

Recherche polycentrique, PME innovantes et exportations : les clés d'un succès allemand centré sur la photonique

Par Julien POTIER

Service pour la Science et la technologie de l'Ambassade de France en Allemagne (Berlin)

Pionnière dans la recherche sur les ondes non ionisantes électromagnétiques et acoustiques (ONIEA), l'Allemagne bénéficie d'une recherche universitaire, extra-universitaire et industrielle polycentrique, soutenue par des investissements publics et privés conséquents. La recherche sur les usages des ONIEA est essentiellement structurée autour du domaine photonique, allant de l'ultraviolet aux térahertz. La dynamique d'innovation dans ce secteur favorise l'émergence d'un tissu industriel dense, en particulier dans la production d'outils et de procédés industriels et à usage médical. De petites et moyennes entreprises innovantes tirant des exportations une part croissante de leur chiffre d'affaires y jouent un rôle prépondérant. L'Allemagne se distingue également par le fort encadrement institutionnel des ONIEA. Soutenu par les agences fédérales de radioprotection, un champ de recherche portant sur les effets potentiels des ONIEA sur la santé et l'environnement se développe, contribuant à la mise en place d'une législation prudente.

Introduction

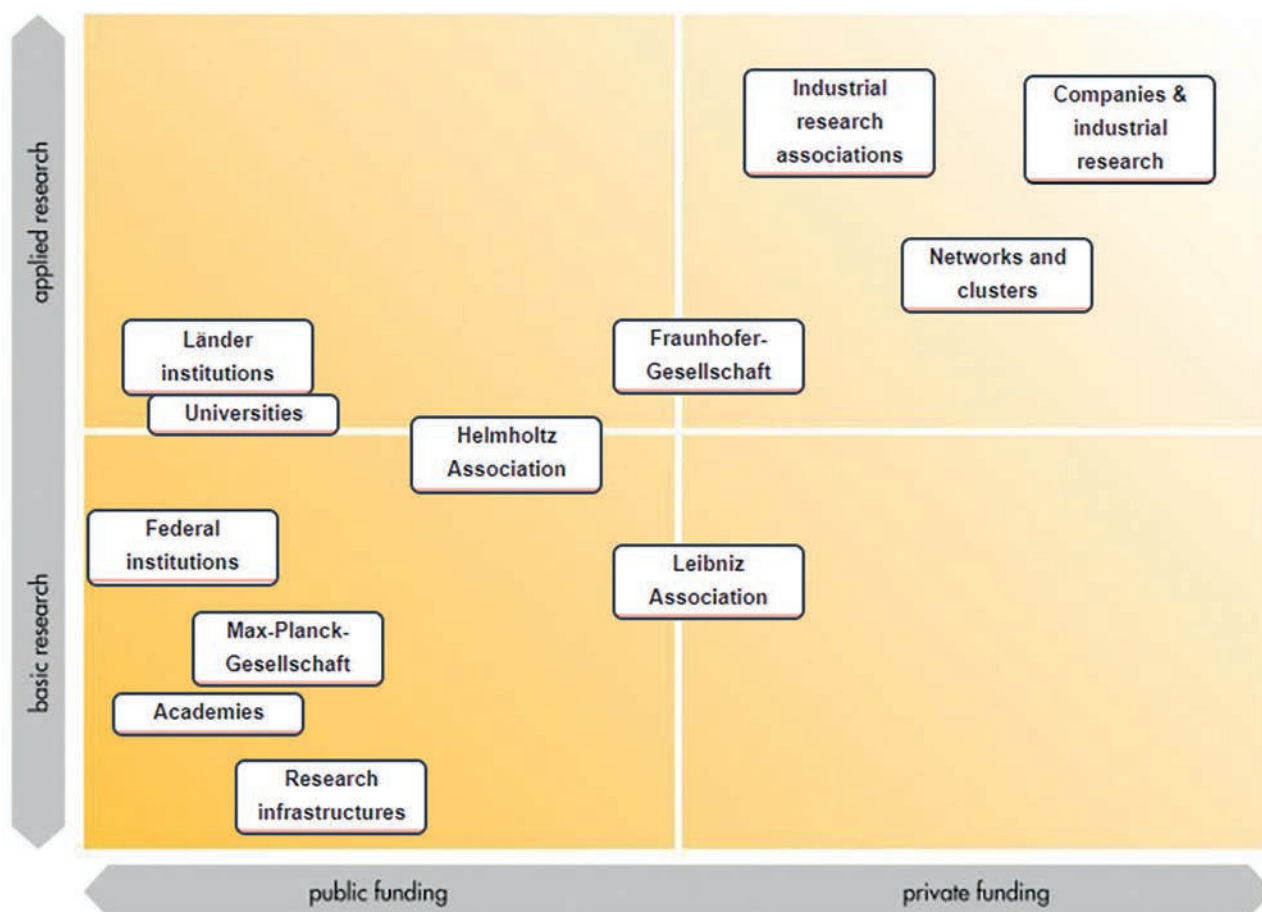
Historiquement pionnière dans les sciences physiques et les découvertes sur les ONIEA, la patrie d'Hermann Von Helmholtz, d'Heinrich Hertz, de Max Planck et d'Albert Einstein prend aujourd'hui encore une part importante dans l'émergence de nouveaux usages des rayonnements non ionisants et l'acquisition de nouvelles connaissances en la matière, en particulier dans le domaine photonique. L'Allemagne bénéficie d'une recherche polycentrique soutenue par l'État et les Länder. Les pouvoirs publics soutiennent de manière significative la recherche fondamentale, mais également la recherche appliquée, jusqu'aux applications industrielles. Les instituts Fraunhofer, les universités techniques et les *clusters* jouent un rôle particulièrement important dans le transfert technologique à l'industrie. L'Allemagne a ainsi pu faire émerger un tissu économique d'entreprises innovantes œuvrant sur des applications variées des ONIEA. Leur activité est particulièrement dynamique dans la production de matériels et d'outils destinés au secteur médical et à la production industrielle. La progression de nouveaux usages et la prudence marquée du grand public vis-à-vis des effets des rayonnements électromagnétiques ont par ailleurs suscité des travaux de recherche sur les effets des ONIEA sur la santé et l'élaboration d'une législation protectrice.

