afin de contourner les embouteillages.

Toutes ces options technologiques permettraient certainement une gestion plus efficace des niveaux de densité du trafic actuel. Il reste cependant à savoir si ces systèmes permettront réellement de décongestionner les zones urbaines ou si la hausse de la fluidité sera en grande partie contrecarrée par une incitation, pour davantage de conducteurs, à utiliser leur véhicule personnel pour se rendre au travail.

Permettre à un plus grand nombre de voitures particulières de se rendre sans encombre en centre-ville soulève le problème du stationnement de ces véhicules. Une fluidification du trafic serait peu avantageuse si elle rendait les places de stationnement plus difficiles à trouver.

Élaboration d'une politique d'anticipation

Pour résoudre le problème de l'encombrement des zones urbaines, il faudrait davantage qu'une fluidification du trafic au niveau des intersections individuelles. Une réévaluation plus profonde de la façon dont nous souhaiterons, à l'avenir, satisfaire nos besoins en matière de mobilité, utiliser les espaces publics et organiser nos vies en ville pourrait être nécessaire.

La création d'un système de circulation intelligent donnant une priorité absolue aux transports publics de surface, tels que l'autobus ou le tram, pourrait être une option. Les feux de circulation situés le long des routes empruntées par les transports publics pourraient être programmés de telle sorte que les autobus n'auraient jamais besoin de s'arrêter à un feu rouge ou à cause de voitures qui bloquent la route. L'un des inconvénients majeurs des autobus publics est que leur vitesse en ville n'excède généralement pas les 15 km/h et qu'en raison de leurs fréquents arrêts aux arrêts d'autobus, ils se déplacent encore plus lentement que les voitures particulières.

Grâce aux STI, nous pourrions changer radicalement cette situation et, peut-être, aller jusqu'à doubler la vitesse de déplacement des autobus, ce qui signifie également qu'un même nombre d'autobus et de conducteurs pourrait transporter deux fois plus de passagers.

En d'autres termes, investir pour susciter l'intérêt des citoyens envers les transports publics pourrait être le moyen le plus efficace de rendre le trafic de véhicules particuliers plus fluide et plus économe en carburant. Outre la vitesse, le prix des transports publics est l'un des principaux aspects qui influencent les choix de transport des particuliers. Pour de nombreuses personnes, le prix d'un trajet simple est excessif pour une utilisation occasionnelle, ou l'organisation tarifaire est trop confuse. Les autorités de transports publics se concentrent actuellement peut-être trop sur la vente et le contrôle des tickets, à l'aide de systèmes de contrôle d'accès de pointe, et pas assez sur le transport des passagers à proprement parler. Un conducteur de bus qui demeure à un arrêt pendant une minute pour vendre un ticket simple à 2 euros alors que 60 passagers attendent à l'arrière est absurde sur le plan macroéconomique.

Si disposer de transports publics efficaces est considéré comme une nécessité publique, nous devrions, de manière plus approfondie, nous demander qui devrait les financer et avec quels moyens. Il faudrait peut-être envisager d'adopter la règle de la gratuité des transports publics, comme nous l'avons fait il y a plusieurs dizaines d'années avec la gratuité de l'éducation publique. Parallèlement, nous pourrions réexaminer la possibilité, pour les villes, de continuer à octroyer des places de stationnement gratuites aux résidents. Imposer aux résidents une taxe leur permettant de stationner sur la voirie pourrait permettre de récolter les fonds nécessaires à l'instauration de la gratuité des transports publics pour tous. Décourager le stationnement de véhicules privés sur la voie publique pourrait également dégager davantage d'espace public pour une fluidification encore plus efficace des services de transports publics. De plus, au lieu d'utiliser des machines de plus en plus sophistiquées pour vendre et contrôler les tickets des personnes qui se déplacent en ville en bus, nous pourrions exploiter toute cette ingéniosité technique pour installer des systèmes qui contrôlent et taxent les automobilistes qui conduisent leurs véhicules particuliers en ville, engrangeant ainsi des fonds supplémentaires pour l'amélioration des transports publics.

Hormis le renforcement des infrastructures techniques, d'autres options au niveau de l'utilisateur pourraient en outre améliorer l'efficacité de notre système de transport. De nombreux navetteurs engorgent actuellement les rues, utilisant plus ou moins les mêmes routes dans des voitures séparées. Les STI qui faciliteraient l'identification spontanée des options de covoiturage pourraient atténuer le besoin d'utiliser principalement des voitures individuelles.

Il existe donc de nombreuses options qui permettraient de renforcer l'efficacité de notre système de transport. Les technologies de l'information contemporaines offrent d'énormes possibilités dans ce domaine, mais nous avons toujours besoin de l'ingéniosité et de l'imagination humaine pour en exploiter pleinement le potentiel.

3. Transports à lévitation magnétique

Les transports à lévitation magnétique (maglev) pourraient faire prochainement partie de notre quotidien, nous offrant des déplacements plus rapides, plus sûrs et moins énergivores. Ce mode de transport couvrant plus rapidement et proprement de plus longues distances pourrait-il influencer la façon dont nous choisissons l'endroit où nous vivons?

La technologie ouvre la voie à de nouveaux moyens de transport. Certains sont des versions intelligentes de nos véhicules traditionnels (par exemple les véhicules autonomes). D'autres ont d'abord vu le jour dans nos œuvres de science fiction (par exemple les *hoverboards*). D'autres encore sont le fruit de l'innovation (par exemple les trains à lévitation magnétique).



© Bogna / Shutterstock.com

Les *hoverboards* sont des planches en lévitation sur lesquelles une personne debout vole à une distance proche du sol. Actuellement, les premiers utilisateurs parviennent à planer à l'intérieur comme à l'extérieur.

Les trains à lévitation magnétique sont capables d'atteindre une vitesse supérieure à 500 km/h en éliminant la friction des wagons avec les rails. Ces trains ont commencé à être utilisés à des fins commerciales en Chine et en Corée du Sud, et ils sont en cours de fabrication au Japon. Des programmes visant à les mettre en service au sein de l'Union européenne ont été étudiés en Allemagne, en Italie et au Royaume-Uni, mais seul le projet italien a récemment fait l'objet d'un regain d'intérêt.

Incidences et évolutions possibles

La lévitation magnétique est la technologie qui a permis la conception du *hoverboards* et du train à lévitation magnétique. Elle repose sur la création de champs magnétiques opposés qui se repoussent entre eux afin de contrer les effets de la gravité, élevant ainsi les objets magnétisés au-dessus du sol. Cette technologie est appliquée aux modes de transport de toute taille, du *hoverboard* au train à grande vitesse et à grande capacité.

À l'heure actuelle, les *hoverboards* nécessitent encore des sols spéciaux en cuivre. Des améliorations permettant de l'utiliser sur du béton ou sur l'eau sont en cours. Le premier prototype a été présenté en 2015, mais aucune autre annonce n'a été faite depuis lors.

Le premier train commercial à lévitation magnétique parcourt la distance qui sépare l'aéroport international de Shanghai-Pudong à la périphérie de Shanghai, en reliant le réseau souterrain de Shanghai. Le service a été lancé en 2003 et permet d'atteindre une vitesse supérieure à 500 km/h. Les trains à lévitation magnétique devraient être déployés au Japon et relier Tokyo à Nagoya (286 km) d'ici à 2027, et Tokyo à Osaka (410 km) d'ici à 2045, à une vitesse allant jusqu'à 500 km/h. À l'avenir, cette technologie devrait évoluer et résulter en l'Hyperloop, une capsule de voyage se déplaçant à grande vitesse au sein d'un tube magnétisé. L'Hyperloop pourrait, à l'avenir, relier Los Angeles à la baie de San Francisco.

À long terme, les trains à lévitation magnétique offrent la possibilité de voyager plus rapidement que par l'intermédiaire des trains traditionnels, sans engendrer les conséquences environnementales de l'aviation (bruit et pollution), et de relier de grandes régions métropolitaines espacées de plusieurs centaines de kilomètres.

En plus d'offrir des moyens de transport pratiques, l'introduction de la technologie des trains à lévitation magnétique pourrait changer notre perception des distances. Parce qu'il couvre plus rapidement de plus longues distances, ce train pourrait avoir pour conséquence une répartition plus espacée de la population au sein et hors des limites de la ville. Les trains à lévitation magnétique pourraient relier les capitales et les villes secondaires, entraînant une résurgence de ces dernières grâce aux gares où ils s'arrêteraient.

