

Aux États-Unis : existence d'une forte politique scientifique et industrielle « public-privé » en faveur de la recherche sur les ONIEA

Par Yves FRENOT, Xavier BRESSAUD et Kévin KOK HEANG

Service pour la Science et la technologie de l'Ambassade de France aux États-Unis (Washington)

Aux États-Unis comme ailleurs, les utilisations des ondes non ionisantes électromagnétiques et acoustiques (ONIEA) se développent dans des domaines extrêmement variés. La recherche est particulièrement active en ce qui concerne l'interaction des ondes avec le vivant, que ce soit en vue de leur utilisation médicale ou s'agissant de leur impact sur la santé. L'omniprésence de cet axe de recherche dans des champs si divers fournit un angle pour passer en revue l'ensemble de l'écosystème américain : l'étude des ONIEA y est promue à l'échelle nationale par des programmes ambitieux portés par les agences fédérales de recherche. Les projets financés sont mis en œuvre tant par les grandes universités que par des entreprises *deep tech* se saisissant des innovations émergentes de la recherche, sous le regard intéressé des grands groupes technologiques. Cet écosystème foisonnant est observé et normé, sans toutefois le soumettre à trop de rigidité, par les agences fédérales de régulation qui cherchent un dosage efficace entre le principe de précaution et l'innovation.

Introduction

Le système américain de R&D repose sur quatre piliers qui en ont assuré, jusqu'à aujourd'hui, le succès : 1) un investissement massif du gouvernement fédéral ; 2) un groupe d'universités de recherche très compétitives et attractives ; 3) une participation élevée des entreprises à l'effort national en R&D ; et 4) la grande efficacité de son système de transfert de technologie. Ainsi, l'activité de recherche se répartit entre trois principaux groupes d'acteurs : le gouvernement fédéral, les universités de recherche (publiques ou privées) et les entreprises privées.

En l'absence d'un véritable ministère de la Recherche, la stratégie scientifique américaine, à l'échelle fédérale, est impulsée par la Maison Blanche (Office of Science and Technology Policy – OSTP), mais est très largement modulée par le Congrès qui décide, *in fine*, du financement des départements et agences fédérales impliqués. Ceux-ci disposent de quelques laboratoires propres, mais fonctionnent essentiellement comme des agences de moyens vis-à-vis des universités. Ces dernières disposent d'une très grande autonomie dans leurs activités de recherche, qui résulte notamment de sources de financement diversifiées, qui, outre leurs fonds propres, proviennent pour moi-

tié des agences fédérales, mais également des États, et d'entreprises privées. En 2020, le budget fédéral consacré à la R&D ⁽¹⁾ s'est élevé à 156 milliards de dollars (Mds\$). Il ne constitue néanmoins qu'environ un quart du montant total de l'investissement américain en R&D (de l'ordre de 550 Mds\$), le reste provenant d'entreprises et de fondations privées. La dépense des universités consacrée à la recherche est d'environ 70 Mds\$; une part conséquente est donc opérée au niveau fédéral ou par les entreprises elles-mêmes.

Au niveau fédéral, le sujet ONIEA ne bénéficie pas d'une stratégie dédiée. L'approche de l'OSTP consiste à dégager des priorités stratégiques et des problématiques générales à résoudre (par exemple, le maintien du *leadership* du pays dans les industries du futur, sécurité et innovation en matière de santé publique...), qui sont ensuite déclinées par grandes thématiques par les agences et départements. À l'échelle des laboratoires, la distinction OI/ONI, comme le rapprochement entre OE et OA ne semblent pas non plus jouer un rôle très structurant. Au plan fondamental, les projets impliquant des ONIE sont distribués dans différentes

(1) <https://fas.org/sgp/crs/misc/R46341.pdf>

catégories ⁽²⁾ de la physique, tandis que l'acoustique, en tant que telle, ne bénéficie pas d'une très forte visibilité. En revanche, du point de vue des applications, certains champs se structurent autour de propriétés ou d'usages plus pointus (par exemple, la photonique, la nanobiophysique, l'imagerie médicale...), comme nous allons essayer de l'illustrer à travers certains exemples qui ne prétendent pas donner une image exhaustive du domaine considéré.