Les agences gouvernementales de radioprotection investissent le champ des ondes non ionisantes. Au-delà des marchés porteurs dans les usages industriels et médicaux, le monde de la recherche allemand est actif sur de nouvelles applications. Les usages dans l'agriculture et l'agroalimentaire font l'objet de projets de recherche, mais leur potentiel reste incertain. Par ailleurs, d'importants investissements sont actuellement réalisés dans la photonique au service des technologies de la communication, et plus particulièrement des technologies quantiques.

Une recherche polycentrique bénéficiant d'un fort investissement public et privé

Il est difficile de circonscrire avec précision l'activité de recherche sur les ondes non ionisantes électromagnétiques et acoustiques, tant la diversité de leurs applications est large, tout comme le spectre de fréquences concerné, allant des ultraviolets jusqu'aux fréquences les plus basses. Les grands acteurs allemands de la recherche sont tous impliqués sur ce vaste domaine.

Parmi les grandes universités, le groupement TU9 rassemble les principales universités techniques (TU), établissements spécialisés dans les sciences de l'ingé-



Paysage des acteurs de la recherche en Allemagne, par niveau de recherche et sources de financement – Source : Site Internet Research in Germany : www.research-in-germany.org

nier. Certaines universités de sciences appliquées – appelées *Fachhochschulen* ou *Hochschulen für angewandte Wissenschaften*, elles sont plus ou moins l'équivalent des IUT – disposent de bonnes capacités en matière de recherche appliquée. En outre, quatre grands organismes de recherche extra-universitaires disposent d'une autonomie de gestion et de financements apportés conjointement par l'État fédéral et les Länder. L'activité de la société Max Planck est orientée vers la recherche fondamentale, avec 1,8 milliards d'euros (Mds€) de budget en 2018, assuré à 80 % par un financement institutionnel public et à 20 % sur ressources propres. La communauté Helmholtz regroupe les grandes infrastructures de recherche, avec un budget 2018 de 4,8 Mds€, financé à 70 % par l'État fédéral et les Länder, le reste en ressources propres. La société Fraunhofer tire près de 84 % des ressources composant son budget de 2,8 Mds€ des financements obtenus sur projets, dont 70 % issus de contrats avec l'industrie et 30 % de ceux conclus avec le secteur public. La contribution totale du secteur public au financement des instituts Fraunhofer s'élève à 22 %. Enfin, la communauté Leibniz rassemble des instituts de recherche appliquée à l'ancrage local marqué, s'intéressant à des thèmes souvent liés aux enjeux d'environnement, d'agriculture et de sciences humaines. Son budget 2019 s'élevait à 2,1 Mds€, dont les deux tiers provenaient d'un financement institutionnel public, assumé

à parité par l'État fédéral et les Länder ; le dernier tiers correspondant aux recettes tirées de contrats, principalement publics⁽¹⁾. Enfin, s'y ajoutent les importantes capacités de recherche des acteurs industriels, qui interviennent souvent en synergie avec les institutions précitées, en particulier avec les instituts Fraunhofer, au sein de *clusters* d'innovation. Les acteurs privés se regroupent également au sein d'associations de recherche industrielle (voir la figure ci-dessus).

L'écosystème d'innovation photonique bénéficie du soutien public et de débouchés importants à travers la production d'outils et de procédés industriels

Le domaine de recherche identifiable comme concernant le plus spécifiquement l'usage des ondes non ionisantes est celui de la photonique ; il couvre le spectre des rayon-

(1) Service pour la Science et la Technologie de l'Ambassade de France en Allemagne, « Fiche pays Allemagne », CurieXplore, août 2020. Consultable à l'adresse suivante : <https://curieexplore.enseignement-sup-recherche.gouv.fr/fiche/DEU>

nements non ionisants allant de l'ultraviolet jusqu'aux térahertz ⁽²⁾. La photonique est en Allemagne un sujet bien identifié qui désigne non seulement un domaine de recherche auquel des programmes et des rapports gouvernementaux sont consacrés, et auquel des instituts et *clusters* sont dédiés, mais également un secteur économique institutionnalisé, structuré notamment autour de Spectaris, l'association composée d'industriels de la photonique, et d'OptecNet, le réseau d'innovation pour les technologies optiques.

(2) Classification du syndicat professionnel Spectaris.

Le ministère fédéral de l'Éducation et de la Recherche (*Bundesministerium für Bildung und Forschung - BMBF*) s'est doté en 2012 d'un programme dédié aux technologies photoniques – *Photonik Forschung Deutschland* –, qui arrivera à son terme en 2022. Le BMBF estime son soutien annuel à la recherche photonique à 90 millions d'euros. Dans le rapport *Photonics in Germany* produit en 2019 par Trias Consult, l'association allemande des constructeurs de machines et d'équipements (VDMA) salue ce soutien public apporté au développement des technologies photoniques, en particulier industrielles, et voit les clés du succès allemand dans la mise en place d'un cadre législatif favorable et d'une coopération étroite entre les instituts de recherche et les acteurs de l'industrie.