Ces trains requièrent l'installation d'infrastructures spécifiques, ce qui pourrait mener à une nouvelle conception de la politique européenne en matière de transports. Le réseau transeuropéen de transport (RTE-T) est un programme de l'Union qui cherche, entre autres, à financer les infrastructures ferroviaires, afin de construire un réseau global dans toute l'Union. Il cible les goulets d'étranglement ainsi que les infrastructures transfrontalières et multimodales (connexion du chemin de fer avec les ports et autoroutes). Étant donné que le réseau repose sur des voies ferrées traditionnelles, les trains à lévitation magnétique seraient l'occasion de repenser entièrement le réseau.

Par contre, les *hoverboards* constituent toujours une technologie relativement nouvelle. Ils pourraient toutefois révolutionner la façon dont les individus et les marchandises se déplacent sur de courtes distances, fournissant une alternative rapide à la marche, à la voiture ou aux transports publics, ou une manière plus efficace de déplacer des marchandises au sein d'une usine.

Au début, ces *hoverboards* à lévitation magnétique devraient évoluer sur les espaces réservés aux piétons. La technologie s'améliorant, ils pourraient néanmoins léviter plus haut et se déplacer à des vitesses plus grandes, offrant alors la possibilité d'installer des portions de routes dédiées à ces moyens de transport afin de faciliter la coexistence des piétons et des utilisateurs de *hoverboards* dans les lieux publics.

La technologie à lévitation magnétique pourrait toutefois se développer également dans des domaines complètement différents dans un avenir proche. Le projet GABRIEL (septième programme-cadre de l'Union européenne pour des actions de recherche, de développement technologique et de démonstration pour la période 2007-2013), financé par l'Union européenne, étudie la possibilité d'introduire cette technologie dans le décollage et l'atterrissage d'avions afin de réduire la consommation énergétique, les coûts et le bruit.

Élaboration d'une politique d'anticipation

L'un des principaux obstacles à l'introduction des transports à lévitation magnétique est le fait qu'ils requièrent un espace et une infrastructure spécifiques et distinctes des réseaux ferroviaires et routiers actuels.

Les trains commerciaux à lévitation magnétique n'existent aujourd'hui qu'en Chine et en Corée du Sud, mais ils seront certainement mis en circulation au Japon d'ici une dizaine d'années. L'Union européenne doit décider si elle souhaite rester impliquée dans cette technologie émergente, en soutenant l'élaboration des premières utilisations commerciales dans des lieux sélectionnés, par exemple par l'intermédiaire du programme de financement du RTE-T. À plus long terme, les trains à lévitation magnétique pourraient déployer au mieux leur potentiel en connectant des zones métropolitaines de pays différents en Europe, et l'Union pourrait jouer un rôle décisif dans la création des conditions adaptées pour que de telles liaisons transnationales se concrétisent.

4. Bois

Les nouvelles technologies peuvent-elles contribuer au retour du bois en tant que source de biomasse et matériau de construction, et jouer un rôle majeur dans la lutte contre le changement climatique?

La civilisation humaine utilise le bois depuis des milliers d'années. Celui-ci joue un rôle clé en tant que combustible ou matériau de construction, ainsi que dans la fabrication de meubles, de machines, de moyens de locomotion et d'objets du quotidien.



© Kropotov / Shutterstock.com

La pression incitant à convertir davantage de terres en surfaces agricoles ainsi que les siècles d'utilisation du bois pour la construction navale ou en tant que combustible ont drastiquement réduit la surface forestière de la planète, même avant que le changement climatique ne devienne problématique. Parallèlement, au cours de ces derniers siècles et dans de nombreux endroits du globe, le bois a largement été remplacé par le béton et l'acier en tant que matériau de construction ainsi que par les sources d'hydrocarbures fossiles en tant que combustible.

Le débat récent sur le changement climatique déclenché par les niveaux croissants de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère a toutefois suscité un regain d'intérêt pour le bois en tant que matière première pour la production de biomasse générant de l'énergie renouvelable ou en tant que matériau de construction, étant donné que son utilisation pourrait avoir un effet positif sur le bilan carbone de l'atmosphère.

Incidences et évolutions possibles

Si le secteur des transports passe progressivement des moteurs à combustion à l'énergie électrique, particulièrement pour les transports servant aux trajets courts, nous pouvons nous attendre à ce que les secteurs où les systèmes de propulsion à base d'hydrocarbures restent l'option la plus avantageuse, tels que les transports maritimes ou aériens, soient maintenus.

Dans le cadre des efforts actuellement déployés pour promouvoir la transition vers des sources d'énergies renouvelables, le bois peut jouer un rôle important, non seulement en tant qu'alternative au charbon utilisé dans les centrales électriques, mais également en tant que matière première pour la production de carburants liquides ou gazeux destinés aux transports.

Dans le secteur de la construction, le remplacement de l'acier et du béton par le bois pourrait avoir d'importants effets sur le bilan carbone. Alors que la production d'acier et de béton libère actuellement d'énormes quantités de CO₂ dans l'atmosphère, passer à une industrie du bâtiment utilisant le bois permettrait un captage à grande échelle du carbone présent dans l'atmosphère grâce aux arbres ainsi qu'un stockage important de ce carbone dans nos constructions. Le bois est de plus en plus souvent redécouvert en tant que matériau de construction, que ce soit pour les constructions résidentielles ou pour les constructions industrielles. Les études indiquent qu'une utilisation du bois plus répandue permettrait de capturer assez de carbone pour contrebalancer la moitié des émissions nettes de CO₂ émises par les transports. Le bois en tant que matériau de construction présente de nombreux avantages, tels que l'isolation thermique et sonore ainsi que la régulation de l'humidité, ce qui pourrait avoir des conséquences positives pour les occupants des bâtiments.

Ces deux dernières années, la promotion des énergies renouvelables pour la production électrique a entraîné la construction de nombreuses centrales électriques utilisant le bois pour combustible à grande échelle. Leur empreinte carbonique dépend toutefois largement des sources du bois utilisées. En outre, pour être efficaces, ces centrales doivent être grandes, et trouver suffisamment de bois dans le voisinage immédiat pour assurer leur fonctionnement pourrait s'avérer problématique. Si le bois doit être transporté sur de longues distances jusqu'à ces centrales, l'impact environnemental de ces installations utilisant le bois pour combustible est bien moins positif.

En parallèle, la hausse du coût des carburants fossiles a suscité un regain d'intérêt pour l'utilisation du bois à des fins de chauffage domestique. Cependant, l'utilisation de bois de chauffage qui n'est pas suffisamment sec dans des cheminées ouvertes et mal adaptées peut constituer une source importante de pollution atmosphérique intérieure et extérieure. Si nous souhaitons exploiter le bois dans l'objectif de contribuer de façon positive à l'impact environnemental de la production d'électricité et de chauffage, nous devons optimiser notre façon de collecter et d'utiliser le bois dans des centrales électriques décentralisées et/ou distribuer la chaleur par l'intermédiaire de systèmes de chauffage urbains plutôt que par une multitude de cheminées domestiques.

Une recrudescence de l'intérêt pour le bois en tant que matière première et source d'énergie renouvelable engendrera certainement une pression visant à reconvertir les terres agricoles moins productives en forêts, ce qui devrait alors être compensé par une hausse de la productivité des terres restantes ou par une réduction du gaspillage alimentaire.

Si la surface forestière de l'Europe septentrionale est encore relativement dense, un regain d'intérêt pour le bois accompagné d'une campagne de reforestation pourrait avoir une incidence considérable en Europe méridionale et dans le nord de l'Afrique, où la superficie forestière a décliné depuis les débuts de la civilisation humaine.

Ces dernières décennies, de nombreux projets de reforestation ont montré que l'expansion de la région couverte par le désert du Sahara pourrait être contrecarrée. Toutefois, ces initiatives ont jusqu'à présent été limitées à l'échelle régionale. Une nouvelle et vaste campagne coordonnée dans les pays du sud de l'Europe et du nord de l'Afrique dans le but de reboiser l'ensemble des terres disponibles pourrait avoir une incidence considérable sur les niveaux de CO₂ dans l'atmosphère. Dans le même temps, elle pourrait entraîner le basculement des conditions climatiques régionales chaudes et sèches à des conditions plus humides et tempérées, telles que l'on en trouve à ces latitudes dans d'autres parties du monde. Pour un coût relativement modéré, qui avoisine les dix milliards d'euros, la reforestation pourrait créer des millions d'emplois et constituer le catalyseur du développement d'une nouvelle économie durable reposant sur le bois dans la région méditerranéenne.