Les programmes de recherche des agences fédérales impliquant les ONIEA

NSF

La National Science Foundation (NSF) est la référence en matière d'agence de financement de la recherche fondamentale (hors santé). Son budget était en 2020 de l'ordre de 8 Mds\$. Parmi le grand nombre de programmes qu'elle pilote, certains sont consacrés à l'étude des réseaux sans-fil pour eux-mêmes, comme les Platforms for Advanced Wireless Research – PAWR – ou le Millimeter-Wave Research Coordination Network. D'autres, comme Electronics, Photonics and Magnetic Devices, sont dédiés à la recherche sur la conception de systèmes *hardware* intégrant des aspects chimiques et biologiques dans l'optique d'application en matière de santé, de médecine et de suivi biologique et environnemental. Le pôle Engineering Biology and Health Cluster, qui vise à l'intégration des sciences de la vie et de l'ingénierie pour résoudre des problèmes de santé, soutient certains projets s'articulant autour des ONIEA. Le programme New Light and Acoustic Wave Propagation: Breaking Reciprocity and Time-Reversal Symmetry (NewLAW) a octroyé, sur quatre ans, un budget de 18 millions de dollars (M\$) réparti entre neuf équipes d'ingénieurs travaillant sur la thématique « Penser différemment la propagation des ondes acoustiques et lumineuses » et ayant produit à la fin 2019 une vingtaine d'articles.

NIH

Le National Institute of Health (NIH), dont le budget était de près de 40 Mds\$ en 2020, concentre l'ensemble de ses moyens sur la recherche médicale. Plusieurs études portant sur l'impact des ondes sur la santé sont ainsi financées (voir *infra*). Les projets soutenus par le NIH sont répertoriés par thème sur un site dédié ⁽³⁾. Concernant les ONIEA, mentionnons parmi ses innombrables programmes le Common Fund's Stimulating Peripheral Activity to Relieve Conditions qui vise à accélérer le développement d'outils thérapeutiques permettant de moduler l'activité électrique des nerfs, et parmi ses sous-structures, le National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering qui dispose de laboratoires propres dédiés à la recherche sur l'imagerie.

(2) Sciences de l'atome, des molécules et de l'optique (AMO) ou Physique de la matière condensée (CMMP), par exemple. On peut se référer aux rapports de la National Academy of Science pour plus de détails sur la structuration de ces catégories : <https://www.nap.edu/catalog/25613/manipulating-quantum-systems-an-assessment-of-atomic-molecular-and-optical>

(3) <https://reporter.nih.gov/search/RBoJ9LdhFUarozek66YA7Q/projects>

USDA

Le Department of Agriculture (USDA) a consacré près de 3 Mds\$ en 2020 à la recherche, notamment en pilotant des programmes destinés à assurer la qualité nutritionnelle et la sécurité alimentaire des produits. Parmi les technologies testées et développées, celles fondées sur les ONIEA (lumières et champs électriques pulsés, micro-ondes, traitements ultrasons ou magnétiques...) permettent d'améliorer la qualité des produits ou de tester de façon non destructive leur qualité et leurs propriétés physico-chimiques. Mentionnons en particulier le programme Food Safety (National Program 108 ⁽⁴⁾), dans le cadre duquel plusieurs projets explorent les possibilités offertes par les ONIEA, comme :

- le développement de technologies alternatives d'intervention pour les produits frais ou peu « processés » ⁽⁵⁾ ;
- la photodégradation des aflatoxines M1 et B1 dans les aliments liquides épais, un processus utilisant la lumière ultraviolette de longueur d'onde courte ⁽⁶⁾.