L'écosystème photonique allemand : de la recherche à l'industrialisation et à la formation

La présence d'une industrie structurée autour de la photonique place les instituts spécialisés de la société Fraunhofer et des universités techniques (TU) au premier plan de la recherche sur ces technologies. Ainsi, l'Institut Fraunhofer pour les technologies laser (ILT) d'Aix-la-Chapelle, avec ses 500 employés, développe de nouvelles solutions de production industrielle dans plusieurs secteurs. À titre d'exemple, l'*Extreme High-Speed Laser Material Deposition* (EHLA), développé avec l'Université technique d'Aix-la-Chapelle (RWTH), est destiné à remplacer, car plus sobre en énergie et plus précis, le chromage dur et la pulvérisation thermique. La technologie EHLA a pu bénéficier d'un transfert rapide au profit de l'industrie grâce à plusieurs partenariats public-privé. L'entreprise « spin-off » ACunity, issue des laboratoires de l'ILT, a notamment coopéré avec l'entreprise néerlandaise Hornet Laser Cladding pour la livraison de trois systèmes EHLA au groupe chinois Hebei Jingye. Le Centre laser de Hanovre (LZH) est aussi une des institutions en pointe dans divers applications des technologies laser, avec une orientation marquée pour le transfert d'innovation à l'industrie. L'Institut Fraunhofer pour l'optique appliquée (IOF), situé à Iéna, développe des systèmes optiques innovants destinés aux micro- et nano-technologies, aux interactions humain-machine et aux technologies quantiques. Il met au point notamment la technologie d'optique *freeform*, pour des applications variées allant des télescopes et capteurs biomédicaux jusqu'aux systèmes d'assistance à la conduite. Il faut aussi citer l'Institut Fraunhofer pour les technologies silicium (ISIT), pour la production d'instruments de mesure (micro-miroirs, systèmes LIDAR), ainsi que l'Institut Fraunhofer Heinrich Hertz (HHI), spécialisé dans les technologies des télécommunications (dont la communication optique sans fil) ou encore l'Institut Fraunhofer pour la physique des solides (IAF), spécialisé sur les applications des circuits haute fréquence dans les technologies de communication, l'électromobilité, les capteurs spectroscopiques et les semi-conducteurs. L'Institut technologique de Karlsruhe (KIT), université technique et premier centre de recherche universitaire d'Allemagne, et l'Université technique de Munich (TU Munich) sont aussi très présents sur les technologies photoniques. Les instituts Fraunhofer et les universités techniques sont complémentaires avec les capacités de recherche fondamentale des instituts Max Planck pour la physique de la lumière (MPL Erlangen), pour la chimie biophysique (Heidelberg) et pour l'optique quantique (MPQ Munich), et avec celles des instituts Leibniz pour les technologies photoniques (IPHT Iéna), pour la microélectronique innovante (IHP Francfort-sur-l'Oder) ⁽³⁾ et sur la croissance des cristaux (IZK Berlin) ⁽⁴⁾.

D'autres organismes de recherche s'associent aux instituts spécialisés pour développer des solutions photoniques nouvelles répondant à une grande variété d'enjeux. Des applications sont ainsi étudiées en matière de ressources agricoles, par exemple dans la caractérisation optique et électrique des végétaux (Jülich, Leibniz ATB) ou le traitement ultraviolet des aliments (FU Berlin). Les applications sont plus nombreuses dans le domaine médical, entre autres dans l'ophtalmologie, la neurologie ou la néphrologie. L'Institut Leibniz HKI explore l'application des technologies photoniques dans le diagnostic et le traitement des infections. Les synergies entre la recherche médicale et la photonique sont suffisamment nombreuses pour voir l'émergence de centres de recherche dédiés, comme le Centre pour la médecine optique et photonique à Iéna.

L'intérêt croissant que connaissent les applications photoniques depuis les années 2000 et le besoin de main-d'œuvre qualifiée de ce secteur en croissance ont conduit à la mise en place de formations universi-

(3) LACROIX L., *Technologies quantiques. Stratégie de recherche en Allemagne*, février 2021.

(4) *Ibid.*

taires destinées à attirer les étudiants internationaux spécialisés dans ce domaine. L'Institut technologique de Karlsruhe (KIT) a créé en 2006 la *Karlsruhe School of Optics & Photonics* (KSOP), avec la volonté d'attirer les talents étrangers en leur proposant d'accéder à des cursus master et doctorat, puis en les accueillant dans ses laboratoires de recherche. Le KIT compte deux autres institutions semblables destinées spécifiquement aux étudiants internationaux (la *Carl Benz School of Engineering* et la *HECTOR School of Engineering and Management*). Dans un but similaire, la société Max Planck, alliée à plusieurs universités et instituts, a créé en 2018 trois Max Planck Schools dont l'activité s'inscrit dans une phase pilote s'étendant sur cinq ans. Ces trois écoles supérieures sont dédiées respectivement aux sciences cognitives, aux sciences physiques, chimiques et biologiques, et à la photonique (la *Max Planck School of Photonics*). Elles bénéficient d'un soutien du BMBF, à hauteur de 9 millions d'euros sur cinq ans.

Plusieurs *clusters* de compétences créent des synergies entre les différentes capacités de recherche présentes sur un même territoire, en association plus ou moins forte avec le monde de l'industrie. Les régions de l'éna et d'Aix-la-Chapelle se distinguent par la richesse de leurs écosystèmes industriels et de recherche ⁽⁵⁾.

Le *Photonics Cluster* d'Aix-la-Chapelle ⁽⁶⁾, à l'orientation très industrielle, est spécialisé dans les technologies laser. Il rassemble sur le site du *High-Tech Campus* de l'Université RWTH plusieurs organismes de recherche : l'Institut Fraunhofer ILT, l'*Aachen Center for Additive Manufacturing* et le *Digital Photonic Production Forschungscampus* ainsi que de nombreux partenaires privés, dont Siemens, Philips Photonics, MTU Aero Engine, Innolite et Trumpf. Le *Photonics Cluster* couvre les applications dans l'usinage industriel, le médical, la bio-photonique et les technologies de mesure.

Le réseau *Fraunhofer Leistungszentrum Photonik* à l'éna ⁽⁷⁾, à orientation plus académique, regroupe une large palette de compétences, dont les applications laser, les capteurs optiques, les systèmes d'imagerie, l'instrumentation optique pour l'environnement et la biologie, ainsi que l'optique pour les technologies quantiques. Il rassemble l'Institut Fraunhofer IOF, l'Université Schiller, l'Institut Helmholtz de l'éna, l'Institut Leibniz IPHT, l'Institut Leibniz HKI et la *Max Planck School of Photonics*.