Élaboration d'une politique d'anticipation

Contrairement aux cultures agricoles, la plantation d'arbres et de forêts requiert une vision et une démarche à plus long terme. De surcroît, les campagnes de reforestation n'auront de succès à long terme que si un nouveau secteur économique reposant sur le bois est créé en parallèle. L'élaboration des politiques pourrait jouer un rôle essentiel à plusieurs niveaux. Pour être mise sur pied, une campagne de reforestation exigerait dans un premier temps la mise à disposition de fonds publics ainsi que des campagnes d'information et de communication pour garantir la participation des populations locales à l'effort général. Le soutien de la population pourrait en outre être renforcé par l'organisation d'un transfert de technologie systématique qui permettrait une meilleure utilisation des forêts en croissance.

Exploiter davantage le bois en tant que matériau de construction dans le secteur du bâtiment nécessite une mise à jour rapide des normes de construction, à mesure que la technologie du bois évolue.

L'exploitation plus généralisée du bois en tant que biomasse pour la production d'énergie renouvelable pourrait profiter d'un système de collecte des ressources en bois disponibles au niveau local plus efficace, tout en dissuadant les particuliers de brûler du bois pour se chauffer ou cuisiner.

Alors que la population mondiale ne cesse d'augmenter, il serait problématique d'étendre les surfaces réservées à la plantation de forêts aux dépens des terres agricoles utilisées pour la production alimentaire. Au lieu de cela, nous devrions nous tourner vers des zones impropres à la culture agricole, par exemple les régions plus arides. Les programmes de recherche publics pourraient optimiser certaines espèces d'arbres pour la culture au sein de ces environnements moins favorables, et la technologie satellitaire pourrait aider à contrôler les programmes de reforestation et à maximiser leur incidence sur le climat régional et mondial.

5. Agriculture de précision

Généraliser l'agriculture de précision en Europe pourrait-il nous permettre de stimuler la résilience alimentaire tout en garantissant la durabilité et l'emploi et en tenant compte de la grande diversité de l'agriculture dans l'Union?

L'agriculture de précision (AP) désigne le recours à la technologie pour améliorer le rapport entre les produits agricoles (en général, des denrées alimentaires) et les intrants agricoles (foncier, énergie, eau, engrais, pesticides, etc.). Elle consiste à utiliser des capteurs pour déterminer précisément (dans l'espace et dans le temps) les besoins des cultures ou du cheptel et intervenir ensuite de manière ciblée pour pousser au maximum la productivité de chaque plante ou de chaque animal tout en réduisant au minimum tout gaspillage des ressources.



© Kletr / Fotolia

Cette technologie jouera un rôle clé dans le développement agricole des prochaines décennies. L'AP pourrait contribuer à nourrir la population mondiale qui ne cesse d'augmenter, y compris avec des rendements faibles et des surfaces agricoles qui se rétrécissent. En effet, elle offre d'ores et déjà des solutions technologiques pour obtenir plus de rendement agricole avec moins d'intrants. Par exemple, les systèmes de surveillance qui utilisent des capteurs améliorent les prévisions de rendement et fournissent aux agriculteurs de meilleures informations et des alertes anticipées sur l'état de leurs cultures. Une autre promesse de l'AP est de réduire les effets négatifs du secteur agricole sur l'environnement. Selon Eurostat, l'agriculture est la source de 10 % des émissions de gaz à effet de serre de l'Union. Il y a en outre de quoi s'inquiéter au sujet de l'abus d'engrais et de pesticides comme de l'érosion des sols. L'AP pourrait être d'une aide précieuse pour résoudre ces problèmes.

Incidences et évolutions possibles

La principale promesse de l'AP est qu'elle permettra de produire davantage de denrées alimentaires en diminuant les intrants, tels que les engrais et les pesticides, donnant alors lieu à une agriculture à la fois plus productive et plus durable. Comme l'a récemment souligné une étude de la STOA, elle peut également contribuer activement à la sécurité alimentaire. L'AP peut essentiellement se traduire par les approches suivantes:

- des systèmes de direction automatisés, capables d'optimiser l'utilisation des machines agricoles dans les champs, qui seraient associés à des techniques avancées de géocartographie, utilisées pour collecter et fournir des données sur les propriétés du sol et la teneur en nutriments de champs particuliers;
- la télédétection, qui collecte des données à distance pour évaluer l'état du sol et la santé des cultures en mesurant des paramètres comme l'humidité, les nutriments, le tassement du sol et l'état phytosanitaire. Des mesures thermiques, optiques, mécaniques et chimiques par des capteurs servent à quantifier la biomasse des cultures, le stress des plantes, les ravageurs, les maladies, les propriétés du sol, les conditions climatiques et le comportement des animaux;
- des robots agricoles spécialisés qui, à l'avenir, pourront minimiser le tassement du sol dû au poids considérable des machines. On pourrait même envisager de recourir à des robots en essaim, c'est-à-dire à des groupes de robots simples, mais aux fonctions multiples, qui peuvent être coordonnés et

répartis de façon décentralisée en fonction des tâches à accomplir. De telles machines seraient plus légères et pourraient intervenir en fonction des besoins, en restant en permanence dans les champs.

L'AP pourrait par ailleurs être à l'origine de changements sociétaux. Elle pourrait modifier la perception actuelle de l'agriculture en tant que secteur économique requérant un faible niveau de qualification et accroître son attractivité pour la nouvelle génération. Elle exigerait un investissement important dans les technologies sans fil au sein des régions rurales, comblant le fossé entre ces dernières et les zones urbaines. L'AP pourrait mettre un terme à l'exode rural des particuliers, étant donné que certaines des principales raisons motivant cet exode (telles que la disponibilité des aides, produits et services) pourraient disparaître.

L'idée généralement reçue selon laquelle la mondialisation a fait de nos économies des économies de la connaissance vaut aussi pour l'agriculture. De nouvelles compétences devraient être assimilées afin d'adopter l'AP à grande échelle. Divers types de compétences sont nécessaires pour une exploitation faisant appel à l'AP: technologiques, environnementales et gestionnaires. Les jeunes agriculteurs doivent disposer de la bonne combinaison de compétences professionnelles spécifiques et de compétences de base transdisciplinaires pour pouvoir accéder à l'AP; la profession agricole pourrait donc attirer davantage de jeunes. De plus, les technologies de l'AP pourraient vraiment rehausser le niveau d'éducation dans les zones rurales.

L'AP pourrait également contribuer à changer l'image actuelle de la campagne. Le recours à une technologie plus intelligente réduirait le besoin de champs immenses et monotones dominant le paysage et permettrait le passage à un paysage plus varié de champs, d'arbres, d'arbustes et d'espaces naturels. Elle pourrait en outre avoir une incidence environnementale importante, étant donné qu'elle permettrait un retrait plus sélectif des zones écologiques les plus vulnérables du processus de production agricole.

Toutefois, en ce qui concerne l'AP au sein de l'Union, nous devons également tenir compte du fait que l'agriculture au sein de l'Union à 28 États membres est hétérogène à de nombreux égards. La diversité touche aux modèles économiques, aux secteurs de production, aux pratiques agricoles, à l'emploi, tant en chiffres absolus que par rapport à l'ensemble de la population active, à la formation et aux compétences des exploitants et à la production agricole. Les répercussions sociales de l'AP seraient plus importantes dans les pays qui comptent le plus de travailleurs dans le secteur agricole.

Élaboration d'une politique d'anticipation

La grande diversité de l'agriculture dans l'Union, notamment en ce qui concerne la taille des exploitations, les types d'agriculture, les pratiques agricoles, la production et l'emploi, représente un défi pour les décideurs politiques européens. Les mesures politiques européennes devraient établir une distinction entre les États membres, en tenant compte du fait que les opportunités et les préoccupations varient considérablement d'un pays à l'autre.

Quel que soit le contexte économique dans les prochaines décennies, les agriculteurs européens auront besoin de l'AP pour améliorer leurs rendements sur des terres arables moins disponibles.

La recherche et le développement joueront un rôle moteur essentiel dans le développement des emplois agricoles de demain. En conséquence, d'importantes modifications de la politique agricole commune (PAC) pourraient être envisagées sur la période 2021-2027 en vue de renforcer la recherche et le développement dans le secteur agricole. Il serait possible, par exemple, d'investir davantage dans les techniques de pointe comme les biocapteurs, la robotique, la spectrographie ou l'imagerie.