DARPA

La Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) dépend du Département de la Défense (DoD) qui dispose du plus gros budget de recherche fédéral (65 Mds\$ en 2020). Elle pilote des programmes ayant des visées duales, dont certains à un niveau très fondamental et couvrant tout le champ scientifique. Elle porte notamment de nombreux programmes impliquant des ONIE ^(7,8) (laser, photonique, radars...) ou ONIA (détection sous-marine, extinction de flammes par ondes acoustiques...). D'autres programmes abordent la compréhension des mécanismes d'interaction des ONIEA avec le vivant. Initié il y a plus de dix ans et maintenant arrivé à terme, le programme QuBE (Quantum effects in Biological Environments) ^(9,10) avait déjà pour but de mieux comprendre les phénomènes quantiques à l'œuvre dans les systèmes biologiques utilisés comme capteurs. Plus récent, le programme RadioBio s'intéresse à la communication utilisant des ondes électromagnétiques entre les biosystèmes. Coordonné par l'entreprise Phytlsigns/Vivent SARL ⁽¹¹⁾ et l'Université GeorgiaTech, ce programme soutient des projets très divers menés par plusieurs universités ; mais la liste complète de ces projets n'est pas publique, du fait notamment que certains sont « classifiés ». Le Biology Technology Office, qui regroupe les programmes liés à la biologie fondamentale,

(4) <https://www.ars.usda.gov/research/programs-projects/?mode=Code=80-72-05-30>

(5) <https://www.nal.usda.gov/fsrio/research-projects/development-alternative-intervention-technologies-fresh-or-minimally-processed-foods>

(6) <https://www.nal.usda.gov/fsrio/research-projects/photodegradation-aflatoxins-m1-and-b1-highly-turbid-liquid-foods-using-short-wave-length>

(7) <https://www.darpa.mil/program/nascent-light-matter-interactions>

(8) <https://www.darpa.mil/program/extreme-optics-and-imaging>

(9) <https://www.darpa.mil/program/quantum-effects-in-biological-environments>

(10) <https://idstch.com/technology/biosciences/quantum-biology-taking-first-steps-lead-fundamentally-new-technologies-including-bio-inspired-sensors/>

(11) Une entreprise suisse : <https://www.phytlsigns.com/company/> et <http://vivent.ch/>

compte lui aussi certains projets impliquant des ONIEA, comme Advanced Plant Technologies ou Persistent Aquatic Living Sensors. Dans une optique radicalement différente, le programme Next-Generation Nonsurgical Neurotechnology⁽¹²⁾ explore les relations homme-machine au travers des méthodes non invasives.

D'autres organes fédéraux, comme le Department of Energy (DoE) ou l'Air Force Office of Scientific Research (AFOSR), disposent chacun d'un budget de recherche conséquent et portent quelques projets interdisciplinaires en lien avec les ONIEA.

Structuration de l'écosystème articulé autour des ONIEA

Dans le secteur des télécommunications, la recherche et le développement sont bien sûr très développés et l'actualité est, aux États-Unis comme ailleurs, très concentrée sur les innovations qui pourraient accompagner le déploiement de la 5G (voir *infra*). Plutôt que de détailler cet aspect classique de l'usage des ondes, essayons d'illustrer le dynamisme de l'écosystème américain à travers quelques exemples qui sont à des degrés de maturité différents.

Photonique

Les travaux conduits à l'Université de Rochester sur le contrôle des propriétés électroniques de la matière à l'aide de lasers⁽¹³⁾ ont été soutenus au niveau fédéral⁽¹⁴⁾. Ils s'inscrivent naturellement dans la participation de cette université à un *cluster*⁽¹⁵⁾ regroupant acteurs académiques et industriels locaux de la photonique, un *cluster* qui porte notamment le partenariat public-privé AIM Photonics⁽¹⁶⁾ (American Institute for Manufacturing Integrated Photonics). D'autres *clusters* centrés sur les métiers de la « photonique » existent dans tout le pays (Connecticut, Floride, Nouveau Mexique, Arizona, Colorado). La National Photonic Initiative (NPI), créée en 2012, a joué un rôle crucial dans le regroupement d'acteurs gouvernementaux, académiques et industriels de ce domaine, dans l'orientation des choix d'investissement dans cette technologie devenue aujourd'hui stratégique et a ainsi structuré le secteur. Le salon Photonics West, qui regroupe chaque année à San Francisco chercheurs et industriels venus du monde entier, consacre l'une de ses trois sessions spécialisées – BIOS –, aux interactions avec le vivant.

Médecine bioélectronique

Le Photoacoustic & Ultrasonic Systems Engineering Lab (Pulse Lab⁽¹⁷⁾) de l'Université Johns Hopkins, s'intéresse à la libération modulée de médicaments par utilisation d'ultrasons⁽¹⁸⁾. En partenariat avec l'Université d'Arkansas, le

département d'ingénierie mécanique de cette université a également développé des outils de diagnostic (cancer) opérant dans le domaine optique pour limiter les radiations ionisantes. Au sein du College of engineering de l'Université Carnegie Mellon⁽¹⁹⁾, une équipe travaille sur l'utilisation des ultrasons comme guide de la lumière pour l'amélioration de l'imagerie médicale. En synergie avec le dynamisme de la recherche universitaire du secteur, l'investissement des GAFAs dans le domaine de la santé, centré sur l'exploitation des données, ne néglige pas à ce titre les interactions des ondes et du vivant. Apple, par exemple, s'est concentré sur la mesure de paramètres du vivant à l'aide de capteurs électroniques. La création en 2016 par Alphabet et GSK de Galvani Bioelectronics⁽²⁰⁾, une société nantie de 700 M\$, a marqué les esprits : celle-ci développe, en propre et en collaboration avec des laboratoires universitaires, des implants miniaturisés capables de stimuler des parties du corps grâce aux ondes électriques. La société estime que les premiers traitements pourront être commercialisés en 2023. Le marché de la médecine bioélectronique est vu comme très prometteur et le paysage est en (re)composition : nombreuses fusions et acquisitions, incertitude sur les produits et les modèles d'affaires qui en émergeront. Ainsi, derrière les acteurs les plus visibles, se cache un nombre important d'entreprises (Medtronic Plc., Boston Scientific Corporation, Liva Nova Plc, Electrocore, Nevro, et St. Jude Medical) et une multitude de *start-ups* qui cherchent à valoriser certaines des technologies développées dans les laboratoires universitaires. Mentionnons à titre d'exemple la *start-up* Iota Bioscience⁽²¹⁾ (rachetée récemment par le japonais Astellas), qui détient une licence exclusive sur les senseurs bioélectroniques (chargés par ultrasons) implantables qui, développés à UC Berkeley, entrent en interaction directe avec le système nerveux.

Transfert d'énergie

Les technologies développées pour assurer le chargement des implants par le biais d'ondes acoustiques peuvent aussi être exploitées dans des contextes tout à fait différents. Au sein du John and Claire Bertucci Nanotechnology Laboratory de l'Université Carnegie Mellon⁽²²⁾, une équipe explore les effets piézoélectriques notamment en vue de l'utilisation d'ultrasons pour alimenter des capteurs pour les *smart cities*. Dans le cadre du programme Electrical, Communications and Cyber Systems (ECCS) de la NSF, deux projets sur le transfert d'énergie par ondes acoustiques pour alimenter des instruments peu énergivores sont menés, l'un à VirginiaTech⁽²³⁾ et l'autre à GeorgiaTech⁽²⁴⁾, tous deux en lien avec des *start-ups*. Des technologies analogues sont également développées par la *start-up* SonicEnergy⁽²⁵⁾. Les ONIE permettent elles

(12) <https://www.darpa.mil/news-events/2019-05-20>

(13) <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.98.121305>

(14) <https://www.nap.edu/read/25613/chapter/9?term=rochester#249>

(15) <https://newyorkphotonics.org/>

(16) <https://www.aimphotonics.com/about-us>

(17) <https://pulselab.jhu.edu/>

(18) <https://hub.jhu.edu/2017/01/24/ultrasound-pulse-release-drugs-to-rat-brain/>

(19) <https://www.ece.cmu.edu/news-and-events/story/2019/04/sound-steers-light-through-the-brain.html>

(20) <https://www.galvani.bio/>

(21) <https://iota.bio/>

(22) <https://www.cmu.edu/news/stories/archives/2019/september/power-full-sound-waves.html>

(23) https://nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=1711139

(24) https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=1829821

(25) <https://sonicenergy.com/>

aussi de transporter de l'énergie, mais de manière mieux canalisée que dans les fours à micro-ondes : si la recharge de véhicules électriques pendant qu'ils roulent semble encore assez lointaine ⁽²⁶⁾, la même perspective d'un rechargement en cours d'utilisation pour les téléphones cellulaires et autres outils électroniques a donné naissance à plus de 200 *start-ups* : d'après tracxn.com ⁽²⁷⁾, sept des dix plus prometteuses sont américaines (par exemple, Ossia, Energeous, GuruWireless...).

Régulation des ONIEA : protection de la santé et encouragement de l'innovation

À l'échelle fédérale, se manifeste une tension entre le devoir d'assurer la protection des citoyens et l'impératif de la stimulation de l'innovation. La balance s'exprime dans la formule *light touch regulation*, une réglementation *a minima*, dont le souci est surtout de laisser une marge de liberté suffisante à l'innovation. Les agences fédérales chargées de la régulation s'appuient cependant sur un travail approfondi et sur les résultats de recherche existants pour formuler leurs recommandations et fixer des normes d'utilisation.

NIST

Le National Institute of Standards and Technology (NIST), qui dépend du Département du Commerce, est une agence fédérale qui mène des activités particulières de recherche. Son rôle est de définir des cadres de travail et des standards n'ayant en général pas de caractère contraignant, mais étant dans les faits des références. Le NIST dispose de plusieurs programmes liés à l'utilisation des ondes pour répondre à des problématiques de métrologie, de caractérisation des matériaux ou d'imagerie : Magnetics, Optical physics, Quantum information science ou encore Radiation, Spectroscopy et celui se situant à l'interface avec le vivant, à savoir Nanobiophotonics. Le NIST procède aussi, indépendamment des questions de santé, à des mesures d'exposition aux radiations, notamment s'agissant des technologies qui pourraient être utilisées dans le cadre de la 5G.

FDA

La Food and Drugs Administration (FDA), qui dépend, quant à elle, du Department of Health and Human Services, est la principale agence fédérale de régulation dans le domaine de la santé publique. Ses rapports les plus complets sur l'impact sur la santé des radiations (ionisantes et) non ionisantes ont été publiés dans les années 2000-2010. En octobre 2018, elle a produit un document portant sur les normes et la réglementation applicables aux produits électroniques de consommation courante ^(28,29) (non médi-

caux). Plus pointu, Biosensing, Ultrashort Laser Therapeutics and Nanobiophotonics est un programme d'évaluation de l'efficacité et de la sûreté de ces procédés. La FDA régit aussi l'utilisation médicale des ONIEA, notamment l'utilisation des lasers ⁽³⁰⁾, des micro-ondes, de la résonance magnétique nucléaire ⁽³¹⁾, des ultrasons ⁽³²⁾ et autres sources de radiofréquences. Lors du développement de nouveaux outils, chercheurs et innovateurs sont invités à entretenir un contact étroit avec l'agence, qui propose des procédures permettant d'autoriser des expérimentations à différentes échelles pour mettre au point des dispositifs innovants. Peut notamment être cité le Breakthrough Devices Program ⁽³³⁾.

La FDA s'appuie aussi sur des travaux du NIH, qui a mis en place un programme intitulé Non-Ionizing Radiation Programme ⁽³⁴⁾, lequel détaille les mesures et règles à suivre pour assurer la protection des personnels travaillant sur les campus du NIH. Le NIH héberge aussi le National Institute of Environmental Health Sciences qui, par le biais de son National Toxicology Program, est l'institut dédié aux effets des ONIE sur la santé.

Enfin, la FDA travaille avec l'Environmental Protection Agency (EPA) en matière de régulation de l'impact des ondes non ionisantes sur la qualité de la nourriture ⁽³⁵⁾. En revanche, aucune étude d'ampleur n'a été conduite concernant leur impact sur l'environnement.

FCC

La Federal Communications Commission (FCC), qui est placée sous l'autorité du Congrès, est le principal régulateur dans le domaine des télécommunications. Moins centrée sur les questions de santé, elle assure *in fine* la régulation concernant les ondes radiofréquences : tout instrument émetteur doit être agréé ⁽³⁶⁾. C'est donc elle qui centralise les informations concernant les effets de la 5G sur la santé humaine. Pour satisfaire l'administration américaine, qui a fait du déploiement de la 5G une priorité, la FCC a significativement affaibli les réglementations relatives à l'impact environnemental de l'implantation des antennes. S'appuyant seulement sur des rapports de l'OMS et de la FDA, elle a estimé, qu'il n'existait pas, à ce jour, de « preuve scientifique » de risques, et n'indique qu'« à titre d'information » que certaines études émettent sur ce point des réserves (renvoyant ainsi aux travaux de la FDA, et donc à ceux du NTP).

(26) <https://www.osti.gov/pages/servlets/purl/1575364>

(27) <https://tracxn.com/d/trending-themes/Startups-in-Wireless-Charging>

(28) <https://www.fda.gov/radiation-emitting-products/radiation-emitting-products-and-procedures/home-business-and-entertainment-products>

(29) <https://www.fda.gov/medical-devices/cdrh-research-programs/ultrasonics-laboratory>

(30) <https://www.fda.gov/medical-devices/cdrh-research-programs/biosensing-ultrashort-laser-therapeutics-and-nanobiophotonics>

(31) <https://www.fda.gov/radiation-emitting-products/medical-imaging/mri-magnetic-resonance-imaging>

(32) <https://www.fda.gov/radiation-emitting-products/medical-imaging/ultrasound-imaging>

(33) <https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/breakthrough-devices-program>

(34) <https://www.ors.od.nih.gov/sr/dohs/Documents/NIH%20Non-Ionizing%20Radiation%20Program.pdf>

(35) <https://www.epa.gov/radiation/what-food-irradiation>

(36) <https://www.fcc.gov/consumers/guides/wireless-devices-and-health-concerns>

La société civile

La société civile est, dans son ensemble, plus méfiante quant aux effets sanitaires et environnementaux des ONIE. Des sociétés savantes, comme la Health Physics Society⁽³⁷⁾ ou la BioelectroMagnetics Society⁽³⁸⁾, sont très investies sur le sujet ; de nombreuses associations, comme Americans for Responsible Technology, et des *Think Tanks*, comme le National Resources Defense Council ou l'Environmental Health Trust, qui scrutent l'actualité et les travaux de recherche, estiment que les recommandations de la FCC reposent sur des études trop anciennes. Ainsi, malgré l'arsenal impressionnant dont disposent les agences, les démarches et les questionnements sur le déploiement de la 5G relèvent plus de l'action de groupes de citoyens, d'associations, y compris professionnelles, d'ONG, etc. que, de celle des autorités et des institutions qui, sur ce plan, ont fait le choix de l'innovation plutôt que celui de la précaution.

Conclusion

Les ONIEA, si elles ne sont pas formellement mises en avant comme priorité stratégique à l'échelle fédérale, bénéficient aux États-Unis d'une attention convergente s'exprimant au travers de moyens importants à la fois publics, militaires, académiques et privés, et à la hauteur des nombreuses innovations qu'elles promettent, notamment dans le cadre de leurs interactions avec le vivant. Les organes de régulation sont organisés pour quantifier les ef-

(37) <https://hps.org/>

(38) <https://www.bems.org/>

Présentation du Service pour la science et la technologie de l'Ambassade de France aux États-Unis

Ce service compte une vingtaine d'agents aux profils scientifiques variés répartis entre l'Ambassade de Washington et les consulats généraux. Son rôle est d'assurer une veille scientifique et technologique dans ce pays, de faciliter les coopérations scientifiques franco-américaines et de promouvoir la science et la technologie française aux États-Unis. L'ensemble de l'équipe a contribué à la collecte des informations présentées dans cet article, dont la mise en forme a été effectuée par Yves Frenot, conseiller scientifique, directeur de recherche au CNRS, spécialiste de l'écologie polaire, Xavier Bressaud, attaché scientifique, professeur de mathématiques à l'Université Toulouse III – Paul Sabatier détaché, et Kévin Kok Heang, ingénieur et spécialiste de l'IA sous les angles scientifiques et politiques, tous trois en poste à Washington.

fets des ondes dans de multiples cadres, mais sont avant tout soucieux de ne pas brider l'innovation et accordent ainsi une certaine confiance à la capacité des acteurs à s'auto-réguler. Ils laissent de fait les organisations non gouvernementales, académiques, sociales et professionnelles mener le débat sur les impacts de ces techniques. La dynamique de l'ensemble est puissante, et s'exprime fortement à l'export, en particulier en matière médicale.