(5) Pour une liste plus exhaustive des *clusters*, voir : <https://spie.org/industry-resources/photonics-clusters/european-clusters>

(6) RWTH Aachen Campus, « Photonic Cluster ». Consultable à l'adresse suivante : <https://www.rwth-campus.com/en/forschung/photonics-cluster/>

(7) Institut Fraunhofer IOF, « Leistungszentrum Photonik ». Consultable à l'adresse suivante : <https://www.leistungszentrum-photonik.de/>

En dehors du champ de la photonique, il n'existe pas de programmes gouvernementaux récents sur le développement des usages des ONIEA dans le spectre allant du gigahertz aux basses fréquences, ni de *clusters* dédiés à des usages émergents dans ce spectre de fréquences. Les projets de recherche explorant ces sujets semblaient d'ailleurs plus nombreux par le passé qu'ils ne le sont aujourd'hui.

Les activités de recherche identifiées à ce jour sont soit normatives, portant sur des applications déjà répandues, soit trop fondamentales pour faire déjà l'objet d'une institutionnalisation et d'applications industrielles. Dans le domaine acoustique, l'Institut Fraunhofer pour la physique du bâtiment (IBP) étudie différents usages traditionnels de l'acoustique, allant de l'isolation sonore jusqu'à l'optimisation des instruments de musique. L'Institut fédéral de métrologie (PTB Berlin/Braunschweig), placé sous la tutelle du ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie (*Bundesministerium für Wirtschaft und Energie – BMWI*), travaille sur l'acoustique appliquée aux normes des bâtiments et des infrastructures de mesure comme les chambres anéchoïques ou réverbérantes. En recherche fondamentale, des chercheurs de l'Institut Max Planck pour les systèmes intelligents (MPI-IS Stuttgart) explorent la méthode d'holographie acoustique, qui permet de manipuler des particules minuscules à l'aide d'ultrasons, et travaillent à son application dans la médecine. Dans un autre

domaine, un projet d'utilisation des micro-ondes pour faciliter la transformation de la biomasse est mené par l'Institut technologique de Karlsruhe (KIT).

Cette faiblesse apparente de la recherche sur les usages des ONIEA hors photonique peut s'expliquer en partie par le peu d'informations disponibles dans le domaine de la recherche militaire, qui est particulièrement concernée par les technologies de communication par satellite, de détection radar, de radiocommunications et d'acoustique. Il est possible qu'elle soit aussi l'expression d'une relative faiblesse des investissements correspondants dans le domaine militaire, et donc dans les applications civiles qui y sont liées.

Hors photonique, l'activité de recherche portant sur les ONIEA se concentre principalement sur l'étude des effets indésirables des rayonnements dus aux usages et aux activités existantes (voir *infra*).

La dynamique d'innovation dans le domaine photonique alimente l'émergence d'un tissu industriel dense, qui tire des exportations l'essentiel de sa croissance

La forte structuration de la recherche en photonique et son orientation vers la recherche appliquée sont liées à un secteur économique émergent, caractérisé en Allemagne par

la variété de ses activités, ses PME innovantes et sa capacité d'exportation. En 2019, le secteur a réalisé un chiffre d'affaires de 37 milliards d'euros, et employait directement environ 125 000 personnes⁽⁸⁾. En 2016, la production photonique allemande concernait le matériel de mesure et de vision assistée (22 %), les technologies médicales et les sciences de la vie (19 %), les composants et systèmes optiques (18 %), les technologies de production (15 %), de l'information (11 %), les sources lumineuses (10 %) et le photovoltaïque (5 %)⁽⁹⁾. Selon le BMBF, **90 % des entreprises du secteur photonique sont des petites et moyennes entreprises**⁽¹⁰⁾.

Pionnière dans la production des technologies photoniques, **l'Allemagne représente 6,4 % du marché mondial**, et 41 % du marché européen⁽¹¹⁾. L'industrie allemande de la photonique se distingue surtout par sa capacité d'exportation. En 2019, elle réalisait 72 % de son chiffre d'affaires sur les marchés étrangers, une part en croissance continue depuis plusieurs années⁽¹²⁾. Entre 2018 et 2019, le marché intérieur est resté stable, tandis que le chiffre d'affaires à l'exportation augmentait de 1,6 %, principalement aux États-Unis (4,4 Mds€) et en Chine (4,1 Mds€). Les Pays-Bas sont le premier marché européen d'exportation (2,9 Mds€), devant la France (1,9 Mds€)⁽¹³⁾.

Une grande partie des entreprises actives sur le secteur de la photonique sont regroupées au sein du syndicat professionnel Spectaris, qui rassemble des entreprises actives sur les ONIEA (y compris hors photonique) appliquées à l'optique, aux technologies médicales et aux technologies de laboratoire. Spectaris regroupe 400 entreprises, essentiellement des PME, qui représentaient en 2019 près de 74 milliards d'euros de chiffre d'affaires et 300 000 employés. Ce syndicat professionnel inclut des activités concernant les rayonnements ionisants utilisés dans les technologies médicales. À l'image du secteur photonique, les entreprises membres de Spectaris sont largement tournées vers l'export, réalisant 63 % de leur chiffre d'affaires en dehors de l'Allemagne⁽¹⁴⁾.

(8) Business France. *Électronique et optique-photonique en Allemagne*, 2020. Consultable à l'adresse suivante : <https://www.teamfrance-export.fr/api/v1/produits-editoriaux/78970/document>

(9) TRIAS CONSULT (2019), *Photonics in Germany*, 2019.