L'Union pourrait appuyer sa politique de développement rural en finançant l'innovation agricole et forestière par des mesures qui pourraient soutenir la création de groupes opérationnels, les services d'innovation, les investissements ou d'autres approches. Ce type de programme de promotion des

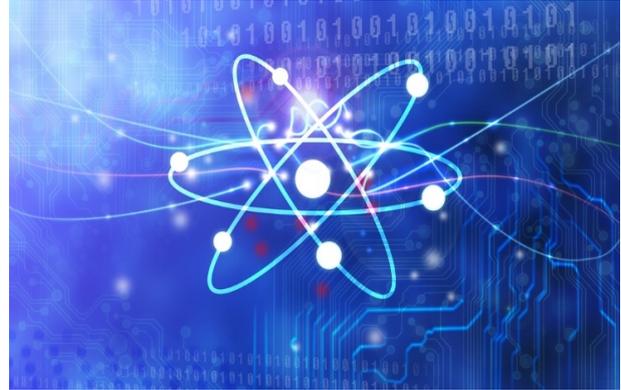
pratiques d'AP pourraient également servir d'autres objectifs sociétaux, tels qu'un développement territorial équilibré ou un apprentissage tout au long de la vie.

Une autre option stratégique envisageable serait de dresser un troisième pilier de la PAC (2021-2027) qui serait voué aux technologies écologiquement durables.

6. Technologies quantiques

La théorie bien établie, quoique parfois jugée absurde par les non-scientifiques, de la mécanique quantique pourrait-elle un jour révolutionner les dispositifs techniques ordinaires, tels que les capteurs, les appareils de communication et les ordinateurs?

La mécanique quantique est une théorie scientifique qui a révolutionné notre compréhension de l'univers, particulièrement à l'échelle microscopique. Dans le monde de la physique classique, un système est toujours dans un état particulier (par exemple, un corps peut être au repos ou en mouvement à une vitesse bien définie), alors que dans le monde quantique, un système peut être caractérisé par la superposition de deux ou plusieurs états. La mesure d'une telle superposition en provoque «l'écroulement» en un seul état. Ainsi, contrairement à la pensée classique, selon laquelle un système peut être mesuré sans être modifié, dans le monde quantique, une mesure peut avoir d'importantes répercussions sur l'état d'un système.



© Winiu / Shutterstock.com

Incidences et évolutions possibles

Aussi irrationnelle que la théorie quantique puisse paraître aux yeux d'un non-initié, elle constitue pourtant d'ores et déjà le point de départ de nombreuses technologies ordinaires, telles que celles du transistor et du laser. Toutefois, les scientifiques sont désormais capables de contrôler les états microscopiques de systèmes quantiques individuels avec une grande précision. Cette capacité pourrait se traduire par le développement de nouvelles technologies, qui peuvent être réparties en trois domaines: la détection, la cryptographie et l'informatique.

Les détecteurs quantiques englobent un large éventail d'appareils qui utilisent les effets quantiques afin de mesurer avec une grande précision des quantités telles que le temps, la gravité et le champ magnétique. La plupart de ces appareils pourraient être commercialisés au cours des prochaines années, notamment les horloges à logique quantique, qui surpassent déjà, et de loin, leurs homologues classiques.

La cryptographie est habituellement réalisée lorsque le destinataire d'un message distribue une «clé» publique permettant à une personne de crypter un message qui ne peut être décrypté qu'à l'aide de la clé privée que possède le destinataire. Cette méthode dépend de la difficulté informatique à distinguer la clé privée et la clé publique, étant donné qu'il est possible qu'un pirate informatique puisse trouver la clé publique en interceptant des communications entre les deux parties. La cryptographie quantique est (du moins, en théorie) impossible à pirater, car elle repose sur la loi fondamentale selon laquelle mesurer un système quantique transforme ledit système – en utilisant un tel système pour transmettre des informations, deux parties en communication peuvent savoir si un tiers écoute leurs messages.

L'informatique quantique est certainement la technologie qui recèle le plus grand potentiel, même si elle sera certainement la dernière à être développée. Les ordinateurs ordinaires utilisent des «bits» pour stocker et traiter des informations. Il s'agit de composants électroniques ne pouvant se présenter que sous deux états, représentés par les chiffres «0» et «1». Un ordinateur quantique permettrait également une «superposition quantique» de ces deux états, qui pourraient alors être à la fois «0» et «1». Cette superposition accélérerait largement le calcul de problèmes, dont certains mettraient des milliards

d'années avant d'être résolus par un ordinateur ordinaire, alors que seules quelques heures suffisent à un ordinateur quantique.

Un ordinateur quantique a plusieurs fonctions connues. L'une d'entre elles consiste à déterminer la manière dont d'autres systèmes quantiques se comportent, ce qui influencerait la mise au point de nouvelles substances chimiques, de nouveaux médicaments et matériaux, alors qu'il est actuellement nécessaire de créer et de tester une nouvelle substance afin d'en prouver l'utilité ou le danger. L'ordinateur quantique peut également être utilisé dans le cadre de l'intelligence artificielle, même si les améliorations qu'il a à offrir dans ce domaine restent vagues.

Si les technologies quantiques peuvent aider à résoudre divers problèmes, elles peuvent également en créer de nouveaux. Par exemple, l'informatique quantique pourrait à l'avenir permettre d'enfreindre les protocoles de cryptographie existants. Toutefois, cette menace représente une extraordinaire motivation pour le développement de la cryptographie quantique, qui offrirait une protection contre ce type d'attaque. Pour garantir la sécurité permanente de nos systèmes de cryptage, il faudrait alors que des avancées réalisées dans le domaine de la cryptographie quantique suivent le rythme des progrès de l'informatique quantique.

Cependant, l'ordinateur quantique de l'avenir pourrait être utilisé pour décrypter non seulement les transmissions futures, mais également des données interceptées et enregistrées au cours de décennies passées. Ainsi, à moins qu'il soit prouvé que l'informatique quantique est un projet irréalisable, les organisations souhaitant protéger leurs informations actuelles au cours des prochaines décennies garderont sans doute un intérêt certain envers les systèmes cryptographiques quantiques.

Élaboration d'une politique d'anticipation

L'intérêt public et privé dans le développement des technologies quantiques est déjà considérable. Les Pays-Bas et le Royaume-Uni ont développé des programmes dans ce domaine qui ont attiré des millions d'euros de financement de la part d'entités publiques et de l'industrie. La Commission européenne a récemment annoncé son projet d'investir un milliard d'euros dans un projet phare dans le domaine des technologies quantiques.

Comme avec bon nombre de nouvelles technologies, il est important d'analyser la manière de surmonter ce que l'on nomme la «vallée de la mort», cette transition entre la phase de recherche scientifique et la commercialisation. D'aucuns estiment que la science sur laquelle reposent les technologies quantiques est bien comprise; c'est pourquoi la recherche va désormais au-delà des expériences de démonstration et se tourne vers la construction de dispositifs utiles. Néanmoins, l'application commerciale d'un grand nombre de ces technologies n'est pas pour demain. En effet, les entreprises privées continuent de financer principalement les technologies conventionnelles. Les programmes d'investissement public seront importants pour que la viabilité commerciale des technologies quantiques soit envisageable et, à cet égard, l'efficacité des programmes en vigueur devrait être contrôlée.

L'un des aspects qui nécessiteraient d'importants investissements publics est notamment l'infrastructure essentielle à la cryptographie quantique. Cette technologie pourrait requérir l'installation de fibres optiques spéciales pour transmettre des photons uniques (particules de lumière) de manière à maintenir leur état quantique. La Chine, le Japon, les États-Unis et certains États membres ont d'ores et déjà lancé des initiatives visant à développer cette infrastructure. Afin de permettre la communication quantique dans toute l'Union, ainsi que dans le monde, un réseau ininterrompu est nécessaire. Une autre option serait de développer de nouveaux protocoles de cryptage «post-quantiques» dont les algorithmes quantiques qui pourraient être utilisés afin de les percer seraient inconnus.

Quant aux ordinateurs quantiques, la question des capacités qu'ils pourraient posséder représente toujours un domaine de recherche actif. La possibilité de percer des protocoles de cryptographie existants

pourrait avoir des conséquences négatives. En outre, il se peut que davantage d'applications néfastes soient développées à l'avenir. De telles éventualités incluent la capacité de pirater d'autres protocoles de sécurité actuellement considérés comme protégés des attaques quantiques. Il serait donc prudent de réglementer l'accès à de tels dispositifs. Cependant, cette industrie émergente pourrait reposer sur un modèle commercial permettant aux utilisateurs de soumettre leurs problèmes en ligne; une telle réglementation risquerait alors d'être impossible à réaliser. En outre, la réglementation peut nuire à la possibilité d'une forte accélération des progrès technologiques, réduisant ainsi les bénéfices qui en résulteraient pour la société.