(10) Bundesministerium für Bildung und Forschung, « KMU-innovativ: Photonik und Quantentechnologien ». Consultable à l'adresse suivante : <https://www.bmbf.de/de/kmu-innovativ-photonik-610.html>

(11) Spectaris, « SPECTARIS-Spotlight Photonik : Daten und Fakten einer Schlüsseltechnologie », 2019. Consultable à l'adresse suivante : https://www.spectaris.de/fileadmin/Content/Photonik/Zahlen-Fakten-Publikationen/SPECTARIS_Photonik_Spotlight_2018_de.pdf

(12) Spectaris, « Eckdaten der Industrie für optische, medizinische und mechatronische Technologien », 2020. Consultable à l'adresse suivante : https://www.spectaris.de/fileadmin/Content/Photonik/Zahlen-Fakten-Publikationen/Zahlen_SPECTARIS_2019.pdf

(13) Spectaris, « SPECTARIS-Spotlight Photonik : Daten und Fakten einer Schlüsseltechnologie », 2019. Consultable à l'adresse suivante : https://www.spectaris.de/fileadmin/Content/Photonik/Zahlen-Fakten-Publikationen/SPECTARIS_Photonik_Spotlight_2018_de.pdf

(14) Spectaris, « Eckdaten der Industrie für optische, medizinische und mechatronische Technologien », 2020. Consultable à l'adresse suivante : https://www.spectaris.de/fileadmin/Content/Photonik/Zahlen-Fakten-Publikationen/Zahlen_SPECTARIS_2019.pdf

L'écosystème industriel photonique allemand

Le groupe industriel **Siemens** est très présent sur les technologies des ONIEA via différentes filiales. Dans le domaine des technologies médicales, Siemens Healthineers (500 000 employés) utilise les ONIEA dans l'imagerie, le diagnostic et la thérapie. À travers Nokia Siemens Networks, et notamment sa participation dans Coriant, le groupe est aussi présent sur l'optique appliquée aux technologies de communication. Fort de plus de 31 000 employés et d'un chiffre d'affaires de 6,3 Mds€ sur 2019-2020, **Carl Zeiss** est un des leaders mondiaux de l'industrie optique et optoélectronique. Le groupe allemand dispose de plusieurs laboratoires de pointe, dont le *Zeiss Research Microscopy Solutions*, à Iéna. L'entreprise désormais indépendante Jenoptik est issue du site de Carl Zeiss à Iéna. **Trumpf** est une entreprise leader à l'échelle mondiale dans le domaine des machines-outils, des lasers et de l'électronique pour les applications industrielles. Elle compte 14 000 employés pour un chiffre d'affaires 2018-2019 de 3,8 Mds€⁽¹⁵⁾.

Il existe ensuite un riche écosystème de PME innovantes de taille suffisante pour leur permettre de se positionner sur un marché à forte composante export. **LPKF Laser&Electronics** (Hanovre) est une société d'ingénierie spécialisée dans le secteur de la photonique et est un des principaux fournisseurs mondiaux de procédés de production par laser. Elle comptait en 2019 plus de 680 employés, pour un chiffre d'affaires 2018-2019 de 140 M€, réalisé à 90 % par l'activité export. **Topica Photonics** (Munich) couvre différentes technologies, dont les lasers à diode, les lasers à fibre ultra-rapide, les systèmes térahertz et les peignes de fréquence (*frequency combs*). En 2020, l'entreprise a réalisé 76 M€ de chiffre d'affaires, pour 340 employés. L'exemple de l'entreprise **Lasos** (Iéna), spécialisée dans les lasers, montre la force du modèle entrepreneurial allemand. Au départ, simple unité de production de Siemens à Munich, elle est rachetée par Carl Zeiss et transférée à Iéna. Reprise par ses équipes, elle devient une entreprise indépendante en 1997. Lasos est aujourd'hui leader mondial des technologies de microscopie confocale. Dans le domaine spécifique de l'agriculture, trois des sept entreprises participant au nouveau réseau d'innovation DeepFarmbots⁽¹⁶⁾, soutenu par le ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie, sont spécialisées sur les ONIEA : OncoSense (capteurs radar), Spacenus (télé-détection et IA) et Toposens (capteurs ultrasons).

(15) Business France, « Électronique et optique-photonique en Allemagne », 2020. Consultable à l'adresse suivante : <https://www.teamfrance-export.fr/api/v1/produits-editoriaux/78970/document>

(16) ZALF, « ZIM cooperation network on AI-based agricultural robotics launched : Artificial intelligence for sustainable agriculture », 20 janvier 2021. Consultable à l'adresse suivante : <https://idw-online.de/en/news761539>

Les entreprises bénéficient d'un soutien public ciblé. Dans le cadre de son initiative *KMU-Innovativ* (PME innovantes), le BMBF a lancé en 2010 un programme de développement des technologies photoniques, qui a permis de financer sur plus de dix ans de nombreux projets portés par des petites et moyennes entreprises innovantes. Le programme *KMU-Innovativ : Photonik/Optische Technologien*, qui arrivera à échéance en 2022, comprend les thèmes de la photonique dans la production, des techniques de mesures, des composants et systèmes optiques, ou encore des techniques d'éclairage et de la bioélectronique⁽¹⁷⁾. Le nouveau programme *KMU-Innovativ : Photonik und Quanten Technologie* (2018-2025)⁽¹⁸⁾ reprend les thèmes du programme précédent, en l'enrichissant au travers des applications dans les techniques médicales, dans la communication, et surtout, dans les technologies quantiques. Ce nouveau programme vient en soutien d'une politique interministérielle de développement des technologies quantiques. Dans le cadre du plan de relance adopté en juin 2020, 2 Mds€ sont fléchés vers ces technologies, dont 400 M€ consacrés au développement de deux ordinateurs. Les ONIEA, et plus particulièrement la photonique, sont déjà au cœur de trois projets « quantiques » soutenus par le BMBF : BrainQSense, Opticlock et QUBE⁽¹⁹⁾. Le progrès technologique sur le quantique constitue pour la photonique, selon les acteurs du secteur, le principal enjeu des années à venir. L'enjeu est d'abord stratégique, en visant à assurer la sécurité de l'information et la puissance de calcul des futurs ordinateurs quantiques. Il est aussi économique, même si, selon le syndicat professionnel Spectaris, les retombées restent encore difficiles à estimer⁽²⁰⁾.

Un encadrement institutionnel et législatif consistant, doté de capacités de recherche conséquentes sur les effets indésirables des ONIEA

L'Office fédéral de radioprotection (*Bundesamt für Strahlenschutz – BfS*)⁽²¹⁾ est l'autorité fédérale responsable de la radioprotection pour l'ensemble de la population. Fort d'une longue expérience dans le domaine de la radioactivité, il prend de plus en plus en considération les rayonnements non ionisants. Le BfS dépend directement du ministère fédéral de l'Environnement, de la Protection de la nature et de la Sécurité des centrales nucléaires (*Bundes-*

ministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit – BMU) et participe au financement de projets portant sur l'impact des ONIEA. Ils incluent non seulement l'étude des conséquences des rayonnements sur l'homme mais aussi sur l'ensemble de la faune et de la flore⁽²²⁾. La commission de radioprotection (*Strahlenschutzkommission – SSK*) est un organe consultatif du BMU composé d'experts indépendants. Il comprend un comité dédié aux ondes non ionisantes, y compris les rayonnements optiques.

Pour les questions de santé et de sécurité au travail liées aux rayonnements non ionisants, l'autorité compétente est l'Institut fédéral pour la sécurité et la santé au travail (*Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin – BAuA*), placé sous la tutelle du ministère fédéral du Travail et des Affaires sociales (*Bundesministerium für Arbeit und Soziales – BMAS*). De manière plus spécialisée, l'Office pour la protection des consommateurs et la sécurité des aliments (*Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit – BVL*), sous tutelle du ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (*Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft – BMEL*), est l'institution de référence pour la régulation des usages dans l'alimentation. Le BMEL dispose à travers l'Institut Max Rübner (MRI) de capacités de recherche sur les effets du traitement des aliments par rayonnement UV. Enfin, le ministère de la Santé (*Bundesministerium für Gesundheit – BMG*) peut s'appuyer sur l'Institut Robert Koch de santé publique (RKI), qui a notamment produit une étude sur les effets de l'utilisation médicale des infrasons et des sons basse fréquence.

Les réseaux de recherche sur la protection contre les radiations intègrent de manière croissante l'enjeu des rayonnements non ionisants. Le réseau de compétence pour la recherche sur les rayonnements (*Kompetenzverbund Strahlenforschung – KVVSF*) assure la coordination des institutions de recherche travaillant dans le domaine des rayonnements, ionisants comme non ionisants, avec un double objectif de mise en relation et de travail commun dans la représentation publique d'intérêts. La société germano-suisse de radioprotection (*Fachverband für Strahlenschutz*) rassemble des chercheurs allemands et suisses travaillant sur les rayonnements ionisants et non ionisants. Membre du réseau IPRA (*International Radiation Protection Association*), la fédération a pour objectifs d'informer le public et de participer à l'élaboration des normes nationales et internationales de radioprotection. Elle comprend un groupe de travail sur les rayonnements non ionisants, avec pour thématiques identifiées les rayonnements solaire, laser, ultraviolet artificiel, visible/infra-rouge, les nuisances lumineuses de voisinage et les champs électromagnétiques⁽²³⁾.

(17) Photonik Forschung Deutschland, « Fördermaßnahme : KMU-innovativ : Photonik/Optische Technologien ». Consultable à l'adresse suivante : <https://www.photonikforschung.de/projekte/kmu-innovativ/foerdermassnahme/kmu-innovativ-photonik.html>

(18) Bundesministerium für Bildung und Forschung, « KMU-innovativ: Photonik und Quantentechnologien ». Consultable à l'adresse suivante : <https://www.bmbf.de/de/kmu-innovativ-photonik-610.html>

(19) LACROIX L. Technologies Quantiques. *Stratégie de recherche en Allemagne*, février 2021.

(20) Spectaris, « Trendreport Photonik 2019/2020 ». Consultable à l'adresse suivante : https://www.spectaris.de/fileadmin/Content/Photonik/Zahlen-Fakten-Publikationen/SPECTARIS_Trendreport_Photonik_2019-2020.pdf

(21) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, « Bundesamt für Strahlenschutz ». Consultable à l'adresse suivante : <https://www.bmu.de/ministerium/aufgaben-und-struktur/bundesbehoerden/bundesamt-fuer-strahlenschutz/>

(22) Bundesamt für Strahlenschutz, « Mögliche Wirkungen elektromagnetischer Felder auf Tiere und Pflanzen ». Consultable à l'adresse suivante : <https://www.bfs.de/DE/bfs/wissenschaft-forschung/stellungnahmen/emf/emf-tiere-pflanzen/emf-tiere-und-pflanzen.html>

(23) Fachverband für Strahlenschutz e.V., « Arbeitskreis Nichtionisierende Strahlung ». Consultable à l'adresse suivante : <https://www.fs-ev.org/arbeitskreise/nichtionisierende-strahlung>

Parmi les réseaux de professionnels jouant un rôle actif dans la recherche sur les ondes non ionisantes, nous pouvons également citer la société allemande pour les ultrasons à usage médical (*Deutsche Gesellschaft für Ultraschall in Medizin – DEGUM*), qui a créé en 2011 sa propre institution de formation, l'académie DEGUM pour les ultrasons (*Ultraschall-Akademie der DEGUM*), encadrant des formations continues, des ateliers et symposiums. La société allemande pour la recherche sur le rayonnement en biologie (*Deutsche Gesellschaft für Biologische Strahlenforschung – DeGSB*) est aussi active sur la question. Parmi les quatre sujets d'intérêt identifiés pour être au cœur de son séminaire annuel de l'année 2020, figurait la « radiobiologie des rayonnements non ionisants ». Ce choix témoigne de l'intérêt des biologistes pour les ONIEA. La société allemande pour l'optique appliquée (*Deutsche Gesellschaft für angewandte Optik – DgaO*) joue un rôle important dans la coordination et le développement d'une recherche liée à l'industrie. Elle se donne également pour mission de promouvoir la place de l'optique dans l'enseignement secondaire et universitaire ⁽²⁴⁾.

Le 5 février 2020, l'Office pour la radioprotection (BfS) a ouvert un nouveau centre de compétence sur les champs électromagnétiques (*Kompetenzzentrum Elektromagnetische Felder*) à Cottbus (Brandebourg), inauguré par la ministre fédérale de l'Environnement, Svenja Schulze ⁽²⁵⁾. Cette inauguration s'inscrit dans le contexte du développement européen du réseau 5G et fait suite à une étude du BfS qui avait souligné, fin 2019, les inquiétudes de la population allemande au sujet de l'impact de la téléphonie mobile et des antennes relais sur la santé ⁽²⁶⁾.