Les technologies quantiques offrent de fascinantes possibilités, qui doivent encore être pleinement explorées. Les avancées dans ce domaine pourraient être stimulées par une hausse de l'investissement public. Les responsables politiques doivent toutefois accorder une grande attention aux progrès réalisés dans le domaine afin de minimiser les conséquences négatives qui peuvent résulter de ces technologies.

7. Étiquettes d'identification par radiofréquence

Quelles seront les conséquences des étiquettes d'identification par radiofréquence, et autres appareils de communication à courte portée, sur la façon dont l'internet des objets transforme notre mode de vie?

L'identification par radiofréquence (RFID) est une technologie actuellement introduite à grande échelle et visant à remplacer les codes-barres pour l'étiquetage des biens de consommation. À la lumière des récents scandales alimentaires, cette technologie pourrait, entre autres, faciliter la traçabilité des denrées alimentaires et des boissons de façon plus efficace et exhaustive que les codes-barres.



© Andrey Nikolaev / Shutterstock.com

La RFID est également la technologie sur laquelle reposent les étiquettes que l'on trouve aujourd'hui couramment sur certains de nos vêtements, livres ou autres produits et qui peuvent être facilement reconnaissables grâce à une sorte de spirale ou à un morceau d'aluminium, qui fonctionne comme une antenne. Cette technologie permet de détecter les produits lorsqu'ils franchissent un portail équipé d'un lecteur adapté. Elle ressemble à certains anciens systèmes antivol, mais les produits spécifiques peuvent désormais être identifiés exceptionnellement à d'autres fins, comme la facturation ou la consultation de leurs caractéristiques. Cela est rendu possible par le numéro de reconnaissance figurant sur l'étiquette, qui est désormais différent du numéro présent sur les codes-barres et qui est structuré de manière à pouvoir être utilisé pour accéder automatiquement à des bases de données contenant des informations supplémentaires sur l'internet.

Cette capacité du lecteur d'accéder à une multitude d'informations connexes, en plus de reconnaître le produit, a donné le jour à de nouvelles idées, telles que les objets intelligents ou l'internet des objets. Un objet intelligent est un objet qui améliore ses interactions non seulement avec les individus, mais également avec d'autres objets intelligents. L'internet des objets est l'intégration des dispositifs physiques, véhicules, bâtiments et autres objets électroniques, logiciels, capteurs, mécanismes et connectivité réseau qui permet à ces objets de collecter et d'échanger des données.

De nouvelles mises en application de ces idées apparaissent constamment et la recherche dans ce domaine est florissante. Les étiquettes RFID pourraient se révéler utiles au cours du cycle de vie des produits, de l'étape du rassemblement des parties nécessaires ou matières premières et tout au long de la fabrication et des chaînes d'approvisionnement, y compris le point de vente, jusqu'aux processus de recyclage et de gestion des déchets. Elles pourraient raccourcir le temps d'attente aux supermarchés, étant donné que tous les produits contenus dans le chariot peuvent être instantanément reconnus. Les utilisateurs pourraient aussi tirer profit des avantages de la capacité des objets à fournir un accès à des informations connexes, telles que les instructions d'utilisation, qui peuvent être automatiquement consultées à l'aide d'appareils. Par exemple, un sac de nourriture pourrait mettre à jour la température du congélateur pour une conservation adéquate ou l'avertir à propos des produits arrivant à expiration, ou informer le four à micro-ondes de la température et de la durée de cuisson adaptées.

Néanmoins, le concept du suivi d'objets a soulevé certaines inquiétudes. Si un ordiphone sera probablement toujours considéré comme un objet relativement visible, l'étiquette «cachée» dans un objet permettant mystérieusement d'accéder à une quantité importante d'informations peut-être considérée comme une menace.

Incidences et évolutions possibles

Il est important de noter que, pour des raisons d'efficacité et de prix, les étiquettes RFID basiques qui permettent de suivre les biens des clients utilisent la bande à ultra-haute fréquence (UHF) et sont passives (c'est-à-dire qu'elles n'ont pas de batteries). Il convient de préciser ces caractéristiques, car elles définissent les propriétés et les capacités de l'étiquette. L'utilisation de l'UHF signifie que les étiquettes peuvent être lues à une distance relativement longue sous certaines conditions, mais l'absence de batteries implique qu'elles doivent utiliser l'énergie émanant du signal porteur fourni par les antennes connectées au lecteur. En outre, l'UHF est peu fiable en présence de liquides (qui absorbent l'énergie) ou de métaux (qui reflètent le signal créant des interférences). Tout cela donne nécessairement lieu à des lecteurs assez coûteux et voyants (par exemple sous la forme d'une arche dans un magasin), même si les étiquettes ne le sont pas.

Une autre conséquence des exigences liées à des étiquettes aussi simples (afin d'utiliser très peu d'énergie) est que les protocoles de communication qui leur sont associés sont relativement basiques, ce qui signifie qu'elles ne sont pas sécurisées, étant donné qu'elles n'incluent aucun cryptage ou aucune autre mesure de protection. Des recherches plus approfondies sont actuellement en cours dans ces domaines, mais, pour l'instant, les informations peuvent être manipulées de diverses façons (contrefaçon, espionnage, clonage, hameçonnage, brouillage, entre autres).

Il existe d'autres étiquettes, semblables aux étiquettes RFID à UHF basiques, qui sont également très communes, voire plus simples, comme celles qui utilisent la technologie de communication en champ proche (NFC). La NFC utilise des fréquences plus basses et des étiquettes qui ne peuvent être lues qu'à très courtes distances (habituellement à l'aide d'un appareil portable) et les unes après les autres. L'avantage est qu'elles ne requièrent qu'un lecteur peu coûteux et simple. Cependant, il existe de nombreux autres types d'étiquettes aux capacités améliorées (par exemple équipées de batteries afin de créer des «étiquettes actives»), qui pourraient devenir suffisamment complexes pour une multitude d'utilisations. Les étiquettes actives peuvent inclure des capteurs, des actionneurs ainsi qu'une mémoire importante, et permettre des communications à plus longue distance. Tous ces avantages contribuent à raviver l'inquiétude publique concernant les utilisations de cette technologie.

Élaboration d'une politique d'anticipation

Il convient de noter que les petites étiquettes qui peuvent être cachées dans les objets de la vie quotidienne constituent toujours, à l'heure actuelle, des dispositifs simples et passifs aux capacités limitées (les plus puissantes sont en général plus volumineuses et beaucoup plus voyantes). Il reste donc difficile de lire une étiquette, surtout dans l'Union européenne, où la législation limite la puissance des lecteurs à deux watts (contre quatre watts aux États-Unis). En d'autres termes, les étiquettes ne peuvent être lues qu'à une distance maximale d'environ deux mètres. En outre, les lecteurs, qui fonctionnent de façon assez semblable aux radars, sont facilement détectés et contrôlés par les autorités. Toutefois, il est important de garder à l'esprit que ces étiquettes ont été créées pour de simples biens de consommation. Ainsi, même si les possibilités associées à leur utilisation sont assez vastes, il est peu probable que les étiquettes soient un jour utilisées par un hypothétique «Big Brother».

Pourtant, les développeurs sont très inquiets au sujet de la sûreté de cette technologie pour certaines utilisations. Tout d'abord, il serait important d'imposer une limite réaliste à l'énergie utilisée par les lecteurs, étant donné qu'elle constitue un véritable frein à leur utilisation. Même si une puissance de deux watts semble avoir très peu d'effet sur le corps humain, il est important de tenir compte du fait que l'UHF utilise les mêmes longueurs d'onde que les fours à micro-ondes. Les développeurs craignent ainsi la possible apparition de «points chauds» à certains endroits, qui pourraient nuire aux produits biologiques. Par exemple, les étiquettes RFID à UHF sont utilisées dans les hôpitaux afin de suivre les poches de sang, mais il n'existe apparemment aucune recherche centrée sur les possibles effets des lecteurs sur la conservation de ces produits.

De nombreuses améliorations relatives à la RFID sont encore possibles, mais la technologie est déjà disponible et les utilisations possibles sont multiples. Il est vrai que la technologie n'est pas entièrement garantie comme étant fiable et sécurisée, mais les étiquettes simples créées pour reconnaître les biens de consommation ne peuvent être comparées aux dispositifs pouvant être utilisés pour suivre une personne, tels que les ordiphones. Malgré tout, l'utilisation de cette technologie intéressante peut certainement aider à résoudre les nombreux problèmes qui apparaissent le long des chaînes d'approvisionnement et qui nuisent aux consommateurs. Mieux vaut, sans doute, accepter la mince possibilité que les autorités sachent ce que nous mangeons plutôt que risquer un empoisonnement alimentaire.

8. Mégadonnées et soins de santé

Les mégadonnées peuvent offrir d'immenses nouvelles possibilités dans le domaine de la santé, mais comment garantir qu'elles profitent à tous?

Les progrès dans le domaine des soins de santé ont largement prolongé la durée de vie et amélioré la qualité de vie au cours du siècle passé. Dans le même temps, les soins de santé requièrent une part toujours plus importante du PIB de la plupart des pays du monde.

Dans ce contexte, de nouveaux outils en matière de mégadonnées offrent des perspectives attrayantes, promettant de meilleurs diagnostics, une amélioration de l'efficacité des méthodes de traitement actuelles et l'élaboration de nouveaux traitements, tout cela à l'aide d'efforts moindres par rapport à ceux qu'exigent les méthodes de recherche traditionnelles.



© Panchenko / Shutterstock.com

Incidences et évolutions possibles

Il existe trois différents niveaux qui pourraient bénéficier d'avantages considérables:

- (i) La recherche médicale traditionnelle impliquant des essais ou enquêtes conséquents pourrait être moins coûteuse et plus rapide

Lorsque des essais ou des enquêtes cliniques de grande ampleur sont réalisés afin de tester un nouveau médicament, d'évaluer l'efficacité de nouveaux traitements ou de mieux comprendre certains problèmes de santé, de multiples données sont collectées à partir d'un groupe rassemblant de nombreux patients en vue de répondre à des questions précises. Une fois les études terminées, ces vastes séries de données sont souvent archivées sans autre examen, en dépit du fait qu'elles pourraient aider d'autres chercheurs à répondre à des questions soulevées lors de recherches dans le même domaine. Par conséquent, les scientifiques s'efforcent actuellement de faciliter l'accès à ces données pour la communauté scientifique dans son ensemble, permettant de fournir de nouvelles observations pour des coûts supplémentaires minimes.

Néanmoins, avant que ces données ne soient rendues accessibles à toute la communauté scientifique, elles doivent être anonymisées, ce qui peut parfois représenter une charge de travail considérable. L'utilisation de séries de données préexistantes afin de répondre à de nouvelles questions posées par la recherche pourrait toutefois permettre aux chercheurs d'éviter toute duplication des efforts et, dès lors, réduire le temps et les coûts relatifs à la conduite de nouvelles études.

- (ii) De nouveaux capteurs facilitent grandement la collecte de séries de données

Au quotidien, de plus en plus d'appareils et de capteurs intelligents nous entourent; ils indiquent notre position géographique, comptent nos pas, surveillent notre façon de conduire et notre degré de vigilance lorsque nous conduisons, et bien plus encore. Les données enregistrées par des capteurs plutôt que par des personnes remplissant des questionnaires sont souvent plus objectives et, grâce à la baisse constante du coût des capteurs, de plus nombreux paramètres pourraient être évalués pour de plus grands groupes

de candidats, révolutionnant la façon dont nous menons nos recherches et contrôlons l'efficacité des traitements.

(iii) Services de soins de santé individualisés

En plus de faciliter les études menées sur de grands groupes de candidats, le nombre croissant de capteurs qui nous entoure au quotidien (dans les appareils portatifs que nous emmenons, les vêtements que nous portons, les voitures que nous conduisons, et bien d'autres objets) permettra également une prestation toujours plus personnalisée des services de santé. Tout comme les capteurs dans les voitures surveillent déjà la fréquence des clignements d'yeux afin de prévenir le conducteur en cas de somnolence, les capteurs présents dans nos vêtements pourraient, à l'avenir, nous avertir d'un risque important d'attaque cardiaque ou nous prévenir que notre système immunitaire est particulièrement faible et que nous risquons d'attraper la grippe.

Bien que ces nouvelles technologies promettent d'importants progrès sanitaires, elles posent également un certain nombre de défis à la société, notamment en matière de protection des données.

La protection des données est déjà un point essentiel à considérer lors de toute étude clinique. Si les chercheurs intensifient le partage des séries de données à l'avenir, il est d'autant plus important que les normes en matière de protection des données prévoient une protection efficace pour les participants à l'étude. Il sera en outre essentiel de garantir le respect des procédures de consentement éclairé pour les cas où les données fournies par des sujets humains (patients ou témoins) sont utilisées dans un projet autre que celui pour lesquelles elles avaient initialement été collectées.

Le nombre croissant de capteurs qui nous accompagnent au quotidien, et qui rassemblent d'ores et déjà de plus en plus de paramètres relatifs à notre santé et à notre bien-être, engendrera d'autres défis. Les fabricants de téléphones portables, les opérateurs de télécommunications ainsi que les moteurs de recherche internet collectent déjà des quantités énormes de données relatives à la santé de leurs clients, alors qu'ils ne sont pas encore considérés comme des acteurs du secteur de la santé. Ce problème sera encore plus important lorsque de simples appareils, comme les téléphones portables, pourront faire une évaluation complète de l'état de santé de leurs utilisateurs à partir des paramètres de plus en plus nombreux qu'ils recueillent.

Élaboration d'une politique d'anticipation

En sus du besoin permanent de mettre à jour les normes en matière de protection des données et de confidentialité à mesure que la technologie évolue, il convient d'examiner des questions plus générales concernant les personnes qui devraient bénéficier de ces progrès technologiques. Par exemple, les capteurs que nous portons pourront-ils détecter un cancer à un stade précoce, augmentant ainsi les chances de guérison et diminuant le coût du traitement? Ou, au contraire, ces technologies permettront-elles aux assurances d'augmenter les tarifs pour les personnes souffrant d'un cancer?

Bien que les règles en matière de protection des données soient continuellement mises à jour, dans un monde de plus en plus interconnecté, il pourrait devenir de plus en plus compliqué de cacher le fait qu'une personne souffre d'une maladie particulière, comme le cancer. Il nous faudra trouver le bon équilibre entre l'intérêt de chacun vis-à-vis de la confidentialité entourant son état de santé et les avantages que pourrait offrir à la société un accès simplifié à des données médicales rendues anonymes et qui pourraient constituer la clé d'innovations et de découvertes médicales.

Étant donné que même les meilleures législations ne pourraient garantir une confidentialité en toutes circonstances (et que nous devons donc envisager qu'une maladie, telle qu'un cancer, puisse être rendue publique), les législateurs pourraient fournir une protection supplémentaire en adoptant une loi qui minimiserait le potentiel de discrimination. Par exemple, un système qui prévoit de partager les coûts du

traitement contre le cancer dont souffre un patient entre toutes les compagnies d'assurance santé réduira le risque, pour un patient donné, d'être la cible de discrimination de la part d'une compagnie d'assurance en raison de ses antécédents ou du risque qu'il présente de développer un cancer.

9. Organoïdes

Les organoïdes sont des organes créés artificiellement qui imitent les propriétés de véritables organes. Quelles sont les nouvelles possibilités qu'offrent les organoïdes pour le traitement de maladies, l'élaboration de médicaments et la médecine régénérative et personnalisée?

Les organoïdes sont des amas de cellules humaines qui sont cultivées en laboratoire afin de former des structures tridimensionnelles imitant les fonctionnalités de véritables organes, tels que le foie, le cœur ou les poumons. Les organoïdes peuvent être soit générés à l'aide de cellules progénitrices d'organes adultes, soit dérivés d'une ou de quelques cellules tissulaires, de cellules souches



© Ociacia / Shutterstock.com

embryonnaires ou de cellules souches pluripotentes induites, qui peuvent s'auto-organiser au sein d'une culture tridimensionnelle grâce à leurs capacités d'autorégénération et de différenciation. Ces amas de cellules sont souvent cultivés dans des microconteneurs spécialement fabriqués à ces fins, qui aident les cellules à s'organiser comme elles le feraient au sein d'un organe dans un corps humain. Elles ressemblent étroitement au tissu humain *in vivo*, possèdent les caractéristiques génétiques des individus dont elles sont issues et, dès lors, réagissent aux médicaments de la même manière que l'organe de l'individu en question le ferait. Ces structures semblables à celles des organes, qui peuvent être stockées dans des banques de données biologiques, ne sont pas seulement un outil puissant permettant une meilleure compréhension des processus fondamentaux qui gouvernent l'évolution des organes dans le corps humain: ils promettent également des avantages directs pour le traitement des patients et l'élaboration de médicaments.

Incidences et évolutions possibles

Étant l'un des modèles les plus accessibles et les plus pertinents, d'un point de vue physiologique, pour l'étude des dynamiques des cellules souches dans un environnement contrôlé, les organoïdes devraient nous permettre de mieux comprendre le renouvellement des tissus, les fonctions des cellules souches ou de leurs niches et les réactions des tissus aux médicaments, aux mutations ou aux dommages, et de lever le voile sur le mystère de plusieurs maladies cérébrales et troubles neurologiques. L'essor d'une technologie qui permet aux scientifiques de cultiver de la matière possédant les caractéristiques du cerveau, du foie, des reins, des intestins et d'autres organes est considéré comme une étape importante vers la reconstitution des fonctions d'un organe *ex vivo*. D'autres possibilités incluent la fourniture d'un modèle sain pour les examens précliniques, les thérapies ciblées et personnalisées, les applications en médecine régénérative et les analyses toxicologiques environnementales.

Grâce aux progrès réalisés dans la génération d'organoïdes, l'utilisation de ces derniers est passée d'un outil de recherche basique à une plateforme de transposition dotée de multiples fonctions et utilisations en aval, que les essais sur animaux ne peuvent proposer; elle pourrait même révolutionner le processus de découverte de médicaments. Des intestins miniatures peuvent, par exemple, servir d'outils d'essai pour des médicaments personnalisés visant à traiter la mucoviscidose, tandis que les chercheurs commencent à utiliser des organoïdes cérébraux en tant que modèles exacts pour l'étude de nombreuses maladies, telles que l'autisme, la schizophrénie et l'épilepsie.

En outre, les organoïdes reposant sur des cellules hépatiques pourraient intervenir en tant que compléments à la transplantation d'organes telle que nous la connaissons aujourd'hui afin de restaurer les

fonctions hépatiques des patients souffrant d'une maladie hépatique métabolique et de servir de modèles pour la croissance de métastases, ainsi que pour étudier la réaction des cellules tumorales aux médicaments, qu'ils aient été récemment découverts ou non. Les organoïdes pancréatiques dérivés de cellules pancréatiques adultes comptent parmi les technologies les plus prometteuses en matière de thérapie régénérative et cellulaire. Ces «intestinoïdes» permettent déjà l'étude de nouveaux traitements contre la mucoviscidose et le cancer colorectal. Récemment, des scientifiques ont mis sur pied la première «banque de données biologiques vivante» afin de conserver les tumeurs des patients, et ont utilisé les tissus pour identifier les médicaments les plus aptes à guérir la maladie de chaque patient. Pendant ce temps, d'autres scientifiques progressent dans la création de plus grands amas de cellules nerveuses, avançant vers l'élaboration d'organoïdes de la taille du cerveau. Dans un avenir proche, l'utilisation des organoïdes commencera à entrer dans la routine médicale. Ceux-ci seront utilisés comme un moyen d'attirer l'attention sur des maladies apparues lors du développement embryonnaire ou pourront peut-être même être transplantés afin de remplacer des organes naturels malades ou défaillants. Les organoïdes sont également utilisés afin d'étudier les défaillances, par exemple, de neurones prélevés directement chez des patients atteints de la maladie d'Alzheimer.

En dépit de l'aide que pourraient apporter les organoïdes aux chercheurs dans la compréhension de la manière dont les véritables organes se développent ainsi que des problèmes qui peuvent survenir au cours de ce processus, l'intégration d'organoïdes en tant que systèmes reproductibles et simples à mettre en œuvre ainsi que leur production commerciale comportent des risques sanitaires et éthiques, les méthodes de culture qui n'en étant encore qu'à leurs balbutiements. Les organoïdes personnalisés peuvent faciliter le déploiement d'essais médicaux personnalisés qui, à leur tour, pourraient entraîner de nouveaux risques et des préoccupations relatives à leur accessibilité.

Des conflits similaires peuvent naître en relation avec le type de tissu généré. Plus les scientifiques s'approchent de la création d'un cerveau humain, plus des questions d'éthique se posent. Les concepts d'intégrité humaine dans ce contexte pourraient être gravement menacés.

Législation d'anticipation

Bien qu'un grand nombre de ces technologies soient encore relativement nouvelles et doivent encore être mieux validées et caractérisées, le fait que les organoïdes créés à l'aide de tissus cultivés à partir de cellules souches issues de participants puissent être stockés pendant une très longue période, voire une période pratiquement infinie, met en exergue la nécessité de légiférer sans plus tarder. Les obligations en matière de vie privée, les conditions de participation aux programmes de recherche et aux essais cliniques, la conservation et l'utilisation d'organoïdes, ainsi que la diffusion des résultats comprenant des découvertes accidentelles sont des éléments qui requièrent notre attention. Le consentement éclairé est un problème majeur concernant la sélection des participants et la collecte de leurs cellules souches à partir de tissu résiduel. Le stockage des organoïdes requiert en outre l'élaboration de procédures de consentement éclairé individualisées qui répondent aux défis liés au fait que les organoïdes constituent en réalité des organes vivants miniatures qui pourraient être utilisés à de nombreuses fins, ainsi qu'au manque de cadre juridique à l'échelle de l'Union européenne sur les banques de données biologiques.

L'utilisation d'organoïdes peut compléter, voire réduire le nombre d'essais sur animaux et la participation d'humains au cadre expérimental, ce qui, à son tour, peut entraîner la modification du cadre actuel des essais de médicaments, des essais cliniques et de l'autorisation des substances chimiques.

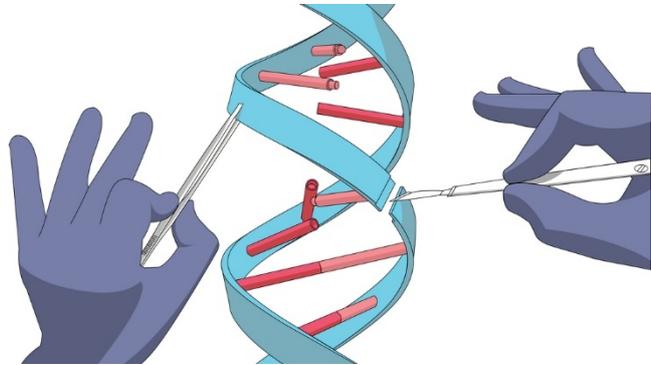
La question de la propriété et de la marchandisation d'éléments corporels constitue un autre point central, tout comme la question de savoir à quel point un modèle de développement humain in vitro doit être proche de la réalité pour à la fois avoir une valeur scientifique et être éthiquement acceptable. Face à l'intérêt grandissant que suscite la technologie organoïde, le développement commercial de nouveaux

moyens normalisés et validés pour la culture d'organoïdes sera également essentiel afin de garantir l'accès au système organoïde de nombreux universitaires et scientifiques, ce qui aidera à maximiser son potentiel.

10. Édition génomique

Une nouvelle technologie visant à simplifier l'édition génomique pourrait donner naissance à une nouvelle ère de la modification génétique. Quels sont les avantages et les éventuels dangers de cette technique, et comment les responsables politiques peuvent-ils y faire face?

La capacité de concevoir des génomes de façon spécifique, systématique et peu coûteuse est un objectif que les chercheurs en sciences génomiques poursuivent depuis bon nombre d'années. Plusieurs technologies d'«édition génomique» ont récemment été développées afin d'améliorer les méthodes de ciblage des gènes, y compris les systèmes CRISPR-Cas, les nucléases effectrices de type activateur de transcription (TALEN) et les nucléases à doigt de zinc (ZFN). Le système CRISPR-Cas9 est actuellement le système d'édition génomique le plus rapide, le moins onéreux et le plus fiable. Il est considéré comme l'un des principaux atouts dans le domaine de l'édition génomique en raison de son haut degré de fiabilité et d'efficacité, ainsi que de son faible coût. Cette trajectoire technologique devrait renforcer notre capacité à cibler et à étudier des séquences d'ADN particulières d'un génome. Le système CRISPR-Cas9 est à même de séparer l'ADN de tout génome à tout endroit de n'importe quel type d'organisme, de remplacer la séquence d'ADN ou d'y ajouter des parties en introduisant la protéine cas9, et de guider correctement l'ADN dans une cellule. Cet outil extrêmement puissant pourrait aider les biologistes moléculaires à explorer le fonctionnement du génome.



© Perception7 / Shutterstock.com

Incidences et évolutions possibles

Le système CRISPR-Cas9 est un outil qui recèle un potentiel important pour la modification ou la correction directe de variations génomiques associées à l'apparition de maladies fondamentales et pour l'élaboration de traitements reposant sur les tissus et permettant de lutter contre le cancer et d'autres maladies en perturbant les gènes à l'origine de maladies endogènes, en corrigeant les mutations induisant des maladies ou en insérant de nouveaux gènes dotés de fonctions protectrices. Les chercheurs espèrent recourir au système CRISPR-Cas9 afin d'adapter les gènes humains pour qu'ils éliminent les maladies, luttent contre les microbes en évolution constante qui pourraient endommager les cultures ou éliminent les pathogènes, et même afin de modifier les gènes des embryons humains.

Le système CRISPR-Cas9 peut être utilisé afin de modifier, de façon relativement précise et simple, les gènes de nombreux organismes, mais aussi de mettre au point des modèles animaux pour la recherche fondamentale. L'édition génomique des animaux pourrait améliorer la résistance aux maladies, contrôler les populations de moustiques afin de réduire ou d'anéantir les risques de transmission de la malaria, voire mener à la mise au point de médicaments élaborés à l'aide d'animaux domestiques ou à une meilleure production des denrées alimentaires. Le système pourrait également faciliter la transplantation d'organes animaux chez l'homme en éliminant les copies de rétrovirus présentes dans les génomes animaux qui peuvent nuire aux receveurs humains.

La modification de l'ADN d'un embryon humain est également possible grâce à la technologie CRISPR-Cas9, qui pourrait, à terme, entraîner des changements profonds dans le bien-être humain, avec des conséquences sur l'espérance de vie, l'identité et la production économique des êtres humains. Cette technologie peut également être utilisée afin de créer un «gène moteur», autrement dit un gène sélectionné

qui sera de préférence transmis à la prochaine génération, se disséminant ainsi rapidement dans la population.

Même si les systèmes CRISPR offrent de fascinantes perspectives, leur utilisation a également fait naître des inquiétudes sociales et éthiques, notamment quant à la nécessité et la façon d'utiliser l'édition génomique afin de réaliser des modifications héréditaires du génom humain, quant à la possibilité de voir naître des «bébés sur mesure», quant aux éditions génomiques potentiellement dangereuses qui pourraient en résulter ou encore quant au possible bouleversement d'écosystèmes entiers. Le recours au système CRISPR-Cas9 soulève des questions d'ordre social et éthique non seulement pour les êtres humains, mais également pour d'autres organismes et pour l'environnement, ce qui pousse les scientifiques à recommander un moratoire sur les modifications héréditaires du génome humain. Par exemple, l'application des technologies CRISPR en tant que technique de contrôle antiparasitaire peut produire des effets et des mutations inattendus, susceptibles d'entraîner la dispersion de gènes moteurs, la disparition de toute une population animale, des rejets accidentels et/ou des perturbations irréversibles d'écosystèmes entiers. De fait, les activités de recherche visant à modifier l'héritage génétique des êtres humains qui pourraient entraîner de telles modifications ne sont pas financées dans le cadre du programme Horizon 2020, le programme-cadre de l'Union en matière de recherche et d'innovation.

Il existe par ailleurs de grandes préoccupations liées à la prise en compte du principe de non-malfaisance dans l'évaluation des risques et à la distinction entre les visées cliniques et thérapeutiques de l'édition génomique et ses applications/utilisations à des fins d'amélioration. Un autre problème important concerne l'insertion efficace et sécurisée du système CRISPR-Cas9 au sein des cellules ou tissus qui sont difficiles à transfecter et/ou à infecter. Parmi les autres sources d'inquiétude, on peut citer la perspective d'un dommage irréversible à la santé des générations à venir ainsi que la possibilité d'engendrer de nouvelles formes d'inégalité sociale, de discrimination et de conflit, et d'ouvrir la voie à une nouvelle ère d'eugénisme.

Législation d'anticipation

La vitesse à laquelle le domaine de l'édition génomique évolue rend la supervision réglementaire particulièrement difficile. En outre, la question de savoir si le système CRISPR-Cas9 devrait être réglementé en tant que technique d'édition génomique ou si ses produits devraient plutôt être contrôlés de façon ponctuelle au moyen d'une démarche reposant sur les résultats fait débat. Les discussions menées au niveau international et portant sur le statut réglementaire des techniques d'édition génomique se concentrent sur la possibilité d'appliquer les définitions actuelles du génie génétique ou des organismes génétiquement modifiés aux outils d'édition génétique récemment découverts.

La Commission européenne travaille actuellement sur une interprétation juridique du statut réglementaire des produits créés à l'aide de nouvelles techniques de sélection végétale, afin d'atténuer les incertitudes juridiques dans ce domaine. Une telle interprétation pourra guider la décision visant à déterminer si les technologies d'édition génomique devraient relever du cadre législatif communautaire concernant la libération contrôlée et délibérée d'organismes génétiquement modifiés.

Par ailleurs, le fait de déposer un brevet pour le système CRISPR-Cas9 à des fins thérapeutiques chez les humains est juridiquement controversé. En février 2017, l'Office des brevets des États-Unis a rendu sa décision quant à la propriété du brevet permettant l'utilisation du système CRISPR-Cas9 aux fins d'édition génomique, définissant les conditions de la génération de bénéfices issus de cette technologie pour les années à venir.

Les risques de mutations génétiques héréditaires et imprévisibles soulèvent des questions concernant la sûreté de la technique et l'attribution de la responsabilité en cas de dommages. Dans un récent rapport, l'Académie américaine des sciences, de l'ingénierie et de la médecine a appelé à la prudence lors de la libération de gènes moteurs dans un environnement ouvert et a suggéré l'instauration de «contrôles

progressifs», comprenant des garanties spéciales, en raison des grandes incertitudes scientifiques et des potentiels risques écologiques. Il est nécessaire de prendre des mesures de sécurité afin d'éviter la dissémination d'organismes susceptibles de provoquer des dommages écologiques ou de nuire à la santé humaine.

Dans les faits, de nombreux scientifiques tirent la sonnette d'alarme, estimant que le chemin est encore long avant que nous puissions déployer les systèmes CRISPR de façon efficace et sécurisée. Ces systèmes pourraient notamment poser de nouveaux défis du point de vue de l'évaluation des risques, dans le sens où les organismes nés de ces méthodes peuvent entraîner davantage de modifications invasives du génome d'organismes vivants que les techniques de modification génétique traditionnelles.

En 2015, la direction générale des services de recherche parlementaire du Parlement européen (DG EPRS) a ouvert la voie à l'innovation par l'intermédiaire de sa publication intitulée «Dix technologies qui pourraient changer nos vies: impacts potentiels et conséquences des politiques», dont chaque chapitre met en avant une technologie particulière, ses promesses et ses possibles conséquences négatives, ainsi que le rôle que le Parlement européen pourrait et devrait jouer dans l'orientation de ces avancées. La présente étude poursuit sur la même lancée en présentant dix autres technologies qui exigeront une attention accrue de la part des responsables politiques. Les sujets de cette nouvelle étude ont été choisis de telle sorte qu'ils reflètent les nombreux thèmes sur lesquels le panel de la STOA a décidé de se concentrer dans le cadre du huitième mandat du Parlement (2014-2019). L'objectif de cette publication n'est pas uniquement d'attirer l'attention sur ces dix technologies en particulier: il consiste également à promouvoir une réflexion plus poussée sur ces avancées technologiques qui n'en sont peut-être encore qu'à leurs débuts, mais qui pourraient tout de même avoir d'importantes répercussions sur nos vies dans un avenir proche ou lointain.

Étude publiée par la
Direction de l'évaluation de l'impact et de la valeur ajoutée européenne
Direction générale des services de recherche parlementaire, Parlement européen



PE 598.626
ISBN 978-92-846-1704-3
doi: 10.2861/271419
QA-01-17-154-FR-N

Le contenu du présent document relève de la responsabilité exclusive de l'auteur et les avis qui y sont exprimés ne reflètent pas nécessairement la position officielle du Parlement européen. Il est destiné aux députés du Parlement européen et à leurs collaborateurs dans le cadre du travail parlementaire.