Une législation vigilante en matière de radioprotection et pionnière sur l'encadrement des nouveaux usages

La consistance de cet encadrement institutionnel et des capacités de recherche dans le domaine des ondes non ionisantes apparaît en partie liée aux préoccupations d'une population allemande sensibilisée à la radioprotection en raison de l'inquiétude traditionnelle que suscite chez elle le risque nucléaire. Le cadre législatif est aussi marqué par une approche prudente et régulatrice des usages des rayonnements.

La loi sur la protection contre les effets nocifs sur l'Homme des rayonnements non ionisants lors de leur utilisation (*Gesetz zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung bei*

der Anwendung am Menschen – NiSG) régle depuis le 29 juillet 2009 les applications médicales des rayonnements non ionisants, en obligeant les médecins utilisant ces rayonnements à disposer d'une expertise dans le domaine ou à suivre une formation spécifique ⁽²⁷⁾. Elle distingue trois catégories d'ondes non ionisantes :

- les champs électriques, magnétiques et électromagnétiques (0 à 300 GHz) ;
- les rayonnements optiques (100 nm à 1 mm) ;
- les ultrasons (20 KHz à 1 GHz).

L'ordonnance pour la protection contre les effets nocifs sur l'Homme des rayonnements non ionisants lors de leur utilisation (*Verordnung zum Schutz vor schädlichen Wirkungen nichtionisierender Strahlung bei der Anwendung am Menschen*), qui est entrée en vigueur le 31 décembre 2020, complète la NiSG sur l'utilisation des rayonnements non ionisants à des fins « autres que celles du diagnostic ou du traitement d'un patient, de la détection précoce d'une maladie, des soins prénataux ou de la recherche médicale ». Elle comprend entre autres la régulation de l'utilisation commerciale des rayonnements ultraviolets ⁽²⁸⁾.

Le nouveau règlement limite, depuis le 31 décembre 2020, l'utilisation des rayonnements optiques, hautes fréquences et ultrasons, et l'usage des appareils de stimulation du système nerveux central aux seuls médecins agréés ayant bénéficié d'une formation spécifique. L'utilisation de l'imagerie par ultrasons à des fins non médicales (échographie 3D du fœtus) a été interdite à la même date ⁽²⁹⁾.

A partir du 31 décembre 2021, des restrictions supplémentaires s'appliqueront à l'utilisation d'appareils à basse fréquence, à courant continu et à champ magnétique pour la stimulation musculaire ou nerveuse. Des restrictions s'appliqueront à la même date aux utilisations commerciales de stimulation musculaire électrique, de lumière intense pulsée (épilation), de la haute fréquence et des ultrasons (liposuccion) ⁽³⁰⁾.

La LMBestV (*Lebensmittelbestrahlungsverordnung*) régle depuis le 14 décembre 2000 l'utilisation des rayonnements ionisants et non ionisants pour le traitement des aliments. Elle inclut les méthodes électroniques, rayonnements gamma et X, neutrons et ultraviolets (UV), et complète les directives européennes 1999/2EG, 1999/3/CE et 2000/13/CE. La LMBestV a été révisée le 15 février

(24) TRIAS CONSULT (2019), « Photonics in Germany 2019 ». Consultable à l'adresse suivante : <https://www.gtai.de/resource/blob/81758/8d1e83cb9eeaeccf0f1cb60c8a798f4f/photonics-in-germany-2019-data.pdf>

(25) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, « Grußwort zur Eröffnung des "Kompetenzzentrums Elektromagnetische Felder" », février 2020. Consultable à l'adresse suivante : <https://www.bmu.de/rede/grusswort-zur-eroeffnung-des-kompetenzzentrums-elektromagnetische-felder/>

(26) Bundesamt für Strahlenschutz, « Was denkt Deutschland über Strahlung ? », 2019. Consultable à l'adresse suivante : https://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/berichte/handreichung-strahlenbewusstseinsstudie.pdf?__blob=publicationFile&v=4

(27) Bundesamt für Strahlenschutz, « Verordnungen zum Strahlenschutz ». Consultable à l'adresse suivante : https://www.bfs.de/DE/bfs/gesetze-regelungen/strahlenschutzverordnungen/strahlenschutzverordnungen_node.html

(28) *Ibid.*

(29) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, « FAQ : Wer darf das sogenannte "Ultraschall-Babykino" künftig noch anbieten ? ». Consultable à l'adresse suivante : <https://www.bmu.de/faq/wer-darf-das-sogenannte-ultraschall-babykino-kuenftig-noch-anbieten/>

(30) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, « Kosmetische Anwendung nichtionisierender Strahlung ». Consultable à l'adresse suivante : <https://www.bmu.de/themen/atomenergie-strahlenschutz/strahlenschutz/nichtionisierende-strahlung/kosmetische-anwendung-nichtionisierender-strahlung/>

2019⁽³¹⁾. Le site de l'Office pour la protection du consommateur et la sécurité des aliments (BVL) distingue actuellement trois usages des rayonnements, régulés différemment :

- Le rayonnement gamma ;
- Les rayons X générés par des équipements fonctionnant à une énergie nominale de 5 mégaélectronvolts ou moins ;
- Les électrons générés par des équipements fonctionnant à une énergie nominale de 10 mégaélectronvolts ou moins.

L'inclusion des UV dans le texte portant principalement sur les rayonnements ionisants fait débat parmi la communauté scientifique, car les UV non ionisants sont associés aux autres rayonnements ionisants. Cette prise de position législative semble indiquer, comme dans le secteur médical, une approche législative prudente au regard de l'usage des rayonnements dans le traitement des aliments.

S'agissant du cadre législatif relatif à la radioprotection contre les ondes non ionisantes, il faut noter l'existence d'une étude internationale comparée très détaillée réalisée par l'Office fédéral de radioprotection (BfS). Datant de février 2016, elle est divisée en deux parties, la première traitant des rayonnements électriques, magnétiques et électromagnétiques (0 Hz à 300 GHz)⁽³²⁾ et la seconde des rayonnements optiques⁽³³⁾. Les réglementations françaises et allemandes sont proches, aucun des deux pays n'apparaît globalement ni plus ni moins restrictif. Dans certains cas, dont celui des solariums, l'Allemagne apparaît plus restrictive.

Conclusion

La recherche sur les usages des ONIEA en Allemagne est dominée par le secteur des technologies photoniques. Le pays est caractérisé par un paysage de recherche polycentrique composé d'universités, de centres de recherche extra-universitaires et d'industriels innovants. L'investissement public important fait dans la recherche fondamentale et la contribution forte du secteur privé à une recherche « en commun » au sein des instituts Fraunhofer permettent une coopération approfondie entre la formation, la recherche et l'industrie. Cette organisation doit beaucoup au poids des petites et moyennes entreprises innovantes, qui est important en Allemagne de manière générale et dans le secteur photonique en particulier. L'attractivité de la formation, entretenue par la recherche universitaire et

par des initiatives dédiées comme la création de la *Max Planck School of Photonics*, permet à l'Allemagne de maintenir son *leadership* technologique en attirant les meilleurs talents mondiaux. Le secteur photonique est dominé par l'activité de production de matériels et outils destinés aux usages médicaux et de production industrielle. Plusieurs projets de recherche portent sur les usages dans l'agriculture et l'agroalimentaire, mais leur potentiel semble limité.

Une force du modèle allemand est sa capacité d'exportation, la plus grande et dynamique partie du chiffre d'affaires des secteurs concernés par les ONIEA étant réalisée sur les marchés étrangers. La stagnation ces dernières années du chiffre d'affaires du secteur photonique sur le marché intérieur est largement compensée par la croissance des exportations. La force des industriels allemands positionnés sur ces usages semble reposer sur un relais de croissance à l'export, en premier lieu aux Pays-Bas, aux États-Unis et en Chine, tandis que le marché intérieur permettrait de soutenir les réalisations les plus en pointe. L'Allemagne bénéficie en outre d'une législation protectrice et de capacités de recherche importantes en matière de radioprotection. Enfin, le secteur photonique bénéficie de la vision stratégique de l'État fédéral. L'Allemagne a en effet récemment investi dans les technologies photoniques en vue du développement des technologies quantiques, dont la maîtrise représente un intérêt stratégique certain et un potentiel économique potentiellement très important. Comme pour d'autres domaines (batteries, technologie de l'hydrogène), l'État fédéral suit ici une stratégie de développement sur le territoire allemand des capacités de recherche et industrielles (optiques et photoniques) de base indispensables au développement des technologies (quantiques) futures.

Remerciements

Je tiens à remercier, au sein de l'Ambassade de France à Berlin, Nicolas Cluzel au Service pour la Science et la technologie pour son travail de relecture, Guillaume Prigent au Service économique régional pour son apport en termes d'informations et de mise en contact sur les aspects économiques, Marie Pallot et Alice Anquetin au Service pour les affaires sociales pour leur apport d'informations sur le cadre légal des applications médicales. Mes remerciements vont aussi au personnel scientifique que j'ai pu contacter, notamment à Pascal Malkemper, Aude Silve, Mario Stahl et Hans-Dieter Reidenbach.

Je remercie également pour leurs éclairages Étienne Le Roux, chargé de mission export à Business France, et Valérie Chambrette, directrice de la Société française de radioprotection.

(31) Bundesministerium für Justiz und für Verbraucherschutz, « Lebensmittelbestrahlungsverordnung – LMBestV ». Consultable à l'adresse suivante : https://www.gesetze-im-internet.de/lmbestv_2000/BjNR173000000.html

(32) Bundesamt für Strahlenschutz, « Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz – Band 1 ». Consultable à l'adresse suivante : https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-2016021914007/3/BfS_2016_3614S80010_Bd1.pdf

(33) Bundesamt für Strahlenschutz, « Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz – Band 2 ». Consultable à l'adresse suivante : https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-2016021914007/5/BfS_2016_3614S80010_Bd2.pdf

Bibliographie

LACROIX L. (2021), *Technologies quantiques : stratégie de recherche en Allemagne*, note MEAE.

BUSINESS FRANCE (2020), « Électronique et optique-photonique en Allemagne », fiche Marché.

SPECTARIS (2020), *Eckdaten der Industrie für optische, medizinische und mechatronische Technologien*.

SPECTARIS (2020), *Trendreport Photonik: Märkte, Entwicklungen, Potenziale*.

GÖTTE S. & LUDEWIG Y. (2019), "Was denkt Deutschland über Strahlung ?", Umfrage, Bundesamt für Strahlenschutz.

TRIAS CONSULT (2019), *Photonics in Germany 2019*.

BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ (2019), "Verordnung über die Behandlung von Lebensmitteln mit Elektronen-, Gamma- und Röntgenstrahlen, Neutronen oder ultravioletten Strahlen (Lebensmittelbestrahlungsverordnung – LMBestV)".

BUNDESMINISTERIUMS DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ (2018), "Verordnung zum Schutz vor schädlichen Wirkungen nichtionisierender Strahlung bei der Anwendung am Menschen (NiSV)".

SPECTARIS (2018), *Photonik Spectaris-Spotlight: Daten und Fakten einer Schlüsseltechnologie*.

PERRIN A. & SOUQUES M. (2018), *Champs électromagnétiques, environnement et santé*, EDP Sciences, Collection « InterSections ».

MISSLING S. (dir.) (2016), "Internationaler Vergleich der rechtlichen Regelungen im nicht-ionisierenden Bereich – Band 1: Ländervergleich der Regelungen für elektrische, magnetische und elektro-magnetische Felder (0 Hz – 300 GHz)", Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz.

MISSLING S. (dir.) (2016), "Internationaler Vergleich der rechtlichen Regelungen im nicht-ionisierenden Bereich – Band 2: Ländervergleich der Regelungen im Bereich Optischer Strahlung", Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz.