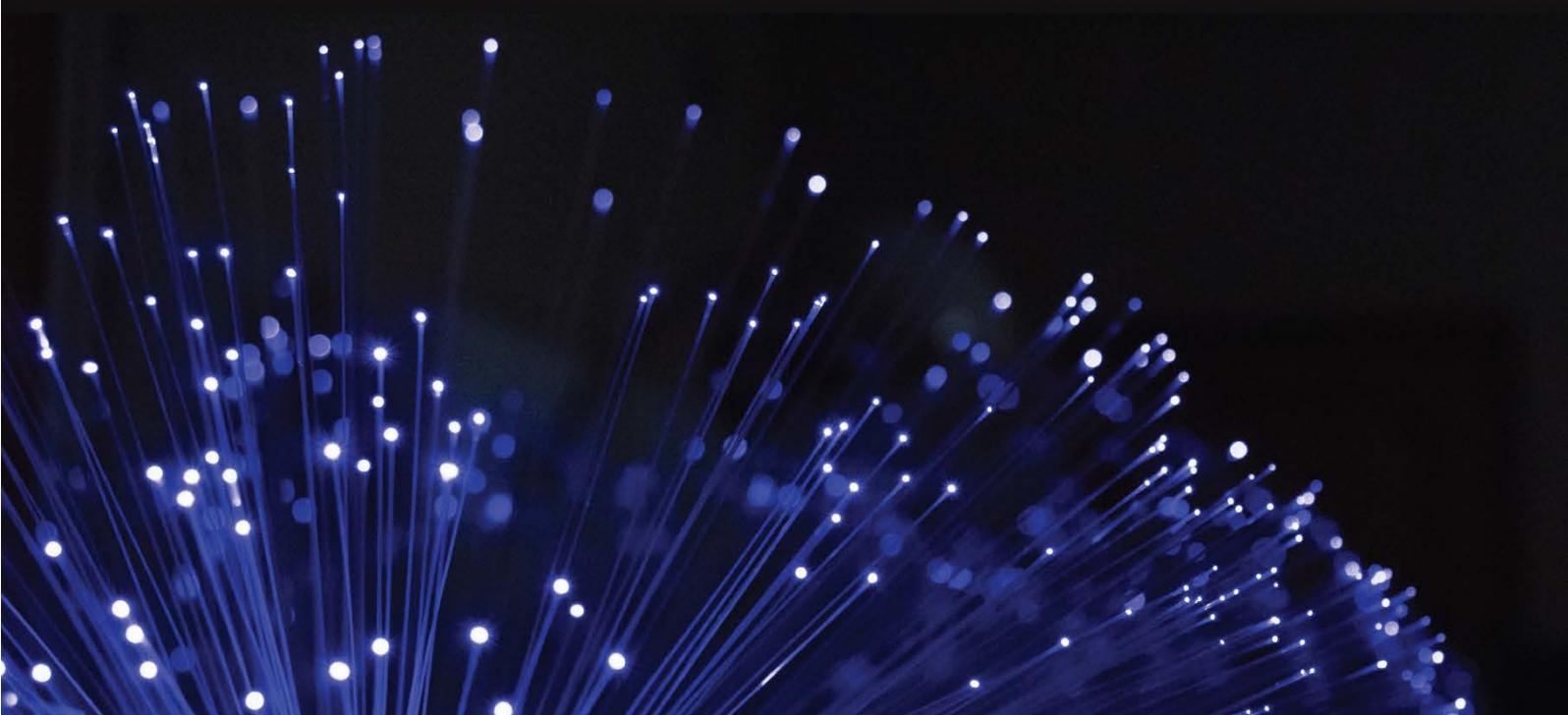


Photonics

France

FEUILLE DE ROUTE DE LA PHOTONIQUE FRANÇAISE

16/05/2018



Photonics France - www.photonics-france.org

13, rue Moreau - 75012 PARIS

Tél. : + 33 1 53 46 27 09 - Email : contact@photonics-france.org

SOMMAIRE

EDITORIAL.....	3
Remerciements.....	3
A propos de Photonics France.....	4
I INTRODUCTION	5
1.1 La photonique, science et industrie de la lumière.....	5
1.2 La photonique en France.....	6
1.3 Deux grandes initiatives guident notre avenir.....	8
2 INITIATIVE N°1 : STRUCTURER LA FILIÈRE.....	9
2.1 Travailler ensemble en créant Photonics France, Fédération de la Photonique française	9
2.2 Communication	9
2.3 Emploi-Formation.....	10
2.4 Plateformes technologiques.....	10
2.5 Synthèse des recommandations pour soutenir et promouvoir la filière par des actions transverses II	
3 INITIATIVE N°2 : INVENTER NOTRE AVENIR EN S'APPUYANT SUR UNE FEUILLE DE ROUTE PARTAGÉE.....	12
3.1 Notre approche : mobiliser le plus grand nombre et impliquer les acteurs des marchés d'application.....	13
3.2 Notre méthode.....	13
3.3 Croisement technologies/marchés.....	15
3.4 Synthèse des recommandations marchés et technologiques.....	16
4 CONCLUSION.....	18
5 ANNEXE 1 : RAPPROCHER L'INDUSTRIE PHOTONIQUE DE SES MARCHÉS D'APPLICATION.....	19
6 ANNEXE 2 : IDENTIFIER LES TECHNOLOGIES PHOTONIQUES D'EXCELLENCE PRÉSENTES ET EN DEVENIR	22
7 ANNEXE 3 - MARCHÉS D'APPLICATION : ENVIRONNEMENT	25
7.1 Enjeux sociétaux, attentes.....	25
7.2 Marché et périmètre	25
7.3 Atouts technologiques de la photonique, fournisseur technologique majeur de la mesure environnementale et du traitement des contaminations.....	26

7.4	Sous-marchés prioritaires	26
7.5	Lieux d'échange.....	27
8	ANNEXE 4 - MARCHÉS D'APPLICATION : AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE	28
8.1	Enjeux sociétaux et attentes citoyennes.....	28
8.2	Marché et périmètre	29
8.3	Lieux d'échange marché/photonique.....	31
8.4	Sous-marchés prioritaires	31
8.5	Recommandations technologiques.....	32
8.6	Fonctions technologiques prioritaires.....	33
9	ANNEXE 5 - MARCHÉS D'APPLICATION : MEDICAL ET VIVANT	34
9.1	Enjeux sociétaux.....	34
9.2	Marché et périmètre	34
9.3	Lieux d'échange.....	34
9.4	Sous-marchés prioritaires	34
9.5	Fonctions technologiques prioritaires.....	35
9.6	Recommandations technologiques.....	36
10	ANNEXE 6 - MARCHÉS D'APPLICATION : USINE DU FUTUR.....	37
10.1	Enjeux sociétaux.....	37
10.2	Marché et périmètre	38
10.3	Lieux.....	38
10.4	Sous-marchés prioritaires	38
10.5	Fonctions technologiques prioritaires.....	39
10.6	Recommandations technologiques.....	40
10.7	Autres recommandations.....	41
11	ANNEXE 7 - MARCHÉS D'APPLICATION : ÉCLAIRAGE STATIONNAIRE	42
11.1	Le futur de l'éclairage.....	42
11.2	Marché et périmètre	43
11.3	Lieux d'échange.....	44
11.4	Fonctions technologiques prioritaires.....	44
11.5	Roadmap technologique	45
12	ANNEXE 8 - MARCHÉS D'APPLICATION : TRANSPORT ET MOBILITE : AERONAUTIQUE, FERROVIAIRE, MARITIME, TRANSPORTS COLLECTIFS, AUTOMOBILE.....	46
13	ANNEXE 9 - TECHNOLOGIES PHOTONIQUES D'EXCELLENCE : IMAGEURS ET VISION.....	47

13.1	Caractéristiques de l'industrie du domaine	47
13.2	Forces faiblesses	47
13.3	Recommandations.....	48
14	ANNEXE 10 - TECHNOLOGIES PHOTONIQUES D'EXCELLENCE : LASERS	49
14.1	Les caractéristiques de l'industrie française du domaine : un panorama très varié.....	49
14.2	Forces faiblesses	49
14.3	Les recommandations	50
15	ANNEXE 11 - TECHNOLOGIES PHOTONIQUES D'EXCELLENCE : OPTIQUE ET OPTO-MECANIQUE.....	52
15.1	Les caractéristiques de l'industrie du domaine.....	52
15.2	Forces faiblesses	52
15.3	Les recommandations	53
16	ANNEXE 12 - TECHNOLOGIES PHOTONIQUES D'EXCELLENCE : SEMICONDUCTEURS ET INTEGRATION	55
16.1	Les caractéristiques de l'industrie française du domaine.....	55
16.2	Forces faiblesses	55
16.3	Les recommandations	56
17	ANNEXE 13 - TECHNOLOGIES PHOTONIQUES D'EXCELLENCE : PHOTONIQUE QUANTIQUE.....	58

EDITORIAL

Assurément, la photonique ou science et technologie de la lumière est LA technologie du 21^{ème} qui révolutionne et révolutionnera nos usages tant les découvertes scientifiques sont majeures, tant les possibilités technologiques sont infinies dans tous les domaines d'applications en particulier pour les grands enjeux sociétaux. La photonique doit donc être connue, reconnue et soutenue pour ses atouts et ses capacités notamment en France où l'excellence de la recherche et de l'industrie est encore trop méconnue alors qu'elle est un des pays majeurs sur la scène internationale !

Notre filière, forte de 1000 entreprises, emploie 80 000 personnes et réalise 15 milliards de chiffres d'affaire. Si nous sommes animés par la passion de la science et de la technologie, les acteurs des domaines applicatifs connaissent, eux, les usages de leurs clients finaux. Créer le dialogue entre les besoins et l'offre technologique est donc indispensable afin de promouvoir la photonique et les solutions technologiques qu'elle offre.

Initié et animé par Photonics France, la fédération de la photonique française, ce dialogue entre les acteurs qui la composent et les intégrateurs et utilisateurs de nos technologies a abouti à notre Feuille de Route présentée ici.

Notre Feuille de Route de la Photonique Française a deux objectifs : interne d'abord en favorisant les échanges au sein de la filière et externe en nous faisant mieux connaître et reconnaître par les pouvoirs publics, les acteurs des applications et des autres technologies et des jeunes qui trouveront de nouvelles solutions et à qui la photonique garantira un emploi aujourd'hui et demain.

REMERCIEMENTS

Notre Feuille de Route de la Photonique Française est le fruit du travail démarré en septembre 2017 par plus d'une soixantaine d'acteurs de la photonique réunis en groupes de travail, en particulier des industriels des domaines technologiques et applicatifs choisis ici. Qu'ils soient ici remerciés pour leurs contributions.

Nous tenons à remercier particulièrement les pilotes des groupes de travail thématiques pour la continuité de leurs efforts, la recherche de contributions les plus larges possibles tout en réussissant à en faire la synthèse. Merci donc à Jacques Cochard, Laurent Fulbert, Karl Gedda, Thierry Georges, Benoît d'Humières, Eneka Idiart Barsoum, Christophe Lacroix, Denis Levillant, John Lopez, Philippe Métivier, Patrick Mottier, Paul Sauvageot

Ces travaux ont été coordonnés et pilotés par Jean-Claude Fontanella, Thierry Georges et Ivan Testart. Un grand merci tout particulier à Jean-Claude Fontanella pour son engagement et sa contribution à notre Feuille de Route de la photonique.

A PROPOS DE PHOTONICS FRANCE

Association loi 1901, Photonics France a été créée le 24 avril 2018. Elle est le fruit de la fusion de l'AFOP, le syndicat professionnel et du CNOP, le comité national.

Photonics France est la fédération française de la photonique qui regroupe les industriels, les académiques et les associations de la photonique en France.

Photonics France est le représentant et l'interlocuteur national unique et légitime de la filière photonique avec plus de 110 membres dont plusieurs grandes entreprises, ETI, TPE/PME, start-up, clusters, pôles de compétitivité, société savante et club. Son écosystème assure une représentativité incontestable de la filière photonique française.

Promouvoir la filière au niveau national et international

Notre ambition est de permettre le développement et la promotion de la filière au niveau national et européen, de susciter et labelliser voire coordonner des projets, de se rapprocher des filières transverses et applicatives et adapter les formations aux besoins d'aujourd'hui et des métiers de demain.

Représenter, coordonner et défendre

Photonics France a vocation à être l'interlocuteur connu, reconnu et légitime au niveau national et international en assurant le rôle de syndicat professionnel pour défendre les intérêts de la filière et de ses adhérents. Elle coordonne et assure la cohérence des actions régionales, nationales et internationales et poursuit la rédaction et la mise en œuvre de la « Feuille de Route de la Photonique française » avec le soutien de nos interlocuteurs étatiques.

Accompagner et servir

Enfin, Photonics France développe et améliore les services aux adhérents à travers l'organisation et l'animation d'évènements thématiques, des offres salons, la promotion de leur savoir-faire ou encore des services économiques, techniques, règlementaires.

Nous appelons tous les acteurs français intéressés par la photonique : industriels, académiques et associations à nous rejoindre pour renforcer notre représentativité, nos actions et nos services.

Pour adhérer à Photonics France, contactez-nous :

contact@photonics-france.org / 01 53 46 27 09

www.photonics-france.org

1 INTRODUCTION

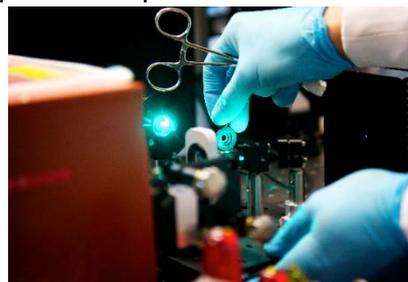
1.1 LA PHOTONIQUE, SCIENCE ET INDUSTRIE DE LA LUMIERE

La photonique désigne les sciences et les techniques qui génèrent, émettent, détectent, collectent, transmettent, modulent, amplifient ou modifient les flux de photons, c'est-à-dire la lumière. La photonique est donc la technologie qui permet toutes les applications industrielles de la lumière, telles que l'éclairage, l'usinage laser, les télécommunications par fibre optique et bien d'autres.

Jusqu'en 1960, la science de la lumière était « l'optique » (voir encadré). Mais les avancées scientifiques du XXe siècle, avec notamment les lasers puis la fibre optique, ont considérablement élargi les champs d'exploitation de la lumière. Le terme "optique" devenait trop restrictif, la communauté scientifique et industrielle internationale a alors adopté le terme "photonique", la science du photon.

La photonique a été retenue par l'Union Européenne comme l'une des 6 technologies-clés du 21ème siècle (« Key Enabling Technology KET ») car elle apporte un potentiel considérable d'innovation et de différenciation dans tous ses domaines applicatifs. Certains même prédisent que la photonique sera au 21ème siècle ce que l'électronique a été au 20ème siècle !

La photonique est par nature "transverse". Elle est présente dans presque tous les produits. Écrans, caméras, capteurs de mouvement et de proximité, sont indispensables aux téléphones et ordinateurs mais aussi aux machines à laver ! Phares, tableau de bord, et capteurs avancés sont essentiels à la voiture. Mais la photonique est aussi invisible ou non perçue comme telle ; des équipements à cœur photonique comme le scanner médical ou l'endoscope ne sont pas perçus comme "photoniques" mais comme dispositifs médicaux !



Crédit : Amplitude Systèmes

Le premier et plus grand challenge que doit relever l'industrie photonique française est de se faire connaître et de se rendre lisible pour recruter de nouveaux étudiants, attirer des talents, être reconnue par les pouvoirs publics.

C'est d'autant plus crucial et stratégique que la photonique invente et prépare aujourd'hui les produits qui vont révolutionner les secteurs traditionnels. Après avoir été à la fondation de la révolution numérique avec la fibre optique et le laser, la photonique est au cœur de l'agriculture de précision, de la médecine personnalisée et de proximité, de la prévention des maladies, des nouvelles mobilités et de l'industrie 4.0.

Pour prendre toute sa place dans ces domaines de haute technologie, mondialisés et fortement compétitifs, l'industrie photonique française veut être encore plus proche de ses secteurs applicatifs : bien comprendre leurs besoins, expliciter et démontrer le potentiel des solutions photoniques, sûres, abordables et simples d'usage, voilà le second grand challenge à relever.

Quand une technique millénaire doit changer de nom

La technologie de maîtrise de la lumière est l'une des plus anciennes qui soit. En domestiquant le feu, nos ancêtres ne gagnaient pas seulement la capacité de se protéger, cuire leurs aliments et façonner des outils performants, ils pouvaient aussi prolonger le jour et accroître considérablement leur phase de veille, propice à l'échange, à l'imaginaire et au travail manuel. Grâce à la lampe à graisse nos ancêtres ont pu produire leurs magnifiques œuvres d'art à Lascaux, Altamira ou Chauvet.

Bien plus tard, la légende dit qu'Archimède a mis au point des miroirs géants pour réfléchir et concentrer les rayons du soleil et enflammer les voiles des navires romains qui assiégeaient Syracuse. Au Moyen-Âge, Ibn al-Haytham (965-1039), savant arabe, jette les bases de l'optique moderne. Depuis, Galilée, Kepler, Descartes, Maxwell, Einstein, Louis de Broglie et presque tous les géants scientifiques de l'histoire ont fait progresser la science de la lumière. Les questionnements sur la propagation de la lumière ont été à l'origine de la révolution de la physique du XXe siècle, de l'invention de la théorie de la relativité et de l'émergence de la physique quantique.

L'industrie de la lumière, démarre avec la révolution industrielle. La Manufacture royale des glaces de miroirs, fondée en 1665, fournit les miroirs de la galerie des Glaces du Château de Versailles. Elle prospère encore aujourd'hui à travers SAINT-GOBAIN. SOLEIL, devenue aujourd'hui HORIBA Scientific est enregistrée en 1819. ESSILOR, est créée en 1849, la même année que LEICA en Allemagne.

Deux découvertes vont ouvrir des champs d'applications considérables. D'une part, la lumière peut être comprise comme à la fois un flux de particules, appelées photons, et une onde électromagnétique. Cette dualité onde-corpuscule est à l'origine du laser ou des caméras numériques. D'autre part, le spectre des longueurs d'onde s'étend bien au-delà de ce que voit l'œil ; ce sont les ultraviolets, qui nous font bronzer et stérilisent, les rayons X, base de la radiographie, les rayons gamma, venus de l'espace ou produits par la radioactivité. C'est aussi le rayonnement infrarouge, qui transporte l'information dans les fibres optiques et permet de voir dans la nuit.

Pour embrasser ces bouleversements, la science optique, millénaire d'histoire, devait changer de nom et devenir la photonique, la science du photon.

Au 21^{ème} siècle, la révolution se poursuit : la photonique est au cœur de la seconde révolution quantique. Elle a déjà donné lieu à des découvertes comme par exemple, les atomes "refroidis" par laser, qui donnent les horloges ultrastables, ou les photons "jumeaux", base de la cryptographie quantique et au cœur des futures communications sécurisées.

C'est paradoxal mais la photonique reste une science discrète. Comme Monsieur Jourdain faisait de la prose sans le savoir, nous vivons tous grâce à la photonique sans y penser. Prenez votre téléphone en main : que voyez-vous en premier ? Un écran tactile indispensable pour téléphoner ! Tournez-le et découvrez les lentilles de la caméra embarquée, les LEDs du flash, les capteurs de reconnaissance faciale ou le capteur qui désactive automatiquement l'écran digital lorsque vous téléphonez.

Tous les secteurs, transports, médecine, bâtiment, industrie, éducation, communications, culture..., absolument tous les secteurs ont besoin de la photonique. Au XXe siècle, on a parlé de la révolution du transistor et de l'électronique. Au XXIe, l'accélération du digital nous donne le vertige. Mais aucune de ces mutations n'aurait pu exister sans la discrète et omniprésente photonique. Aujourd'hui, elle apparaît au grand jour et n'a pas fini de nous surprendre.

1.2 LA PHOTONIQUE EN FRANCE

L'optique et la photonique française ont déjà une très longue histoire en France. Leur écosystème de formation et de recherche est de niveau mondial. Il comprend plus de 5 000 chercheurs, plus de 100 thèses actives annuellement. Plus de 2 500 brevets ont été déposés ces 15 dernières années. Il est capable d'innover et d'irriguer un tissu industriel fait de plus de 1000

entreprises, générant une activité estimée à 15 milliards d'euros avec plus de 80 000 emplois hautement qualifiés, opérant sur un marché mondial estimé à 447 milliards d'euros en 2015, et estimé à 525 milliards d'euros en 2020.¹

La photonique européenne, solide et compétitive

L'association professionnelle européenne Photonics21 a publié en 2017 un état des lieux de la photonique européenne. En voici quelques extraits :

- ▶ Marché Mondial de la photonique : 228 G€ en 2005 et 447 G€ en 2015, estimé à 525 G€ en 2020
- ▶ Le taux de croissance de l'industrie photonique est 2 fois supérieur à la croissance mondiale
- ▶ Le premier pays producteur est la Chine, même si chaque continent présente une spécialité (par exemple : écrans et photovoltaïque en Asie)
- ▶ L'Europe est numéro 2 avec 15,5% de part de marchés, devant le Japon puis les USA
- ▶ Elle est leader sur ces segments d'excellence :
 - 50% du marché des lasers et des systèmes de lithographie
 - 35% du marché de la mesure et de la vision – L'Europe gagne des parts de marché dans ces secteurs
 - 32% dans les composants et systèmes optiques
 - 28% dans le médical et la photonique pour les sciences du vivant
 - 26% dans la défense et la sécurité
 - 24% dans l'éclairage.

Dans ce marché global, la production manufacturière de la France représente près de 15 G€.

Au-delà des groupes de taille mondiale comme THALES, SAFRAN, ESSILOR ou VALEO, la photonique française c'est un tissu d'entrepreneurs enthousiastes et talentueux : 40% des entreprises photoniques françaises ont moins de 10 ans d'âge ! Soutenues à la hauteur de leur potentiel, elles seront à la pointe du renouveau industriel attendu par tous.

Ce dynamisme de l'industrie photonique n'est pas qu'une promesse. C'est une réalité d'aujourd'hui. Dès à présent, nos futurs champions industriels génèrent de nouveaux emplois et recrutent en nombre, des ingénieurs bien sûr, mais aussi des techniciens, des commerciaux, des compagnons polisseurs ou des ouvriers qualifiés.

Car pour sa fabrication, cette industrie de haute science et de très haute technologie a encore besoin de l'intelligence de la main, celle qui lui a donné naissance à la préhistoire, bien avant l'invention de l'écriture (voir encadré).

Les acteurs français, scientifiques, industriels ou enseignants, tous passionnés, sont en action et posent aujourd'hui un diagnostic sur leur filière. Ce document, conçu comme une « feuille de Route », est une synthèse de réflexions, de recommandations d'actions, pour certaines déjà entamées. Cette première feuille de route a donc pour objectif de tracer les voies possibles pour mettre le formidable potentiel de notre filière photonique au service de l'industrie, des emplois et de la richesse de la France. C'est pourquoi nous souhaitons la faire connaître de tous et la partager largement.

¹ Sources : DGE "La photonique en France" 2015 / Photonics21, "Market Research Study Photonics 2017".

1.3 DEUX GRANDES INITIATIVES GUIDENT NOTRE AVENIR

1. Engager des actions structurantes pour la filière industrielle pour se faire connaître, se rendre lisible pour attirer des talents, être reconnus par les pouvoirs publics

- ▶ Structurer la filière en créant « Photonics France » - fédération française de la photonique - pour être plus lisible, plus visible, plus efficace et mieux coordonnés
- ▶ Faire connaître le terme "Photonique" et les technologies associées au plus grand nombre pour attirer les talents
- ▶ Introduire le terme "Photonique" dans les manuels scolaires
- ▶ Démultiplier les formations pour créer des emplois qualifiés répondant à la demande actuelle et aux métiers de demain
- ▶ Coordonner et développer les plateformes technologiques

2. Se rapprocher des secteurs applicatifs et lancer avec eux des projets technologiques et industriels communs

- ▶ Définir les axes stratégiques de développement de la filière
- ▶ Les expliciter pour les rendre visibles et lisibles auprès de tous les publics, en particulier les acteurs économiques et les Pouvoirs Publics
- ▶ Se rapprocher des secteurs d'applications français les plus porteurs pour permettre à l'industrie photonique nationale :
 - de proposer de nouvelles solutions adaptées à leurs besoins
 - d'accélérer son développement et sa compétitivité en s'appuyant sur son marché intérieur
- ▶ Se rapprocher d'autres filières technologiques indispensables (intelligence artificielle, électronique, design...) pour développer les solutions à cœur photonique attendus par les marchés d'application.



2 INITIATIVE N°1 : STRUCTURER LA FILIÈRE

2.1 TRAVAILLER ENSEMBLE EN CREANT PHOTONICS FRANCE, FEDERATION DE LA PHOTONIQUE FRANÇAISE

Jusqu'à présent, la filière photonique a été représentée par deux entités nationales : l'AFOP, syndicat professionnel, et le CNOP, comité national. Les rôles respectifs et responsabilités de ses deux associations vis-à-vis des Pouvoirs Publics apparaissaient entremêlés et étaient souvent mal compris par les acteurs et les institutions.

La majorité des adhérents respectifs à ces deux associations, avec le soutien des pouvoirs publics (DGE, DGA, et autres Ministères) ont appelé de leurs vœux un regroupement de ces deux entités pour disposer d'un point d'entrée unique, partager les moyens et au-delà, impulser un nouvel élan à cette filière technologique à fort potentiel.

L'AFOP et le CNOP se sont regroupés le 24 avril 2018 pour créer une seule association professionnelle : "Photonics France" qui est la fédération de la photonique française. (www.photonics-france.org).

Les membres de la fédération sont les industriels et académiques issus de l'AFOP et les membres du CNOP à savoir : les associations régionales (ALPHA – Route des Lasers & des Hyperfréquences, Cluster Lumière, Photonics Bretagne, Minalogic, OpticsValley, Pôle des Microtechniques) et les associations nationales (Société Française d'Optique et Club Laser et Procédés).

L'ambition de ce projet est de permettre l'extension dans le temps de cette fédération à l'ensemble des acteurs de la photonique française qui le souhaiteraient, acteurs scientifiques, académiques, industriels ou investisseurs qui verront dans ce projet l'opportunité de développer la filière et de se développer.

2.2 COMMUNICATION

Dans les revues françaises scientifiques telles que *Pour la Science*, *Science et Vie*, dans les revues technologiques comme *Usine Nouvelle* ou *Industrie et Technologie* et même dans la presse économique telle que *Les Échos*, les sciences et technologies photoniques sont parmi les plus relayées car très innovantes et donnant lieu à des innovations spectaculaires.

Mais la presse utilise peu le terme "photonique". Un scanner est un "dispositif médical" mais n'est pas perçu comme "à cœur photonique". Pour la défense, c'est le terme "optronique" qui est utilisé tandis que le téléviseur est un produit "électronique grand public". Un travail important de communication est à faire pour faire connaître la place réelle de la photonique dans notre industrie mais aussi dans la vie quotidienne.



Les acteurs de la photonique sont les premiers concernés. Au sein même de leur métier, parvenir à remplacer les vieux termes : optique, optronique, optoélectronique, électro-optique etc..., par le mot "photonique" créera sans aucun doute un saut de visibilité spectaculaire pour la filière.

Cet effort doit être aussi poursuivi auprès des secteurs d'applications, pour faire reconnaître le rôle de la photonique dans tous les équipements et montrer qu'elle est au cœur des révolutions technologiques qui se préparent.

2.3 EMPLOI-FORMATION

La filière photonique connaît une croissance élevée. Elle vit aujourd'hui des mutations majeures internes qui créent des opportunités à saisir. Pour réussir, les entreprises photoniques rencontrent de nouveaux besoins de compétences, techniques mais aussi marketing, industrielles et commerciales. Or :

- ▶ Les recrutements dans la filière sont de plus en plus difficiles avec un déficit de candidats sur le marché à tous les niveaux, des bacheliers jusqu'au thésard.
- ▶ La filière et ses métiers sont peu ou pas connus des acteurs de l'éducation, du recrutement ou de l'orientation.
- ▶ Les entreprises des marchés d'application manquent de compétence photonique pour dialoguer avec les acteurs de la filière.

Face à ces constats, Photonics France prévoit des actions basées sur les axes structurants suivants :

1. **Anticiper la mutation des métiers et des besoins en compétences à l'aide d'études régulières, d'état des lieux et de prospective**
2. **Faire connaître l'attractivité des métiers de la photonique auprès des jeunes dans les lycées et les collèges – faire entrer le mot "Photonique" dans les manuels scolaires**
3. **Améliorer les formations initiales et continues, et faire connaître la photonique dans les formations des secteurs d'application.**

2.4 PLATEFORMES TECHNOLOGIQUES

Les plateformes évoquées ici sont des interfaces entre la recherche et l'industrie. Leur rôle consiste à faire mûrir de nouveaux concepts ou procédés et à développer l'usage et l'appropriation de la photonique. Certaines visent à donner accès à des infrastructures gérées par le secteur académique mais utiles ponctuellement à des entreprises. Au-delà de cette définition très générale, la notion de plateforme recouvre une multitude de statuts et d'activités. Toutefois, leur rôle est essentiel. En effet, dans d'autres pays, les activités applicatives sont directement intégrées dans les laboratoires de recherche. **En France, une part importante des transferts de technologies et surtout de maturation se font à travers ces plateformes.**



Crédit : Pyla

Certaines sont des structures indépendantes, comme par exemple les Centres de Ressources Technologiques (CRT). D'autres sont plus intégrées dans les laboratoires académiques et gèrent souvent des équipements de recherche mis ponctuellement à la disposition des entreprises. C'est le cas par exemple des EQUIPEX, financés par les programmes d'investissements d'avenir.

À l'image de la diversité du secteur, les plateformes photoniques sont le plus souvent spécialisées sur un thème d'excellence. En voici quelques exemples -une liste plus exhaustive est disponible dans la feuille de route détaillée- :

- ▶ **CRT** : IREPA LASER (Illkirch-Graffenstaden), Photonics Bretagne/PERFOS (Lannion), ALPhANOV (Bordeaux), Institut Maupertuis (Rennes)
- ▶ **Plateformes mutualisées des laboratoires académiques et Equipex** : Platinom (Limoges), Fibertech (Lille), PEMOA (Marseille), Persyst/CCLO (Lannion), ManuTech USD (Saint-Étienne), EXTRA (Montpellier).

En complément des plateformes photoniques, l'industrie et la recherche académique doivent créer ou renforcer leurs liens avec les plateformes des secteurs d'applications, qui participeront à l'appropriation des technologies photoniques dans leurs filières respectives (agro-agri, environnement, industrie, etc...).

2.5 SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS POUR SOUTENIR ET PROMOUVOIR LA FILIÈRE PAR DES ACTIONS TRANSVERSES

2.5.1 Communication

- ▶ Créer l'unité de la profession autour du terme photonique :
 - Créer la « famille photonique » en unifiant le lexique et la terminologie Photonique
 - Influencer auprès des relais d'information pour identifier et valoriser la photonique
 - Développer des outils de communication : réseaux sociaux, site internet...
- ▶ Faire connaître la photonique comme technologie d'avenir vers les filières industrielles :
 - Réaliser et diffuser des outils de communication et de promotion
 - Augmenter, diversifier et coordonner les animations pour diffuser la photonique
- ▶ Diffuser la photonique vers le grand public et les jeunes :
 - Créer des liens avec les acteurs de la Culture Scientifique et Technique
 - Créer des outils et participer aux événements de diffusion de CST (Fête la Science, Semaine de l'Industrie)

2.5.2 Emploi formation

- ▶ Anticiper la mutation des métiers et des besoins en compétences de demain
 - Réaliser une étude prospective des emplois et des compétences d'envergure
 - Mettre en place des outils d'observation en continu (observatoire)
- ▶ Favoriser l'attractivité des métiers et des formations
 - Donner de la visibilité à la photonique dans les processus d'orientation
 - Construire des outils de communication en direction des jeunes et les mettre à disposition
 - Promouvoir les métiers et les formations dans les manifestations et les salons professionnels
 - Augmenter la place de la photonique dans les programmes de collège et de lycée
 - Favoriser la formation des enseignants du second degré
- ▶ Adapter le contenu des formations initiales
 - Développer les interfaces entre entreprises et formations
 - Diffuser la photonique dans les formations adressant les secteurs applicatifs
 - Favoriser la création de formations complémentaires
- ▶ Adapter les modalités de formation continue
 - Favoriser le développement de formations sur mesure
 - Développer les outils pédagogiques pour une meilleure efficacité

2.5.3 Plateformes

- ▶ Développer l'usage des technologies photoniques et leur appropriation
- ▶ Relancer une initiative Carnot fédératrice pour la Photonique à l'échelle nationale
- ▶ Permettre aux PME de bénéficier du taux bonifié x2 de leur effort de recherche contractualisée avec ces plateformes
- ▶ Rééquilibrer les financements régionaux et nationaux en intégrant des contrats d'objectif nationaux.
- ▶ Promouvoir les plateformes applicatives à travers Photonics France.

3 INITIATIVE N°2 : INVENTER NOTRE AVENIR EN S'APPUYANT SUR UNE FEUILLE DE ROUTE PARTAGÉE

La photonique a vécu un tournant avec le déploiement de la fibre optique dans les réseaux télécoms dans les années 1990. Les fibres, mais aussi les lasers, les détecteurs et toute une série de composants ont été déployés en grande série, générant deux phénomènes structurants : **la miniaturisation des composants et la baisse des coûts**. Les autres secteurs applicatifs se sont appropriés les composants initialement produits pour les marchés télécoms et les ont adaptés à leurs usages. Ce phénomène de "détournement créatif" se poursuit aujourd'hui : les caméras de téléphones mobiles sont devenues minuscules, ne coûtent que quelques euros et sont intégrées dans les drones ou les interphones.

En parallèle, **de nouveaux besoins « sociétaux » ont émergé** : sûreté de la chaîne alimentaire, autonomie et sécurité des transports, économie d'énergie et préservation de l'environnement, médecine préventive et personnalisée, ...

La photonique bénéficie d'une opportunité inédite, fruit de la convergence de ces deux évolutions : la photonique est probablement la seule technologie permettant de créer ces dispositifs de mesure à la fois légers, peu chers et intelligents pour répondre à des demandes complexes comme l'analyse de l'air, le diagnostic précoce du cancer ou le traitement des pathologies in vivo.

Pour exploiter cette convergence, l'industrie photonique doit savoir se transformer : de fournisseur de composants, elle doit devenir fournisseur de solutions. Mais encore faut-il entendre les souhaits et les besoins des entreprises et des acteurs des secteurs d'applications. Encore faut-il comprendre leur vocabulaire et le traduire en termes photoniques. Et dans l'autre sens, encore faut-il démontrer le potentiel de la photonique en proposant des solutions sûres, abordables et simples d'usage.

En 2014, une étude effectuée pour le Ministère de l'Industrie² avait sélectionné les secteurs d'application français les plus prometteurs, exploitant le marché intérieur et le potentiel technologique de l'industrie française pour inventer des produits compétitifs au niveau mondial : **médical et vivant, environnement, agriculture et industrie agro-alimentaire, éclairage stationnaire, transport et mobilité, usine du futur**. Les deux secteurs "Défense/Sécurité/Espace" et "Grands instruments scientifiques" ont été considérés comme suffisamment forts pour ne pas nécessiter d'action spécifique.



Crédit : ISP System

Si le rapprochement avec les secteurs d'application est la première priorité, la création de lien avec les autres filières technologiques est la seconde : tout équipement à cœur photonique - caméra, capteur, laser, spectromètre - ne peut fonctionner sans un environnement support fait de mécanique, d'électronique, de design, d'ergonomie, de traitement du signal, et d'intelligence artificielle. Proposer des solutions photoniques nécessite la synergie avec ces métiers.

Cette feuille de route a pour but d'accélérer ces rapprochements avec les secteurs applicatifs et les autres filières technologiques.

² Sources : DGE "La photonique en France" 2015 / Photonics21, "Market Research Study Photonics 2017".

3.1 NOTRE APPROCHE : MOBILISER LE PLUS GRAND NOMBRE ET IMPLIQUER LES ACTEURS DES MARCHES D'APPLICATION

La méthode d'élaboration de la feuille de route est aussi importante que le résultat. **Elle est la démonstration dans les faits de la volonté des acteurs de la photonique française de travailler ensemble et de construire une vision stratégique partagée avec les marchés applicatifs.**

La feuille de route est ainsi l'occasion de mobiliser un grand nombre d'industriels et acteurs de la photonique, tous volontaires pour contribuer au projet commun. Elle prévoit aussi de fortement impliquer les acteurs des secteurs d'application sous la forme de consultations, d'entretiens et de relectures.

Le second objectif peut paraître surprenant tant il semble relever du bon sens. Mais n'oublions pas que certains secteurs commencent tout juste à entrevoir le potentiel de la photonique pour répondre à leurs besoins. Ces processus sont longs et les échelles de temps se comptent en années. L'industrie agroalimentaire, par exemple, connaît et maîtrise la tôlerie industrielle puisqu'elle l'exploite depuis des décennies. Elle a recruté des ingénieurs capables de discuter avec les fournisseurs de cuves, de spécifier et concevoir de nouveaux produits et de les maintenir. Ce processus est encore très émergent pour la photonique. L'industrie agroalimentaire n'a pas encore recruté de personnels qualifiés pour évaluer et tirer parti des atouts de la photonique.

De même l'industrie photonique découvre les problèmes à résoudre dans les marchés d'application, même si certaines entreprises n'ont pas attendu la feuille de route pour prospecter individuellement et réussir dans les secteurs qu'ils servent.

3.2 NOTRE METHODE

Nous avons adopté la méthode suivante : Des groupes de travail ont été constitués pour avancer selon 6 axes de développement « marché » :

- ▶ Comprendre les marchés d'application français et leurs besoins.
 - Six grands marchés applicatifs ont été sélectionnés suivant des critères :
 - de potentiel de croissance pour la photonique
 - de solidité des filières applicatives au niveau français pour que les technologies développées pour les clients français servent aussi à l'international.
 - Liste des 6 marchés (Annexe I)
 - Médical et vivant
 - Usine du futur
 - Environnement
 - Agriculture et agroalimentaire
 - Éclairage stationnaire
 - Transport et mobilité : aéronautique, ferroviaire, maritime, transports collectifs, automobile
- ▶ Dresser l'inventaire des technologies photoniques françaises d'excellence présentes et futures voir (Annexe 2) : imageurs et vision, lasers, optique et opto-mécanique, nanophotonique et intégration, photonique quantique.
- ▶ Les croiser avec les besoins identifiés des marchés d'application, afin de dégager des actions technologiques prioritaires

- ▶ Élaborer des actions transverses spécifiques vers ces marchés :
 - Communication et promotion de la photonique auprès de tous les publics
 - Emploi et formation
 - Rôle et apports des plateformes techniques comme outil de transfert des technologies photoniques vers les marchés d'application.

Chaque groupe de travail a élaboré sa contribution au cours de l'année 2017 pour fournir une synthèse début 2018. Puis ces éléments ont été mis en commun pour produire cette présente feuille de route comprenant deux documents :

- ▶ La présente synthèse destinée à tous les publics
- ▶ Un rapport détaillé s'adressant plus particulièrement aux acteurs de la photonique et au Pouvoirs Publics et présentant une analyse détaillée de notre vision ainsi qu'une liste de recommandations et d'actions à entreprendre.

3.3 CROISEMENT TECHNOLOGIES/MARCHES

Le tableau ci-dessous est une première tentative de synthèse de croisement technologies/marchés. Il vise à illustrer le caractère transversal et diffusant de la photonique.

Tous les acteurs de la photonique -entreprises, organismes de recherche et institutionnels- sont invités à s'approprier cette feuille de route, à construire des consortiums et à bâtir des alliances avec les acteurs des secteurs d'application pour exploiter l'excellence des savoir-faire français et inventer les produits et marchés de demain.

L'Europe l'a déjà reconnu à travers les démarches de "Key Enabling Technologies". La photonique est essentielle pour maintenir la compétitivité d'un pays dans la course à la high-tech. C'est un enjeu stratégique en termes d'emplois, pas seulement des emplois dans la photonique, mais aussi dans tous les secteurs d'application, autrement dit dans presque tous les secteurs de l'économie et de la vie courante !



Marchés Technologies	Médical et vivant	Environnement	Agri-Agro	Éclairage stationnaire	Transport et mobilité	Usine du futur
<i>Imageurs et vision</i>	Microscopie Endoscopie Diagnostics Réalité augmentée	Surveillance sols et végétation Bioluminescence Surveillance des mers/océans	Contrôle sanitaire Contrôle intrants Tri post-récolte	Détection et comptage de personnes	ADAS (imageurs CMOS et infrarouge)	Contrôle non destructif Contrôle dimensionnel Contrôle d'aspect Scan produits
<i>Lasers</i>	Chirurgie, PDT Endoscopie Imagerie photo-acoustique Ophtalmologie Systèmes d'analyses (cytomètres, séquenceurs, ...)	Lidars (vent, atmosphère, sol ...) Détection/mesure de pollution Détection/mesure de gaz	Phénotypage	Détection et comptage de personnes	Voiture autonome (LIDAR)	Contrôle dimensionnel Logistique (scan) Traitement (soudage, découpe...)
<i>Optique et opto-mécanique</i>	Instruments Dispositifs médicaux Réalité augmentée	Instrumentation d'analyse (gaz, liquides, solides)	Capteurs embarqués	Optique pour l'éclairage Optique "Freeform"	Phares Matrices LEDs, LIDAR MEMS Optique pour l'éclairage	Contrôle industriel pièces optiques (assemblage et alignement)
<i>Nanophotonique et intégration</i>	Biocapteurs OCT	Détection de pathogènes Monitoring Contamination	Microspectromètre	Combinaison capteur/éclairage	Capteurs multifonctions bas coût	

3.4 SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS MARCHÉS ET TECHNOLOGIQUES

3.4.1 Poursuivre l'analyse des marchés d'applications

Pour chaque marché, nous recommandons de poursuivre l'action entreprise dans le cadre de notre feuille de route et donc de :

- ▶ Compléter l'inventaire et mobiliser les acteurs industriels académiques et institutionnels photoniques concernés et impliqués
- ▶ Effectuer une étude détaillée périodique des besoins technologiques du secteur visé
- ▶ Identifier et nouer des relations à long terme avec les "points d'entrée" ou lieux d'échanges (intégrateurs, centres techniques, clusters et pôles, associations professionnelles, ...) :
 - Où les acteurs du secteur visé expriment leurs besoins au niveau fonctionnel et technique
 - Où les photoniciens peuvent apprendre :
 - Les spécificités du secteur : vocabulaire technique / enjeux économiques et sociaux / capacité d'investissement de la filière, etc...
 - Les spécificités de chaque application visée : besoins fonctionnels et techniques / environnement de fonctionnement des dispositifs / normes / pratiques de production / niveau de formation des utilisateurs / coûts acceptables, etc...
 - Où les photoniciens peuvent faire connaître et promouvoir leurs solutions
 - Où les photoniciens et les acteurs du secteur peuvent ensemble mettre en place des expérimentations de prototypes, des transferts de technologies, des campagnes de tests et des actions de maturation produits
 - Où les photoniciens et/ou les acteurs du secteur peuvent ensemble mettre en place les circuits de distribution commerciale adaptés.

3.4.2 Soutenir et développer nos technologies photoniques d'excellence

Nous présentons ici les recommandations prioritaires exprimées par les groupes de travail. Des recommandations plus détaillées sont disponibles dans la feuille de route détaillée.

Imageurs et vision

- ▶ **Capteurs** : Maintenir l'accès à des moyens de prototypage ou de fabrication petite ou moyenne série mutualisée
- ▶ **Composants spécifiques** : Constituer un réseau d'excellence autour de plateformes communes pour prototyper des imageurs avec des fonctions intégrées
- ▶ **Architectures, Intégration et Traitements** : Constitution d'un groupe de travail et de réflexion permettant de définir ce qui est mutualisable de ce qui est plus sensible et spécifique aux acteurs

Lasers

- ▶ **Fibre spéciale de nouvelle génération** : tirer parti d'une R&D de niveau mondial mais à faible impact commercial pour faire émerger un industriel leader en fibre spéciale de nouvelle génération
- ▶ **Lasers pour médical** : lancer un programme de développement et de compétitivité industrielle pour placer les industriels français au premier plan de ce secteur

- ▶ **Lasers de très forte puissance crête** : devenir leader mondial de sous-systèmes lasers de très forte puissance crête pour applications industrielles en capitalisant sur une compétence de niveau mondial sur les grands lasers scientifiques

Optique et opto-mécanique

- ▶ **Optique freeform** : Soutenir l'initiative en cours à l'IOGS pour faire émerger un centre français de compétences freeform, intégrant les 3 volets conception/modélisation, fabrication, métrologie
- ▶ **Machines de production de haute précision pour l'intégration de fonctions optiques et électroniques** : mise en place d'une plateforme en réseau pour l'industrialisation de la photonique (projet de filière PHOTOMATIQ) pour le développement de machines de packaging, d'intégration optique et d'alignement opto-mécanique

Nanophotonique et intégration

- ▶ **Intégration de matériaux « non-CMOS » sur silicium** : création d'une ligne pilote pour développer les solutions d'intégration sur Silicium en 200/300mm à grande échelle
- ▶ **Intégration de fonctions optiques et électroniques, packaging** : mise en place d'un groupe de travail pour l'industrialisation des nano-composants avec en particulier le développement de machines de packaging et d'intégration (voir opto-mécanique), ...

Photonique quantique

- ▶ **Participer aux actions européennes** : Participer activement à l'action de coordination sur les technologies quantiques lancée par la Commission européenne
- ▶ **Étude de marché** : Conduire une étude de marché spécifique à la photonique quantique
- ▶ **Actions marketing** : Mise en relation des acteurs de la technologie photonique quantique avec les industries applicatives
- ▶ **Création d'un fonds** : Création d'un fond spécifique photonique quantique

4 CONCLUSION

La filière photonique se fédère aujourd'hui sous le nom de Photonics France pour accroître sa visibilité.

L'enjeu est de faire prendre conscience à tous, industriels, étudiants, pouvoirs publics, du potentiel considérable d'innovation, de création d'entreprises et d'emplois, porté par cette technologie qui peut s'appuyer en France sur une recherche au tout meilleur niveau mondial. Cette action s'inscrit au sein d'une Europe qui a déjà reconnu ce potentiel et le soutient.

Photonics France développe son action selon deux axes majeurs :

- ▶ **« Travailler ensemble »**, pour expliciter le potentiel du secteur en termes de croissance, en prospectant ensemble les marchés d'application, pour recruter de nouveaux étudiants en proposant des formations et attirer les talents, pour accélérer le transfert de technologie en augmentant le couplage des plateformes de la photonique avec celles des industries applicatives
- ▶ **« Faire vivre une feuille de route partagée »** qui concrétise le **« travailler ensemble »**. Elle repose sur le croisement des marchés applicatifs avec la technologie photonique afin de déterminer les marchés où la photonique française peut être un discriminant majeur, et de proposer des actions technologiques prioritaires. Une première version de cette feuille de route élaborée avec les représentants des marchés applicatifs est disponible

Le cadre, Photonics France, et la méthode, Feuille de route partagée, sont définis et déjà mis en application. Une dynamique est enclenchée qui permettra à l'industrie photonique française de tirer parti de tous ses atouts.

5 ANNEXE 1 : RAPPROCHER L'INDUSTRIE PHOTONIQUE DE SES MARCHÉS D'APPLICATION

Environnement

Les préoccupations liées aux enjeux environnementaux vont croissantes depuis 20 ans. **Contrairement à d'autres grandes avancées historiques de la science (vaccination, électricité, ...), les problématiques environnementales se révèlent beaucoup plus complexes à aborder car elles se heurtent aux limites de la science qui peine encore à traiter des phénomènes massivement multidisciplinaires, diffus dans l'espace et dans le temps, et où chaque paramètre interagit avec tous les autres.** Le réchauffement climatique ou la raréfaction des abeilles sont des illustrations emblématiques de cette limitation.

La photonique est justement la science de la mesure complexe. C'est elle qui fournit la majorité des technologies qui permettront de clarifier progressivement les débats sur les enjeux environnementaux, tant au niveau des diagnostics et de leur interprétation que du suivi de l'efficacité des solutions mises en œuvre.

Principales thématiques : Mesure avancée des produits complexes - Mesure sans contact - Analyses de grandes surfaces - Analyses chimiques et biologique (métaux, Reach, Perturbateurs endocriniens, pesticides, drogues médicaments, etc.) - Détection poussières et particules - Mesures physiques (profils de vents, CND...) - Caractérisation et tri - Traitement des contaminations sans chimie.

Technologies clés : Imagerie - Lasers - Optique et micro-optique - Analyse spectrale - Biocapteurs - Sources UV (LED), RX, Gamma - Instruments avancés.

Agriculture et industrie agro-alimentaire

L'enjeu pour l'agriculture et l'élevage modernes est d'augmenter la production de nourriture de 70% d'ici 30 ans, pour faire face à l'accroissement de la population mondiale tout en réduisant l'impact sur les écosystèmes et en répondant aux exigences de transparence dans le domaine de la sécurité alimentaire.

En aval de la filière, les agro-industries avec plus de 18 % du chiffre d'affaire industriel en 2014, 16 % de sa valeur ajoutée et près de 500 000 emplois, comptent et pèsent fortement dans l'activité économique du territoire français. Cette industrie transforme 70 % de l'agriculture française et fait vivre de nombreuses exploitations.

Le secteur est confronté aux deux mêmes enjeux. Au niveau sociétal, le consommateur exprime de nouvelles exigences de traçabilité et de sécurité. Au niveau économique, la répartition des revenus sur la chaîne de valeur depuis l'exploitation jusqu'au consommateur fait l'objet de tensions, attisées par des guerres de prix sur les marchés internationaux.

La photonique fournit déjà des outils pour accroître la compétitivité de la filière à tous les niveaux : capteurs de proximité, dans le champ, sur les lignes de productions, dispositifs d'imagerie pour satellites ou pour drones, méthodes de traitement et d'inertage par UV ou rayon X, etc...

Mais chaque production agricole est spécifique, on peut mesurer le taux de sucre dans une pomme mais le taux idéal n'est pas le même pour chaque variété. La diffusion massive de la photonique dans la filière Agro-Agri passe par la mise au point de méthodes rapides et peu chères d'adaptation des dispositifs aux spécificités de chaque niche de production.

Principales thématiques : Mesure de qualité, détection de maladies, analyse des sols, traitement et inertage.

Technologies clés : Sources UV et RX de puissance, spectroscopie, imagerie.

Médical et vivant

Les systèmes de santé modernes sont confrontés à un double défi : le vieillissement des populations (cancers, dégénérescences et démences liées à l'âge) et l'évolution de notre style de vie (diabète, maladies cardiovasculaires, pandémies). **La photonique permet une meilleure prévention, une plus grande précision d'analyse et d'intervention et des analyses en temps réel et personnalisées. Ces innovations amélioreront l'état de santé des populations tout en réduisant ou maîtrisant les coûts.**

Le premier enjeu majeur est la détection rapide et précise des pathologies : détection de bactéries sans culture, détection de cellules cancéreuses uniques, détection de plaques amyloïdes dans le cerveau (Alzheimer), détection et identification de gènes pathologiques...

Le second enjeu est celui du test plus proche du patient, pendant une visite chez le médecin, à domicile et pour faciliter la médecine à distance.

Principales thématiques : Analyse médicale - Imagerie et diagnostic - Ophtalmologie.

Technologies clés : Lasers - optique et micro-optique - analyse spectrale - biocapteurs

Usine du futur

La mondialisation et la pression compétitive imposent aux industriels de produire mieux, plus vite, moins cher, avec moins de matières et de pertes, d'adopter des approches plus agiles et intelligentes, de personnaliser les produits, même en grande série, et de produire les petites et moyennes séries à bas coûts. L'enjeu : accroître la fiabilité des processus de production, améliorer les contrôles sur la chaîne de production, réduire le "time-to-market", faciliter les processus de certification et de qualification.

Mais la responsabilité sociale et environnementale est aussi un enjeu fort. Elle suppose de préserver les ressources, de dépenser moins d'énergie et de respecter les personnes, salariés comme consommateurs, de réduire la pénibilité. La photonique fournit des solutions à tous les niveaux de l'activité industrielle :

- Capteurs et imagerie pour la traçabilité et contrôle qualité, caractérisation des matières premières, des productions et des déchets
- Lasers et sources pour le travail et le façonnage des matériaux, la fabrication additive, stérilisation et inertage sans chimie et la fonctionnalisation des surfaces
- Capteurs et positionneurs pour l'aide à l'assemblage, la robotisation, l'assistance à la production
- Éclairages avancés, éclairages sans chaleur ou pour chauffer
- Aide à la conception, aide à la maintenance, réalité virtuelle.

La photonique française a des atouts à faire valoir sur des marchés émergents, sans être leader sur les marchés industriels comme la photonique allemande ou américaine. Elle manque d'intégrateurs photoniques majeurs. Elle a su proposer des lasers pour créer des acteurs significatifs dans la fabrication additive. Elle dispose aussi d'un savoir-faire en imagerie "non-conventionnelle" issue de la défense et du spatial.

Afin de mieux s'implanter sur les marchés industriels, la photonique française doit faire l'effort de se rapprocher des nombreux groupes français leaders dans les marchés d'application (Renault, PSA, Saint-Gobain Alstom, Schneider, ...) pour mieux comprendre leurs besoins et les inciter à tester de nouvelles solutions. Aujourd'hui, l'extrême personnalisation des productions est une demande émergente forte. Cette tendance rebat les cartes et réduit l'avantage compétitif des bas coûts de la main-d'œuvre. La photonique est particulièrement concernée par cette évolution, en tant qu'industrie mais aussi en tant que fournisseur.

Principales thématiques : traçabilité et contrôle qualité, fabrication additive, contrôle non-destructif, petites et moyennes séries, assemblage de précision, robotique.

Technologies clés : lasers pour la production et le contrôle, sources toutes longueurs d'ondes, technologies de mise en forme et de transport de lumière, imagerie, spectroscopie, technologies de contrôle non destructif, capteurs à base photonique.

Éclairage stationnaire

Apparues dans l'éclairage il y a une dizaine d'années, les LEDs ont rapidement remplacé les technologies existantes notamment grâce à leur efficacité énergétique. Mais les premiers produits ont été conçus comme remplacement des ampoules classiques afin de maintenir la compatibilité avec les systèmes d'éclairage existants. Ils sont aujourd'hui quasiment tous fabriqués en Asie avec un niveau de qualité extrêmement variable et des indications de performances allant de sérieuses à fantaisistes.

Or, avec les LEDs, c'est tout le concept d'éclairage que l'on peut repenser. Couplées à des capteurs, de l'électronique, de moyens de communication et de logiciels, on obtient des éclairages intelligents, capables d'améliorer la santé et le confort des usagers tout en réduisant l'empreinte énergétique de l'éclairage.

Miniatures et intégrables dans les matériaux, les LEDs créent un nouvel espace de liberté et de créativité pour les designers.

Si la France n'est pas à la pointe sur les LEDs proprement dites, elle dispose en revanche d'un tissu industriel de premier plan (Legrand, Schneider, Saint-Gobain, Efflux, Lucibel, industrie du design...) pour intégrer les LEDs à tous les types de marchés : l'industrie, bâtiment, tertiaire, particuliers.

Principales thématiques : L'éclairage au juste besoin - Contrôle des spectres - Capteurs environnementaux - Intégration - Smart Lighting - Durabilité et recyclabilité - LiFi..

Technologies clés : Spectre à façon (couleurs / IRC), spectres asservis - Capteurs intégrables dans le luminaire - Électronique et logiciels embarqués - Optique à façon

Transport et mobilité : aéronautique, ferroviaire, maritime, transports collectifs, automobile

Difficile d'envisager la mobilité comme une seule thématique tant elle est vaste et diversifiée. Nous avons pourtant choisi de rassembler tous ces marchés sous une même étiquette, motivés par le constat d'un changement de perception observable au niveau de la société : la fonction transport devient plus importante que le moyen de transport utilisé.

Ce nouveau paradigme est majeur et révolutionnaire même s'il faudra de nombreuses années pour qu'il soit intégré par tous. La principale conséquence de cette nouvelle perception est que l'on peut aujourd'hui optimiser les solutions de mobilité en fonction de chaque contexte : par exemple conserver le modèle basé sur la voiture individuelle en milieu rural et amplifier le transport collectif ou partagé en milieu urbain dense.

En matière de besoins technologiques liés à la photonique, tous les moyens de transports de notre liste partagent des points communs : éclairages avancés, bus de communications optiques, capteurs pour l'autonomie et la sécurité, éclairage et capteurs pour tableaux de bord et interface, assistance à la maintenance, systèmes de communication entre véhicules et avec les infrastructures (routes, ports, aéroports...). Mais ils affichent aussi des différences notables : volumes de production, coût des matériels, complexité des équipements, durée de vie, réglementations, contraintes et pratiques de sécurité...

L'industrie photonique peut tirer parti de ces différences. Les premières technologies de LIDARs (radars laser), capteurs essentiels pour la conduite autonome des véhicules, sont actuellement intégrées dans les camions alors qu'elles restent trop chères pour le véhicule particulier. Dans un deuxième temps, Les LIDARs seront progressivement optimisés pour une industrie de grand volume comme l'automobile. Enfin, une fois devenus simples et moins chers, ils pourront être réappropriés par l'industrie des camions.

Principales thématiques : éclairages intelligents et intégrés, capteurs pour l'assistance à la conduite et l'autonomie, capteurs pour la sécurité, nouvelles interfaces, communication optique, capteurs pour la surveillance intégrée des matériaux et des structures.

Technologies clés : Lasers, Capteurs photoniques intégrés, LEDs, LIDARs, Fibres optiques et capteurs à fibres.

6 ANNEXE 2 : IDENTIFIER LES TECHNOLOGIES PHOTONIQUES D'EXCELLENCE PRÉSENTES ET EN DEVENIR

Imageurs et vision

Ces dernières décennies, l'imagerie a connu un formidable essor en deux phases. Il y a d'abord eu la numérisation de l'image puis la miniaturisation et la baisse des coûts des caméras, impulsées par leur intégration dans les smartphones. Tous les secteurs en ont profité : le grand public, bien sûr, mais aussi l'industrie, l'automobile, etc...

En parallèle, les secteurs de la défense, de l'espace et de la recherche scientifique ont considérablement étendu les possibilités des caméras : détection de nouveaux domaines spectraux, depuis l'infrarouge lointain jusqu'aux rayons X, très haute résolution, fonctionnalisation des détecteurs (polarisation, microlentilles, mesure du temps de vol, ...).

Le secteur de l'imagerie est aujourd'hui à l'aube d'une troisième phase consistant à rendre accessibles ces nouvelles possibilités des caméras.

Le challenge est double : il s'agit d'abord de produire ces merveilles technologiques à bas coût, pour toutes les bandes spectrales, de l'IR jusqu'aux rayons X. C'est un défi de science productique. Il s'agit aussi d'inventer les architectures pour réduire les flux de données et les outils pour le traitement et l'analyse des milliards de pixels et d'images captées. Ce défi est en même temps hardware, au plus proche du détecteur, et software avec en particulier l'exploitation des nouveaux outils d'intelligence artificielle.

Principales thématiques : traitement d'images, multi et hyperspectral, industrialisation des détecteurs, miniaturisation des caméras, compréhension des besoins applicatifs.

Technologies clés : Analyse et traitement numérique, hybridation, fonctionnalisations des surfaces, microlentilles, nouveaux matériaux de détection, quantum dots.

Lasers

Depuis l'invention du laser il y a un peu plus de 50 ans, une très grande variété de sources laser est apparue, du laser télécom de quelques microns jusqu'au laser Petawatt, grand comme un immeuble. **Disposant d'une recherche reconnue au niveau mondial sur les lasers, la France a su créer des leaders sur des marchés de niche comme les lasers à impulsions courtes. Elle dispose aussi d'un riche tissu de PME actives dans les lasers mais aussi dans les composants qui les constituent. En revanche, elle n'a pas engendré les champions qui occupent les plus gros marchés d'application des lasers continus de forte puissance (CO₂, fibre, diodes...) à usage industriel.**

Cependant, la France maîtrise tous les éléments pour asseoir sa compétitivité sur des segments en forte croissance. Dans le domaine des lasers à fibres, beaucoup utilisés pour la médecine et les sciences de la vie, une meilleure valorisation de la recherche et une politique de soutien volontaire peuvent aider les entreprises à capter les marchés des fibres spéciales de nouvelle génération et à devenir fournisseurs de solution pour les secteurs d'application.

La France est aussi leader dans les lasers et systèmes de très forte puissance crête pour les applications scientifiques. **Un gros effort reste à faire pour tirer parti de ce savoir-faire unique. Ici, deux axes structurants : développer des usages industriels tirant parti de ces nouvelles infrastructures, asseoir les fournisseurs français de composants sur le marché grandissant des lasers de très forte puissance.**

Principales thématiques : applications des lasers à fibres, applications des lasers de très forte puissance, technologies d'assemblage, cristaux et composants optiques, métrologie et caractérisation.

Technologies clés : lasers à fibres, lasers de très forte puissance crête (Petawatt), composants optiques, façonnage de faisceau.

Optique et opto-mécanique³

L'industrie opto-mécanique rassemble des fabricants de composants (ex : micro-positionnement) et des fabricants de sous-ensembles optiques. Son industrie en France est dynamique. Elle est tirée par la micro-électronique, le médical, les télécoms, mais aussi les projets de grands lasers de puissance (Lasers Mégajoule, ELI, ...). **Elle est bien positionnée sur les faibles et moyens volumes à forte valeur ajoutée et son expertise est reconnue sur des segments comme les composants motorisés, le conditionnement optique (propreté, faible dégazage, UHV, ...), l'optique adaptative...**

En revanche, elle souffre du manque de fabricants français de machines-outils capables de développer l'automatisation/robotisation de la production. Il y a pourtant une vraie demande pour des machines de packaging optique, d'assemblage automatique de précision des composants hybride optique/électronique (par exemple : télécoms à bas coût) ou de fabrication additive d'optique de précision (par exemple en optique freeform).

Principales thématiques : automatisation et assemblage de précision, production adaptative, design et production freeform, design optique.

Technologies clés : freeform, positionnement et assemblage de précision, optique adaptative, métrologie et caractérisation de chemins optiques, couches minces.

Nanophotonique et intégration

La nanophotonique (développement de nouveaux composants semi-conducteurs complexes tels les cristaux photoniques, comportement de la lumière dans ces composants aux échelles inférieures à la longueur d'onde) reste encore, pour l'essentiel, du domaine universitaire. **La nanophotonique se développera industriellement si on sait intégrer ces composants pour les rendre utilisables au sein de systèmes plus complexes (capteurs, imageurs, ...).**

Les technologies d'intégration de composants photoniques sont dérivées de celles de la microélectronique sur différentes familles de substrats : silicium, InP, GaAs, GaN, GaSb, InSb, CdZnTe, LiNbO₃, verre, matériaux hétérogènes. Les composants obtenus vont du composant élémentaire (exemple : Laser, LED, Modulateur, bolomètre) au circuit complexe (exemple : Transceiver, Microdisplay, Imageurs, capteur intelligent).

Dans un environnement extrêmement compétitif au niveau mondial, la France dispose d'une recherche de haut niveau et d'industriels leaders dans leur domaine même si l'écosystème industriel a souffert de la crise des télécoms des années 2000, et même si certaines étapes de la chaîne de valeur comme le packaging sont trustées par l'Asie.

La photonique intégrée est composée de marchés de gros volumes et faible marge, comme les transceivers pour centres de données. Mais elle comprend aussi de nombreuses niches de moyennes séries pour lesquelles l'Europe et la France ont de réels atouts sous réserve que l'on investisse pour baisser les coûts de l'intégration, de l'assemblage et du packaging. L'autre piste de progrès réside dans l'intégration de composants hétérogènes, mêlant CMOS/silicium avec d'autres matériaux de type III-V ou II-VI. **C'est donc tout un nouveau savoir-faire productique qui reste à améliorer, voire à inventer, puis à déployer à l'aide de lignes pilotes adaptées.**

Principales thématiques : photonique sur silicium, intégration hétérogène, nouveaux modes de caractérisation, productique des moyennes et petites séries.

Technologies clés : Automatisation, assemblage de précision, instruments pour la caractérisation de Wafer et de composants.

³ Nous avons choisi de garder ici les termes historiques "optique" et "opto-mécanique". Les entreprises du secteur l'utilisent encore largement et aucun terme n'émerge à ce jour pour les remplacer dans ce contexte.

Photonique quantique

L'optique/photonique quantique désigne l'ensemble des sciences et technologies mettant à profit l'utilisation de la nature quantique de la lumière (ou d'autres particules) et de ses interactions avec la matière. **C'est un domaine de recherche en plein essor.** L'Union Européenne a pris conscience de son importance et a publié un document appelé « Quantum Manifesto » qui a servi de point de départ au lancement d'un programme Flagship de recherche sur les technologies quantiques. Par ailleurs, le Royaume-Uni, le Danemark, la Suède, les Pays-Bas, l'Allemagne, le Canada, la Chine et les Etats-Unis ont lancé leurs propres programmes nationaux.

En France nous disposons d'un très fort tissu de laboratoires publics au meilleur niveau mondial (deux prix Nobel) et de plusieurs start-ups proposant des produits basés sur la photonique quantique. Des grands groupes mènent également leur propre activité de recherche dans ce domaine et explorent des applications de communications quantiques et de senseurs quantiques.

Ce secteur est encore au stade exploratoire et un travail prospectif sur ses marchés futurs serait utile pour orienter les recherches, esquisser les besoins des marchés d'applications et inciter les acteurs français à participer activement au Flagship européen.

Cette thématique de fond interroge aussi sur l'utilité de créer un fond spécifique pour la maturation des technologies photoniques quantiques.

7 ANNEXE 3 - MARCHÉS D'APPLICATION : ENVIRONNEMENT

7.1 ENJEUX SOCIÉTAUX, ATTENTES

Les préoccupations liées aux enjeux environnementaux vont croissantes depuis 20 ans. Cette sensibilisation a été provoquée par des catastrophes locales médiatisées mondialement (pollution chimique à Bhopal, marée noire de l'Amoco Cadiz, smog à New Dehli ou Pékin...). Elle a été aussi induite par des prises de conscience de risques globaux comme le trou de la couche d'ozone ou le réchauffement climatique. Les pouvoirs publics, à tous les niveaux territoriaux, sont actifs et entreprennent des actions dans leurs domaines de compétence. De nombreux citoyens sont aussi acteurs à travers leurs choix de mode de vie, leur vote et les associations. Et nombre d'entreprises, soit poussées par la réglementation, soit de leur propre initiative, contribuent à apporter des réponses aux inquiétudes et attentes de la population.

Des problématiques complexes qui posent d'immenses défis à la science. Contrairement à d'autres grandes avancées historiques de la science (vaccination, électricité...), les problématiques environnementales se révèlent beaucoup plus complexes à aborder car elles se heurtent aux limites de la science, qui peine encore à traiter des phénomènes massivement multidisciplinaires, diffus dans l'espace et dans le temps, et où chaque paramètre interagit avec tous les autres.

Le réchauffement climatique ou la raréfaction des abeilles sont des illustrations emblématiques de cette limitation. Malgré de très nombreux travaux, la communauté scientifique n'a pas encore réussi à emporter une adhésion unanime sur ses diagnostics, étant elle-même parfois contradictoire. Et les raisons invoquées par ses détracteurs sont moins scientifiques qu'idéologiques, voire religieuses, ou portées par des intérêts économiques. De plus, pour faire gagner leurs idées, beaucoup exploitent, de bonne foi ou non, les incertitudes et les nombreuses questions suscitées par la démarche scientifique, qui évolue aux limites de la connaissance sur ces sujets.

Mais même, une fois le diagnostic admis, les solutions aux enjeux environnementaux sont intrinsèquement complexes car elles touchent la société dans toutes ses facettes : scientifique, politique, économique, démographique, sociale, sanitaire, réglementaire et même spirituelle.

La photonique est justement la science de la mesure complexe. C'est elle qui fournit la majorité des technologies qui permettront de clarifier progressivement les débats sur les enjeux environnementaux, tant au niveau des diagnostics et de leur interprétation que du suivi de l'efficacité des solutions mises en œuvre.

7.2 MARCHÉ ET PÉRIMÈTRE

Voici la segmentation du secteur de l'Environnement, vu comme un marché d'application pour l'industrie photonique :

- ▶ **Energie – Économies, production et distribution.** Ce secteur comprend les économies d'énergie dans tous les domaines, habitat, activité économique, transport etc. Il concerne aussi la production, la conversion, le stockage et la distribution de toutes les formes d'énergie : hydrocarbures, électricité, hydraulique, chaleur et froid, géothermie, énergie chimique et électrochimique, solaire, cinétique...
- ▶ **Eau – Usages et préservation des ressources.** Tous les usages de l'eau, professionnelle, collective et individuelle, depuis la collecte jusqu'à sa restitution à la nature. Mais ce secteur comprend aussi la préservation des ressources à tous les niveaux du cycle de l'eau (de la mer à la mer) ainsi que la préservation des eaux souterraines, littorales et océaniques.

- ▶ **Déchets – bâtir l'économie circulaire.** Surveiller, mesurer et traiter toutes les formes de déchets -gaz, liquide, solides- et les transformer en ressources à chaque fois que c'est possible.
- ▶ **Air et bruit – Atmosphère, extérieur et intérieur.** Détecter, surveiller et traiter l'air des zones urbaines, des sites industriels, des bureaux et dans l'habitat. La photonique a aussi un rôle à jouer dans la mesure des pollutions acoustiques.
- ▶ **Lumière et éclairage – Réduire la pollution lumineuse partout où c'est possible.** Éclairer suffisamment, au bon endroit mais juste assez. Réduire la perturbation des cycles circadiens induits par l'éclairage artificiel.
- ▶ **Biosphère et paysages – réconcilier activité humaine et biosphère.** Détecter, surveiller et comprendre les effets de l'activité humaine sur la biosphère. Rendre possible l'agriculture raisonnée et l'utilisation minimale voire le remplacement des intrants. Étudier l'évolution des paysages et des couvertures végétales. Comprendre et explorer les biotopes océaniques. Préserver les ressources de pêche. Contribuer à la sauvegarde des espèces et de la biodiversité.
- ▶ **Sols et sous-sols – dépollution et préservation des ressources.** Mieux connaître les sols et les sous-sols. Améliorer l'exploitation des ressources et diminuer leur impact environnemental. Détecter, surveiller et comprendre les effets de l'activité humaine sur les sols et sous-sols.

Entre 2000 et 2013, les dépenses de protection de l'environnement et de gestion des ressources ont progressé respectivement de 4 % et 3,3 % en moyennes annuelles (source : SOES, comptes satellites de l'environnement 2016). Au cours de la même période, l'évolution annuelle moyenne du PIB se limitait à + 2,8 %, dont 1,6 % d'effet prix. En 2013, la dépense de protection de l'air croît de 8,3 %.

L'intégration des préoccupations environnementales par toutes les composantes de la société a favorisé cette croissance rapide des dépenses environnementales. Mais la hausse résulte principalement de l'impulsion des pouvoirs publics, par l'introduction de politiques incitatives et nombreuses réglementations impulsées par les grands accords internationaux (ex. : Accords de Paris) et la politique environnementale de l'Union Européenne.

7.3 ATOUTS TECHNOLOGIQUES DE LA PHOTONIQUE, FOURNISSEUR TECHNOLOGIQUE MAJEUR DE LA MESURE ENVIRONNEMENTALE ET DU TRAITEMENT DES CONTAMINATIONS

La photonique est particulièrement adaptée aux besoins de la mesure environnementale. Elle fournit des détecteurs ultrasensibles, portables et sans contact, de moins en moins énergivores, adéquats pour la mesure "sur champ". Elle seule développe des technologies de mesure et d'analyse de grandes et très grandes surfaces. Elle permet de voir l'invisible : les gaz et les turbulences de l'atmosphère, mais aussi les particules, les bactéries, les virus. Les technologies photoniques détectent et dosent les composés chimiques en très petite concentration, dans les milieux très complexes que sont les sols, l'eau ou l'atmosphère. Elles identifient les matériaux et facilitent le tri des déchets.

La photonique propose des solutions de traitement de pollution et d'inertage sans chimie. Elle est enfin un atout précieux de la surveillance et du démantèlement nucléaire.

7.4 SOUS-MARCHES PRIORITAIRES

En France, la dépense de protection de l'environnement atteint 47,2 Md€ en 2013 (Source : SOeS, Compte satellite de l'environnement, 2015). Elle se décompose comme suit :

- ▶ protection de l'air ambiant et du climat : 3,3 Md€ ;
- ▶ gestion des eaux usées : 12,6 Md€ dont 11 Md€ pour les services d'assainissement collectif ;

- ▶ gestion des déchets : 16,7 Md€ dont 10 Md€ pour les services de gestion des déchets ménagers et assimilés ;
- ▶ protection et assainissement du sol, des eaux souterraines et des eaux de surface : 1,6 Md€ ;
- ▶ lutte contre le bruit et les vibrations : 2,2 Md€ ;
- ▶ protection de la biodiversité et des paysages : 2,1 Md€ ;
- ▶ gestion des déchets radioactifs : 0,6 Md€ ;
- ▶ recherche et développement (R&D) en environnement : 4,1 Md€ ;
- ▶ autres activités de protection de l'environnement (seules les dépenses d'administration générale des administrations publiques sont comptabilisées) : 3,9 Md€.

Forte de ses atouts, notamment dans les lasers et l'instrumentation, la photonique française, peut couvrir tous les segments d'application de l'environnement. Cependant elle est particulièrement adaptée aux trois plus importants d'entre eux à savoir la gestion des déchets, celle des eaux, de la protection de l'air et de la détection de gaz.

7.5 LIEUX D'ECHANGE

VEOLIA, SUEZ, SAUR, ENGIE, EDF... la France dispose de groupes majeurs intégrateurs ou utilisateurs de solutions pour l'environnement. Ils sont des interlocuteurs incontournables pour intégrer et tester des solutions photoniques. Elle dispose aussi d'entreprises intermédiaires significatives telles ENVIRONNEMENT SA ou PELLENC ST, qui basent leurs innovations sur des composants photoniques. Les centres techniques comme le BRGM, le CSTB, l'IFP Énergies nouvelles ou l'ADEME sont également des lieux d'expérimentation et d'échanges pour la démonstration des performances de la photonique au bénéfice de l'environnement.

8 ANNEXE 4 - MARCHÉS D'APPLICATION : AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE

8.1 ENJEUX SOCIÉTAUX ET ATTENTES CITOYENNES

8.1.1 Agriculture et élevage

L'enjeu pour l'agriculture et l'élevage modernes est d'augmenter la production de nourriture de 70% d'ici 30 ans pour faire face à l'accroissement de la population mondiale tout en réduisant l'impact sur les écosystèmes et en répondant aux exigences de transparence dans le domaine de la sécurité alimentaire.

Cette augmentation se fera à surface quasi constante, les terres arables étant peu ou prou déjà cultivées et alors que les intrants pour augmenter les rendements (produits azotés) et limiter les pertes (phytosanitaires) semblent avoir atteint leurs limites en termes d'exposition pour les agriculteurs comme pour les consommateurs⁴.

Face à ces enjeux dans le domaine de la productivité et de la transparence, l'agriculteur/éleveur doit disposer aujourd'hui des outils diagnostiques adéquats pour décider - à partir d'une information spatialisée et temporelle - des actions à engager pour obtenir le niveau et la qualité de production souhaités. La filière céréales par exemple voit s'éroder sa compétitivité vis-à-vis de ses partenaires européens sur le double rapport rendement à l'hectare et teneur en protéine, une compétitivité qu'un monitoring plus régulier pourrait reconstituer.

En terme économique, les faibles marges du secteur et la pression sur le prix exercé par la distribution et le consommateur lui-même amènent également le producteur à optimiser ses marges pour écouler au meilleur prix une production dont la qualité est - par nature - variable. Les méthodes de tri post-récoltes ou post-abattage se développent sur ces logiques économiques en orientant la qualité de la production vers les filières de consommation et de valorisation les plus appropriées pour le producteur.

8.1.2 Industrie agro-alimentaire

En aval de la filière, les agro-industries avec plus de 18 % du chiffre d'affaires industriel en 2014, 16 % de sa valeur ajoutée et près de 500 000 emplois, comptent et pèsent fortement dans l'activité économique du territoire français. Cette industrie transforme 70 % de l'agriculture française et fait vivre de nombreuses exploitations. Elle est confrontée aux deux mêmes enjeux :

Au niveau sociétal, le consommateur exprime de nouvelles exigences de transparence dans le domaine de la sécurité alimentaire suite aux nombreux scandales alimentaires qui ont nourri l'actualité ces dernières années. La disponibilité pour le consommateur lui-même à court-terme de méthodes de mesures relativement fiables va également profondément modifier le rapport entre producteurs et consommateurs.

⁴ La France a d'ailleurs lancé un plan EcoPhyto dont l'objectif est d'accompagner les agriculteurs dans la réduction de leur dépendance aux produits phyto.

Au niveau **économique**, les tensions récentes à la fois au niveau des revenus agricoles et du pouvoir d'achat des consommateurs (impossible de vendre plus cher, impossible d'acheter moins cher), ouvrent un espace pour les outils de contrôle de la production pouvant réduire significativement et à un coût maîtrisé

- ▶ la consommation inutile de produits bruts via une transformation mal conduite, et/ou
- ▶ le risque de déclassement du produit lors de sa commercialisation lié à un niveau de saveur insuffisant en fin de transformation.

Notons enfin un dernier espace de développement pour la photonique lié au développement des circuits courts dans le domaine agricole. Les fermes urbaines sont emblématiques de nouveaux protocoles de production, au niveau de la ville, du quartier voire du foyer domestique. Ces environnements agricoles transplantés dans le monde urbain sont également demandeurs d'éclairages artificiels performants et de contrôle des paramètres de production.

8.2 MARCHÉ ET PERIMÈTRE

La photonique qui apporte une information sans contact, potentiellement à longue distance, en temps-réel, sensible, à la fois sur la structure physique, le métabolisme de la plante / la qualité de la viande et leurs compositions chimiques (lipides, protéines, sucres, eau, vitamines...), peut répondre à ces différents enjeux, aux champs et dans les lignes de transformation mais également dans les environnements artificiels de production agricole. Ce marché du capteur agronomique et du capteur on-line représente aujourd'hui 2 Milliards d'euros, principalement dans les outils de mesures des sucres, des protéines développés par les grands acteurs de l'industrie d'analyse : Bruker, Thermo-Fischer, FOSS, Zeiss, Chauvin-Arnoux.



La croissance attendue liée au développement de la robotique agricole et aux exigences de contrôles est attendue au-dessus de 15% dans les 10 prochaines années. L'écosystème français est très développé au niveau applicatif avec les centres techniques de l'INRA et de l'IRSTEA et l'école vétérinaire française. La France dispose aussi de champions mondiaux dans le domaine des services d'analyses (Eurofins, Biomérieux). Ces industriels ont antérieurement développé leur activité à partir de technologies biochimiques, de spectrométrie de masse. La miniaturisation, la fiabilisation des systèmes optiques en font aujourd'hui des méthodes réellement compétitives par rapport à ces méthodes historiques. Sur ces nouvelles instrumentations, de nombreuses PME françaises développent des compétences spécifiques dans le domaine analytique (UV, visible, infrarouge, hyperspectral) comme Pellenc, Force-A, Indatech, Spectralys, Resolution SpectraSystems...

Au niveau de l'imagerie, l'imagerie satellitaire (Airbus Defense and Space) a trouvé son modèle économique depuis quelques années (abonnements à Farmstar). Les acteurs de la robotique agricole (Parrot, Airinov...) et de l'imagerie aérienne (parmi lesquels, YellowScan, IRSTEA, SupAgro Montpellier) complètent aujourd'hui

le portefeuille disponible en résolution spatiale et temporelle avec un besoin d'adapter les imageurs aux différents modes d'acquisition⁵.

En parallèle à cette dimension analytique (capteur et imagerie), la photonique permet également de traiter les produits agricoles par rayonnement X ou par illumination UV à base de lampes et/ou de LEDs. Ces produits - développés par exemple à Claranor, Eurofeedback, Phoxene - participent au développement de l'industrie « sèche », sans solvants, ni effluents.

Marché	Fonctions	Technologies
Agriculture & agroéquipement	<ul style="list-style-type: none"> • Innovation variétale, adaptation des plantes aux usages (phénotypage), Protection des plantes, bio-contrôle • Systèmes et pilotage de grandes cultures, vigne, incluant Machinisme / robotique agricole • Télédétection et systèmes d'information spatialisée 	<ul style="list-style-type: none"> • Scan laser 3D, Imagerie Hyperspectrale active et passive, imagerie TéraHertz (hydratation), imagerie thermique (évapotranspiration), Spectroscopie NIR-MIR, Raman, SPR, Vision Haute résolution • Caméras visible, Spectroscopie NIR, UV portable, Caméras multi- et hyperspectrales, Éclairage UV, Capteurs • Imageries VIS-NIR-SWIR-MIR, Capteurs SWIR, Imagerie Satellitaire Haute Résolution spatiale et temporelle, Modèles agronomiques, météorologiques, Big Data
Élevage & Pisciculture	<ul style="list-style-type: none"> • Alimentation animale, nutrition, additifs • Élevage de précision • Diagnostic, médicament vétérinaire • Abattoirs 	<ul style="list-style-type: none"> • Spectroscopie (portable, on line) • Caméras conventionnelle (biomécaniques, Vision, Stéréovision) • Biocapteurs • Imagerie 3D, Spectroscopie, Éclairage UV
Agriculture en environnement artificiel	<ul style="list-style-type: none"> • Serres, Fermes verticales, Fermes urbaines • Serres domestiques 	<ul style="list-style-type: none"> • Éclairage à LED et ou fibres optiques, Capteurs à fibres, Spectroscopies diverses.
Industrie Agroalimentaire & distribution	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôle at-line et on-line • Microbiologie rapide (détection, identification, caractérisation de particules 100nm – 10µm) • Contrôle et présentation des produits sur le lieu de vente (fraicheur, maturité) 	<ul style="list-style-type: none"> • Spectroscopie infrarouge (SWIR et MWIR), Imagerie Hyperspectrale, Cytométrie, Photonique intégrée • Cytométrie, Plasmonique, Spectroscopies (Raman, SPR), Imagerie non conventionnelle (Holographique, speckle,HS) Photonique intégrée • Éclairages à LED, Vision RGB, Imagerie hyperspectrale, SWIR et TéraHertz

⁵ On peut citer à titre d'exemple des capteurs embarqués sur des drones volant à 20 mètres d'altitude et intégrant des calculs de bande atmosphériques qui ne sont pas traversées. Cette puissance de calcul pourrait être utilisée ailleurs ou éliminée pour limiter la consommation globale du capteur.

8.3 LIEUX D'ÉCHANGE MARCHÉ/PHOTONIQUE

L'industrie photonique a développé de nombreuses méthodes d'analyse des couleurs, puis des spectres pour définir la maturité, la texture, la composition d'un produit agricole. Mais cette analyse des spectres ne suffit pas pour rendre le produit exploitable en l'état par la communauté cible. **Les informations liées aux métiers sont nécessaires pour développer et commercialiser une application et nécessitent un rapprochement avec les filières applicatives ;**

Les centres techniques liés aux filières apparaissent comme les meilleurs relais pour le développement de ces applications ; qu'il s'agisse de production en environnement naturel (**ARVALIS** céréales, Oléagineux **Terrinovia**), dans des environnements industriels de transformation (École de la meunerie française, **IFBM Nancy** (Boissons et malteries), **ITERG Bordeaux** sur les Corps gras) ou dans les filières d'élevage (ZooPole breton). Les autorités de contrôle comme l'ANSES – sans nécessairement rentrer dans le développement de technologies – peuvent utilement notifier les limitations des méthodes actuelles sur certains types de contaminants.

Sur la transformation et le contrôle on-line des produits agricoles, les différents centres techniques (ANIA, CTCPA, Centre de Valorisation des Glucides...) ont développé des environnements pilotes industriels par exemple dans le domaine du traitement thermique, de la décontamination, disponibles pour la validation et le benchmark de nouvelles méthodes.

Enfin, plusieurs entreprises privées développent déjà partir de modèles INRA ou en développement propre, des modèles agronomiques performants (**ITK, Fruition Science, TheGreenData, Greentropism...**) ou des modèles d'analyse chémométriques des données (**INRIA, Ondalys**). La multiplication et la fiabilisation de ces modèles est un enabler important pour transformer ces données de capteurs en préconisations robustes.

Photonics France doit initier et densifier ces collaborations à un niveau filière/filière en instaurant un dialogue au plus haut niveau entre les responsables des plans « protéines », « oléagineux », « vins et malterie », les centres techniques du domaine agricole, les industriels de la modélisation et du traitement de données et les industriels de la photonique. Le territoire national abrite également des leaders mondiaux dans le domaine de l'assurance et de la finance agricole (**Crédit Agricole**). Or on constate à l'étranger chez ces acteurs (les réassureurs en particulier **Swiss Re, Allianz Re**) un mouvement actuel vers des assurances au rendement et des assurances indicelles sur le climat. Ces organismes deviennent même promoteurs de méthodes modernes (RADAR, NVDI) pour avoir une bonne idée des rendements et indemniser en fonction d'un événement météo sur la base du rendement prévisionnel. Il y a à la fois de la **compétence technique** et des **moyens financiers** dans cet environnement qui trouverait in fine un intérêt financier à un monitoring plus précis des cultures et qui disposerait de la surface financière pour la mise au point de solutions complètes.

8.4 SOUS-MARCHES PRIORITAIRES

Parmi l'ensemble des applications mentionnées plus haut, les méthodes optiques vont principalement se concentrer sur 2 marchés :

- ⇒ Les nouvelles imageries **au champ ou dans les sites d'élevage** pour monitorer la croissance de la production animale et végétale en volume et en qualité et relancer la compétitivité des filières concernées.
- ⇒ Les méthodes de microbiologie optique pour la **sécurité alimentaire**. Il s'agit de s'assurer de l'absence de pathogènes, de corps étrangers, de contamination chimique, de tout problème sani-

taire dans la consommation ultérieure par les populations ou par les animaux. Ces mesures pourront être effectuées au niveau du site de production, de transformation, de stockage ou de distribution et contribueront à restaurer la confiance auprès des consommateurs.

Ces fonctions ont chacune leur régime de fonctionnement (détection ultra-sensible et ultraspécifique dans le domaine de la sécurité alimentaire, résolution spatiale et spectrale dans le domaine de l'imagerie, méthodes d'imagerie / sensing à courte, moyenne et longue distance etc...).

Pour le contrôle temps-réel des procédés pour les opérations de tri post-récolte et les opérations de cuisson, congélation, surgélation, déshydratation, meunerie, malterie, tout comme pour le contrôle qualité, les capteurs à réaliser et les environnements d'usage sont assez proches des capteurs on-line à développer dans le domaine industriel. La spectroscopie NIR par exemple est utilisée sans modification notable du domaine pharmaceutique au domaine agroalimentaire. On peut noter une variabilité supérieure liée au matériau agricole qui induit une complexité supplémentaire dans l'analyse des résultats mais qui peut être adressée dans le traitement du signal et la gestion de grandes bases de données.

8.5 RECOMMANDATIONS TECHNOLOGIQUES

C'est principalement dans le domaine des capteurs et imageurs que l'on peut espérer les meilleurs retours sur investissement, liés au développement de la robotique agricole, de la miniaturisation des produits, et des exigences renouvelées en termes de contrôle qualité et sanitaire. L'information disponible dans les différentes bandes - UV, visible, proche et moyen infrarouge voire TéraHertz - permet de disposer d'une information complète sur l'état de la plante, ses qualités organoleptiques, son processus de transformation, sa maturité, son état sanitaire.

Ceci dit, au niveau optique, l'environnement agricole ou d'élevage ne constitue pas l'environnement idéal avec des boues, de la terre qui peuvent aisément réduire ou obturer le chemin optique. Enfin, la variabilité spatiale et temporelle à la fois des conditions d'illuminations, de visibilité, de contraste et des productions oblige à élargir la gamme de fonctionnement des capteurs et imageurs.

Or la filière se construit aujourd'hui sur deux types d'acteurs économiques :

- ⇒ Des équipes académiques qui spin-offs des technologies avec une vraie intégration de l'expertise agronomique dans le **capteur mais au triple ou quadruple du prix objectivement possible.**
- ⇒ Des sociétés de service proposent au monde agricole l'intégration de capteurs optiques de base, **sans réellement prendre en compte la finalité agricole**, l'environnement de travail, la gamme de fonctionnement.

Il manque aujourd'hui un type d'opérateurs dans ce paysage Agro-Photonique : l'industriel disposant à la fois de compétences en photonique, en machinisme agricole et en TIC. L'environnement agricole est singulier, requiert des développements spécifiques en étant à la fois frugal en énergie, résilient, générant des contraintes et différentiels thermiques et mécaniques importants. Par rapport aux applications initiales de la photonique (défense, médical, astronomie, spatial), cet environnement agricole pose un problème **d'industrialisation à des coûts très contraints.**

Le besoin de la profession est aujourd'hui de disposer de modules intégrant le meilleur de ces deux mondes : à la fois des concepts photoniques originaux (utilisation de la fluorescence...) et les contraintes coût/consumation/robustesse. Ces modules complets pourraient alors être proposés aux différents acteurs du machinisme agricole (JohnDeere, CLAAS, Pellenc). Aujourd'hui, ces intégrateurs de capteurs restent trop peu nombreux en France.

Une piste serait de s'appuyer sur les entreprises de « **la ferme digitale** ». Ce groupement réunit plusieurs industriels comme **Weemat, SenCrop** qui ont déjà réalisé ce processus d'intégration / industrialisation dans le domaine des stations météo. La filière photonique est confronté au même problème de déploiement, à savoir proposer une information pertinente, connectée, à bas cout et pourrait utilement s'appuyer sur ce réseau pour développer sa propre courbe d'apprentissage.

Une deuxième piste serait de tirer profit des investissements et compétences développés par exemple pour la **filière automobile** dans le domaine de la vision (**ST Micro**) et plus récemment des LIDARs et télé-mètres optiques (**Quantel, YellowScan, SensUp**). Les produits issus de ces investissements pourraient trouver leur place au niveau agricole, qu'il s'agisse des capteurs eux-mêmes ou des logiciels pour la mise en œuvre optimisée de ces capteurs (**ChronoCam, Dibotics...**).

8.6 FONCTIONS TECHNOLOGIQUES PRIORITAIRES

	2018-2019	2020-2021	2022-2023
Objectifs	Bas- Coûts, Déploiement Professionnel	Haute Valeur, Haute capacité industrielle	Très bas coûts Déploiement Consommateurs
Hardware photonique imagerie	<i>Développement de méthodes d'imagerie dans le visible, de mesures d'indices et multi-spectrale 4 bandes (VIS-NIR) bas coût et robustes Développement de méthodes d'imagerie SWIR à bas coûts</i>	<i>Développement de méthodes d'imagerie non conventionnelle pour le phénotypage (Imagerie 3D structurelle et fonctionnelle, THz). Développement de méthodes d'imagerie à base de photonique intégrée compactes et bas cout (Spectroscopie VIS, Hyperspectral)</i>	<i>Développement de produits microspectro pour marchés de masse (consommateur, distributeurs, exploitants fermes urbaines)</i>
Enabler Imagerie	<i>Développement des modèles agronomiques (sols, plantes, météo) pour exploiter au mieux l'information des capteurs</i>	<i>Politique de Standardisation des jeux de données, des formats de données</i>	<i>Co-Formation des ingénieurs agronomes et opticiens au cahiers des charges produits agricoles</i>
Hardware Photonique Capteur MicroBio	<i>0.1ng/mL sensitivity @ line (10 à 20 minutes de détection)</i>	<i>10pg/mL en moins de 5 minutes (SPR intégrée, Interférométrie on-chip, Cytometry on-chip, holographic imaging)</i>	<i>Microspectro pour contrôle qualité et valeur nutritionnelle</i>
Enabler Capteurs Micro-Bio	<i>Machine Learning et IA, protocoles de calibration de la mesure</i>	<i>Microfluidique et modalités de préparation d'échantillons</i>	<i>Réutilisation du système, Calibration</i>

9 ANNEXE 5 - MARCHÉS D'APPLICATION : MEDICAL ET VIVANT

9.1 ENJEUX SOCIETAUX

Les systèmes de santé moderne sont confrontés à un double défi : le vieillissement des populations (cancers, dégénérescences et démences liées à l'âge) et l'évolution de notre style de vie (diabète, maladies cardio-vasculaires, pandémies). La photonique devrait permettre une meilleure prévention, une plus grande précision d'analyse et d'intervention et des analyses en temps réel et personnalisées. Ces innovations amélioreront l'état de santé des populations tout en réduisant ou maîtrisant les coûts.

9.2 MARCHE ET PERIMETRE

Le médical et vivant est un marché où la photonique est présente depuis des décennies (correction visuelle, microscopie, radiographie X, analyse sanguine...). Ce marché se segmente entre la recherche, le diagnostic, la thérapie et les applications non médicales (la stérilisation UV par exemple). Le marché est en croissance soutenue du fait de l'amélioration des techniques médicales, du vieillissement des populations, l'accès plus large à la santé (pays en développement) et l'évolution du mode de vie (diabète, pandémies). La part photonique est aujourd'hui de 70 milliards d'euros en incluant les 20 milliards correspondant aux verres ophtalmiques. La photonique continue à croître sa part de marché, même si elle est souvent en concurrence avec d'autres technologies (biochimie par exemple). On peut tabler sur une croissance de plus de 10% par an sur la décennie à venir.

L'écosystème français est complet avec une bonne recherche, de nombreux composantiers (des PME) et des systémiers. Le leader des verres ophtalmiques est français Essilor). Sur l'analyse infectieuse et sanguine nous avons trois fleurons, Biomérieux, Horiba Médical et Stago. En radiologie nous avons une filiale de General Electric, mais clairement la France pèse peu sur l'imagerie X.

Les clients finaux sont les patients, mais les laboratoires en cosmétique et en pharmacologie (L'Oréal, Pierre Fabre...) et les grands laboratoires de recherche (Génopôle, Cancéropôles...) sont consommateurs et intéressés par les apports de la photonique. Par ailleurs de gros laboratoires d'analyse biologique se forment (Eurofins) et le marché Point-of Care pour une meilleure prise en charge du patient prend plus en plus de l'ampleur dans les cabinets médicaux, les unités de soins intensifs (rapprocher le laboratoire d'analyse du patient).

9.3 LIEUX D'ECHANGE

Les lieux d'échange entre la photonique et le marché sont nombreux et bien organisés (souvent en technique de mesure ou en type d'organe (l'œil par exemple)). Citons l'Association française de Cytométrie, l'Association française de microscopie et le GDR Mifobio (microscopie, biosenseurs), l'Institut de la Vision, l'IRT Bioaster (bactériologie), les Cancéropôles, le Génopôle, l'INSERM, le CEA (imagerie) et leurs nombreuses plateformes. Cependant les méthodes non optiques telles que les méthodes biochimiques ou biologiques dominent encore et les opticiens ne sont pas toujours nombreux dans les laboratoires applicatifs. Il manque également des laboratoires de tests qui comparent différentes méthodes.

9.4 SOUS-MARCHES PRIORITAIRES

La photonique peut répondre aux challenges de la santé à venir et réduire les coûts sociétaux associés. Le premier enjeu majeur est la **détection rapide et précise de pathologies** : détection de bactéries sans culture, détection de cellules cancéreuses uniques, détection de plaque amyloïde dans le cerveau (Alzhei-

mer), détection et identification de gènes pathologiques... Le gain en temps est souvent synonyme d'amélioration de l'efficacité des traitements et une réduction du coût pour le système de santé. L'identification précise de la zone affectée permet également de traiter plus efficacement et avec le moins d'effets secondaires et réduire les facteurs de risque de récurrence. Sur le traitement précis, la photonique peut également apporter une aide. La photonique doit finalement permettre de détecter de manière préventive et non invasive des facteurs de risques ou des signes d'apparitions de certaines maladies et une meilleure surveillance et suivi d'un traitement.

Le second enjeu est celui du test plus proche du patient, par des dispositifs de type « **point of care** ». Là encore, cela peut faire gagner du temps (au médecin par exemple qui fait le test pendant une visite), au patient (suivi de la glycémie...), responsabiliser le patient (meilleur suivi d'un traitement), atteindre des patients éloignés de la médecine. Ces bénéfices sont in fine synonymes d'une réduction du coût global pour le système de santé.

9.5 FONCTIONS TECHNOLOGIQUES PRIORITAIRES

La première fonction est celle de l'analyse biochimique (métabolites, ADN, protéines, acides aminés, virus, bactéries ou cellules cancéreuses). Toutes les méthodes de spectroscopie (Raman, de fluorescence ou d'absorption) sont utiles. Par ailleurs, l'excitation peut être dans l'UV, le visible, l'infrarouge ou même le THz. Cette spectroscopie peut s'appuyer sur des fluorochromes ou pas (label free). Les méthodes sans label sont préférées pour les analyses in vivo.

Ces méthodes d'analyse devront être très sensibles, capables de détecter une cellule ou une bactérie unique.

La seconde fonction prioritaire est celle de l'imagerie. Imagerie plein champ pour localiser les zones d'intérêt et microscopie. La super-résolution reste aujourd'hui plutôt confinée pour les activités de recherche. Une imagerie en profondeur est également nécessaire avec deux techniques complémentaires : l'endoscopie et la tomographie (optique ou X). La photo acoustique est également une technique d'imagerie permettant d'apporter des informations quantitatives et fonctionnelles. Ces techniques sont très utiles dans la détection de cancers et dans l'évaluation de leur degré de gravité (tumeurs bénignes ou malignes, classification TNM).

Roadmap imagerie/cancer		
2018-2019	2020-2021	2022-2023
Développement de méthodes d'imagerie hyperspectrale (Raman, fluorescence, réflectance) bas coût et robustes	Application aux différents tissus cancéreux et sains et comparaison avec les gold standard	Approbations médicales
Développement imagerie Photoacoustique du sein pour détection / classification des tumeurs	CE Médical, essais cliniques, comparaisons X et biopsies, KOL	Approbations autres pays, codification acte

En ophtalmologie, on notera le potentiel du traitement guidé par imagerie 3D, permettant, en combinant OCT, optique adaptative et pointage laser de précision, de traiter uniquement les couches de la rétine qui le nécessitent (rétinopathie liée au diabète par exemple) en épargnant les autres couches fonctionnelles.

La microscopie, potentiellement nécessaire pour la détection de cellules uniques, requiert cependant des réglages précis, pas toujours accessibles à des non experts. Des techniques comme l'imagerie sans lentille pourraient résoudre ce problème.

En ophtalmologie mais probablement aussi dans d'autres domaines thérapeutiques, la thérapie génique associée au laser devrait permettre, par la localisation précise de micro-dommages, d'activer les cellules injectées là où leur action est nécessaire.

Roadmap ophtalmologie	2018-2019	2020-2021	2022-2023
Ophtalmologie	Développement techniques d'imagerie/traitement 3D de la rétine avec OA + OCT	Applications aux rétinopathies diabétiques et autres maladies de la rétine	CE Médical, essais cliniques, KOL, lancement commercial
Ophtalmologie	Développement imagerie 2D plein champ de la rétine / eye tracking / couplage scanner laser	CE Médical, essais cliniques, KOL	Approbations médicales autres pays, lancement commercial

9.6 RECOMMANDATIONS TECHNOLOGIQUES

Les lasers jouent un rôle très important. Ils doivent être compacts, fiables, peu consommateurs en énergie et toujours moins chers. Ils doivent couvrir un grand domaine spectral (de l'UV profond à l'infrarouge moyen, voire le THz). Pour la métrologie un fonctionnement continu est souvent souhaitable, avec un spectre étroit pour la spectroscopie Raman. Mais pour des imageries à 2 photons, un fonctionnement pulsé est nécessaire. À noter les lasers à supercontinuum et le développement de techniques femtosecondes, encore au stade de la recherche.

La mise en forme innovante des faisceaux est nécessaire en cytométrie, microscopie de superrésolution (lentille à très forte ouverture numérique...), microscopie sans lentille, correction ophtalmique. L'optique adaptative sera utile dans les milieux non homogènes ou diffusants. En cas d'utilisation de LEDs à la place de lasers, des efforts supplémentaires sur la mise en forme de faisceau sont nécessaires.

L'analyse spectrale avec ses différents types de filtres et éléments dispersifs et détecteurs associés est également une source d'innovation : spectromètres compacts, rapides, résolutifs, robustes. De manière générale, l'amélioration des détecteurs (sensibilité, dynamique) et la réduction de leur coût permettra d'améliorer les fonctions technologiques.

Il faut également imaginer nombre de biocapteurs optiques compacts.

Pour finir, il ne faut pas oublier les bibliothèques de spectres et les logiciels d'analyse de spectre, d'image... Le séquençage ADN a été permis par un travail informatique colossal. Les microscopes en super résolution se confrontent aujourd'hui à des débits de données difficilement gérables. L'intelligence artificielle devrait faciliter l'analyse des données.

10 ANNEXE 6 - MARCHÉS D'APPLICATION : USINE DU FUTUR

10.1 ENJEUX SOCIETAUX

L'Usine du Futur constitue à elle seule un vrai projet pour la société de demain. Il faut aujourd'hui **produire de manière plus intelligente**, plus efficace, plus raisonnée et plus flexible. En parallèle, la photonique, qui regroupe plusieurs technologies utilisant la lumière telles que l'optique, l'éclairage, l'affichage, l'optoélectronique ou encore le laser, révolutionne le champ des possibles, en termes de conception, de fabrication ou de contrôle, en innovant dans la manière de produire d'une part, et en ouvrant la porte à de nouvelles opportunités, technologiques ou applicatives, d'autre part. En outre, la photonique s'inscrit parfaitement dans les évolutions dictées dans le cadre de l'Usine du Futur. Premièrement, il faut apprendre à mieux produire avec moins ressources et moins de matières premières, en mobilisant moins de stock et en réduisant les coûts de production. L'allègement des structures est ainsi une des clefs dans les transports de demain. Deuxièmement, le **développement durable** doit être au cœur de l'Usine du Futur, notamment en prenant en compte l'éco-conception, le recyclage et l'impact environnemental de nos outils de production. L'efficacité énergétique des produits et des procédés est aussi un des piliers du développement durable ; cela suppose des produits et des matériaux plus performants. Ainsi, les procédés de production permettant de mettre en œuvre des matériaux avancés ou de fonctionnaliser les surfaces sont à promouvoir. Troisièmement, il faut améliorer la **compétitivité** de notre production, notamment en réduisant le *time-to-market*, en facilitant les processus de qualification dans le médical ou dans l'aéronautique par exemple, ou encore en améliorant la flexibilité et la fiabilité de nos produits et moyens de production. La fiabilité des produits nécessite entre autres une parfaite traçabilité de la matière première, des produits et des informations associées depuis leur fabrication à leur recyclage. Améliorer la compétitivité nécessite aussi de tirer parti des nouvelles opportunités offertes par les technologies de digitalisation, de réalité virtuelle ou augmentée, de connectivité (internet des objets). Ainsi, les capteurs à base photonique ont un rôle majeur à jouer pour le suivi et l'optimisation des outils de production, notamment dans l'industrie chimique par exemple. Enfin, l'automatisation, la **personnalisation de produits de masse**, ou encore la capacité à monter en cadence ou à traiter de grandes pièces sont des composantes aussi à prendre en compte. Par ailleurs, la flexibilité, qui consistait à avoir la capacité de traiter plusieurs types de références de pièces connues avec un même outil de production ou de contrôle industriel, évolue dans le cadre de l'Usine du Futur vers la notion d'**agilité** qui consiste à avoir la capacité à s'adapter à des productions futures non définies à ce jour. Cette nouvelle notion suppose de concevoir des outils industriels modulaires et multifonctionnels.

Outre l'évolution des **normes et contraintes réglementaires** liées à la sécurité des biens et des personnes ou au développement durable et pour laquelle les technologies photoniques constituent une réelle opportunité de progrès, la filière photonique française affiche plusieurs faiblesses qu'il convient de corriger afin qu'elle s'inscrive pleinement dans la dynamique liée à l'Usine du Futur. Premièrement il y a une **carence d'intégrateurs spécialisés en photonique** par rapport au fabricant de sources, laser ou autres, ou de composants ; ce point est critique : l'accès aux grands donneurs et aux marchés applicatifs se fait souvent via leur intermédiaire d'une part, et ce sont également eux qui choisissent les composants de leur système ou machine de production d'autre part. Deuxièmement, la photonique regroupe un ensemble de **technologies transverses** (optique, éclairage, affichage, optoélectronique, laser...) peu valorisées auprès du grand public, du discours politique et portées par aucun grand donneur d'ordre industriel français comme cela peut être le cas chez nos voisins européens (TRUMPF, OSRAM, SCHOTT, LEICA, ZEISS... en Allemagne par exemple). Elle n'est donc pas naturellement au cœur des débats et des priorités nationales. Troisièmement, le **niveau de formation**, voire d'informations, sur les technologies photoniques est insuffisant en France dans les filières spécialisées ou généralistes. Il en résulte que la photonique n'est pas suffisamment ancrée dans la culture des ingénieurs français ; cela explique en partie le faible niveau d'adoption ou de pénétration des technologies dans l'industrie française par rapport au potentiel de ces technologies. Enfin, la **visibilité** et la **taille critique** des acteurs français se révèlent souvent insuffisantes pour attaquer les marchés à l'export. Il

convient donc de s'organiser sur le plan national pour « chasser en meute » et faire face au dynamisme de l'Allemagne, de l'Amérique du Nord, de la Chine et de certains pays émergents de l'Asie du Sud-est.

10.2 MARCHE ET PERIMETRE

Le périmètre de l'Usine du Futur s'étend bien au-delà des technologies de production conventionnelles. En effet, outre la photonique, il englobe un ensemble de technologies interdépendantes telles que le numérique, la vision, la réalité virtuelle ou augmentée, l'intelligence artificielle et l'auto-apprentissage, les capteurs sur les produits ou dans les processus de production, l'internet des objets et des environnements de production, le contrôle non destructif, la logistique, l'automatisation et la robotique, les procédés d'usinage avancés ou de fonctionnalisation des matériaux, ou encore les boucles de rétroaction en temps réel entre le procédé et le contrôle in-process. L'effervescence autour de l'Usine du Futur conduit à une modernisation des processus et des outils de production prenant en compte le développement durable.

En termes de marché, l'Usine du Futur est transverse dans le sens où elle s'adresse à tous les secteurs industriels tels l'industrie manufacturière, les transports, la chimie ou encore les dispositifs médicaux. Des sous-marchés prioritaires sont proposés au paragraphe 4. Pour chaque secteur industriel nous pouvons distinguer deux types d'applications pour les technologies photoniques : celles qui relèvent de la mise en œuvre et de la transformation de la matière d'une part, et celles qui sont plus en lien avec la mesure et le contrôle d'autre part.

Les technologies photoniques sont actuellement présentes dans toute la chaîne de conception, de fabrication et de contrôle d'un produit. Il est impératif à l'avenir de garantir un accès au marché à tous les niveaux de la chaîne de valeur, qu'il soit interne ou tournée vers l'export. Bien que les acteurs de la photonique française sont présents sur tout le long de la chaîne nous notons une carence d'intégrateurs (fournisseur de rang 1). Cette carence se répercute sur les fournisseurs de composants (fournisseurs de rang 2). Nous pouvons également souligner que la photonique française est essentiellement constitué d'un tissu de PME dont l'activité est majoritairement orientée vers l'export. Enfin, il est important de noter que la photonique française affiche une excellence dynamique de recherche, académique ou industrielle, et de création de start-up ou de nouveaux produits sur toute la chaîne de valeur.

10.3 LIEUX

Les lieux d'échanges, de formation, de production scientifiques et industrielles liés à la photonique sont essentiellement localisés autour des grands pôles de compétitivité ou *clusters* régionaux photoniques. Plusieurs associations professionnelles financées essentiellement sur fonds privés (CNOF, AFOP, CLP, AFRP, SFLM...) ont aussi une couverture nationale sur leur thématique respective. Les centres technologiques relevant de la photonique (ALPhANOV, IREPA LASER, INSTITUT MAUPERTUIS, INSTITUT DE SOUDURE, MANUTECH, FEMTO-ST...) ont aussi un rôle à jouer dans le développement des technologies photoniques, qu'elles soient génériques ou émergentes (donc à risque), dans le transfert de technologies vers l'industrie et dans la qualification des procédés. La capacité d'action et la portée de ces actions de l'ensemble de ces structures est malheureusement limitée actuellement par leur budget restreint. Il faudrait accroître les échanges avec les pôles de compétitivité ou associations orientés marché applicatif tels qu'Aerospace Valley pour l'aéronautique, le Pôle Véhicule du Futur etc.

10.4 SOUS-MARCHES PRIORITAIRES

Voici les marchés industriels identifiés comme prioritaires, sur lesquelles les technologies photoniques peuvent être source d'innovations, de différenciation et de croissance : le transport et la mobilité, l'énergie,

l'électronique grand public et la smart-électronique, la santé et les bio technologies, et enfin la chimie lourde ou fine.

10.5 FONCTIONS TECHNOLOGIQUES PRIORITAIRES

Pour répondre aux enjeux et aux besoins des marchés prioritaires nous avons identifiés plusieurs **fonctions technologiques prioritaires à 4 ans (2018-2022)**. Nous soulignons que le développement de ces fonctions technologiques n'a de sens que s'il s'accompagne du développement de la formation et de l'usage associés (connaissance, savoir-faire théorique et pratique).

Priorité 1 / Mise en œuvre des matériaux avancés : grâce aux avancées de la chimie et de la science des matériaux, l'industrie dispose aujourd'hui d'une vaste panoplie de matériaux métalliques, minéraux ou organiques, homogènes ou composites. La mise en œuvre et la mise en forme de ces matériaux constituent des axes prioritaires qu'il convient de soutenir, comme par exemple le drapage laser des matériaux composites pour l'aéronautique et le spatial, ou encore la fabrication et la texturation des films de nano fils d'argent ou de graphène en remplacement des films d'ITO en optoélectronique.

Priorité 1 / Fabrication additive : la fabrication additive constitue une pièce maîtresse des technologies de production de demain, il faut développer une chaîne de valeur complète autour des procédés de fabrication additive, notamment ceux à base de technologies photoniques. Parmi les problématiques sur lesquelles il faut concentrer les efforts nous pouvons citer le contrôle in-process pour la détection des défauts matière ou dimensionnels, la vitesse de dépôt matière, la capacité de réaliser des pièces de grandes dimensions, la gestion de la thermique pendant le processus de dépôt, la santé matière, on encore la finition de surface. La capacité de fabriquer une pièce à la demande à proximité de la demande nécessite également de travailler sur les bases de données et la sécurité des banques de données associées puisque celles-ci devront être accessibles à distance.

Priorité 1 / Traitement et fonctionnalisation des surfaces : les technologies photoniques permettent de modifier les propriétés de surface des matériaux de manière sélective (sélectivité spatiale et sélectivité chimique) afin d'accroître leurs performances ou d'en faciliter la mise en œuvre. Par exemple, la technologie laser confère la possibilité de fonctionnaliser la surface des matériaux en modifiant la morphologie ou la chimie de surface à des échelles méso, micro ou nanométriques. Les surfaces ainsi obtenues peuvent être hydrophobes ou hydrophiles, optiquement diffusantes ou anti-réfléchissantes, bactéricide ou non, propices aux frottements ou non. Il est aussi possible de nettoyer ou d'activer les surfaces avant mise en collage ou mise en peinture, ou encore d'appliquer un grenailage laser pour introduire des contraintes de compression et améliorer ainsi la résistance à la fatigue ou à la corrosion sur les alliages métalliques. Cet axe est également prioritaire. Un des facteurs limitants est aujourd'hui la viabilité technico-économique de ces procédés (rapport productivité/coût) et la capacité à traiter de grandes surfaces.

Priorité 1 / Contrôle non destructif : le contrôle de la matière première, des procédés et des produits, in-process ou post-process, constitue aussi un axe prioritaire. En effet, il faut détecter les éventuels défauts de fabrication au plus tôt dans le processus de production de manière à être en capacité de mener une action corrective ou à défaut d'exclure la pièce là où elle a le moins de valeur ajoutée. Les contrôles de productions en ligne sont préférables à ceux menés hors ligne. Cette fonction intègre également le besoin de collecter, d'analyser et de traiter des données en temps réel afin de permettre la prise de décision au plus tôt et au plus proche de la ligne de production. Ces technologies CND peuvent être photonique ou non.

Priorité 2 / Assemblage : de plus en plus la recherche de performances au moindre coût et au moindre poids requiert d'associer la bonne matière à la bonne géométrie et au bon endroit. Il faut pour cela développer des technologies d'assemblage performantes, adaptées aux fines et aux fortes épaisseurs, offrant une grande liberté de conception, permettant de diminuer les interfaces, et capables de lier des matériaux dissimilaires tels qu'un composite sur un alliage métallique par exemple.

Priorité 2 / Caractérisation des matières premières : le niveau d'exigence en termes de qualité, de fiabilité et de performances sur de nombreux produits industriels actuels se répercute sur la matière première (composition, impuretés, homogénéité, porosité, dispersion et granulométrie des poudres, état de surface...). Il faut mettre en place toutes les techniques de caractérisations adéquates.

Priorité 2 / Automatisation : l'automatisation permet d'améliorer la cadence, la qualité et la précision des processus de production ou de contrôle. Elle permet aussi d'assister ou de remplacer l'homme pour la réalisation de travaux à forte pénibilité ou en environnement hostile. Cette fonction intègre aussi les besoins en termes de robot, de cobot (robot collaboratif) ou de système mobile autonome (drone).

Priorité 2 / Connectivité : il faut développer la connectivité entre les objets, entre les outils de production, dans la chaîne de conception de fabrication et de contrôle mais aussi dans sur la durée de vie du produit. Le but est d'améliorer les processus de production et de maintenance opérationnelle.

Priorité 2 / Modélisation et simulation : L'expérience ne suffit pas aujourd'hui à comprendre et à acquérir la maîtrise des mécanismes physico-chimiques dans les processus de production ou de contrôle. Il faut être en mesure de modéliser, de simuler et de prédire ces mécanismes. Par ailleurs, la modélisation permet de diminuer les coûts et les temps de conception des produits. Cette fonction intègre également la réalité virtuelle ou augmentée, aussi bien pour les besoins de conception que pour la maintenance ou la formation des opérateurs.

10.6 RECOMMANDATIONS TECHNOLOGIQUES

Priorité 1 / Technologies laser : sources à solide, à fibre, ou à diodes, sources Mid-IR pour le médical ou les systèmes anti-armes, sources accordables ou larges spectres pour la spectroscopie. La montée en puissance permet d'accroître la productivité des procédés et d'ouvrir la porte à de nouvelles applications, notamment pour la mesure et l'imagerie.

Priorité 1 / Technologies de mise en forme & de transport de lumière : transport par fibre, passif ou actif, à maintien de polarisation, mise en forme spatio-temporelle par optique passive ou active, modulateur de phase, multi faisceaux, déflexion optique rapide large champ et reconfigurable en dynamique, couplage déflexion optique et axes motorisés, connecteur rapide, focalisation et délivrance de faisceaux intégrant des fonctions de vision ou de mesure ou de spectroscopie ou d'imagerie thermique avec des boucles de rétroaction, modulateur électro- ou acousto-optique à forte transmission et large champ, composant à faible dispersion, compatibilité de ces éléments avec les fortes puissances moyennes et les fortes intensités.

Priorité 1 / Technologies de contrôle non destructif : contrôle non destructif à base photonique ou sans contact ou à distance (LIDAR), imagerie multi spectrale, in-process ou à défaut post-process, traitement d'image, outils d'analyse des données et d'aide à la prise de décision associés.

Priorité 1 / Capteurs à base photonique de digitalisation et de mesure (température, pression, déformation, accélération, chimique...), optique intégrée, traitements du signal ou d'image associés.

Priorité 2 / Autres sources : sources EUV pour la micro lithographie, sources LED de forte puissance pour les procédés.

Priorité 2 / Electronique & optoélectronique pour la photonique : traitement du signal, synchronisation rapide, faible bruit, composants optoélectronique pour la vision, pour la mesure ou pour la modulation d'amplitude/de phase.

Priorité 2 / Réalité virtuelle ou augmentée pour la formation, la conception, la production, l'usage et la maintenance opérationnelle.

Priorité 2 / Auto-apprentissage & intelligence artificielle : capteurs, algorithmes, algorithmes génétiques, numérique, aide à la prise de décision

Priorité 2 / Robot, cobot & drone : autonomie, bas coût, fiabilité, précision de positionnement, interface homme-machine, couplage avec la réalité augmentée, travail en environnement hostile, travail collaboratif entre machines ou homme-machine, capteurs et systèmes photoniques embarqués.

Priorité 2 / Technologies de communication, internet des objets & LIFI : communication entre les produits, entre les outils de production et de contrôle et leur environnement, maintenance préventive et curative à distance, technologie LIFI pour faciliter la mobilité des équipements en environnement de production.

10.7 AUTRES RECOMMANDATIONS

Priorité 1 / Formation & Usage : Développer la formation (initiale et continue, dès le collège) ET l'usage (connaissances et savoir-faire) ;

Priorité 1 / Intégrateur : Favoriser l'émergence ou le développement de champions intégrateurs français spécialisé en systèmes et machines laser ;

Priorité 1 / Accès au marché : Favoriser un accès au marché à tous les niveaux de la chaîne de valeur, qu'il soit interne ou tournée vers l'export

Priorité 2 / Qualification et certification des procédés : Favoriser/simplifier les processus de qualification/certification pour le médical et l'aéronautique, et faciliter la constitution de groupe de travail sur le sujet

11 ANNEXE 7 - MARCHÉS D'APPLICATION : ÉCLAIRAGE STATIONNAIRE

L'éclairage a, sans conteste, été la première application de la photonique. Depuis la nuit des temps, l'Homme n'a cessé d'améliorer ses sources de lumières artificielles afin d'en améliorer l'efficacité et la fiabilité. Le développement technologique dans ce domaine, s'est accéléré depuis la fin du XIX^{ème} siècle avec l'arrivée de la lampe à incandescence, puis des lampes fluorescentes et enfin, très récemment, avec l'émergence des LEDs. Avec ces dernières, l'éclairage est entré à son tour dans l'ère du numérique, avec son corollaire : succession rapide des générations technologiques, développement de fonctionnalités enrichies, liaisons sans fil, communication, logiciel...

11.1 LE FUTUR DE L'ÉCLAIRAGE

On l'a dit, apparues dans l'éclairage il y a une dizaine d'années, les LEDs ont tôt fait de déplacer les technologies existantes, au départ grâce à leurs caractéristiques propres et, notamment, leur efficacité énergétique. Ce sont typiquement les lampes de remplacement actuelles, c'est-à-dire les lampes aux standards classiques : E27, GU5.3... Afin de maintenir la compatibilité avec l'existant, elles sont souvent dénuées des fonctionnalités nouvelles que permettraient les LEDs. Elles sont quasiment toutes fabriquées en Asie avec un niveau de qualité extrêmement variable et des indications de performances de sérieuses à fantaisistes !

Les LEDs, couplées à des capteurs, de l'électronique, de moyens de communications et de logiciel permettent cependant d'innover en termes d'éclairage. Si on repense l'éclairage en prenant en compte le potentiel de la technologie, les progrès de la connaissance sur le rôle de la lumière sur le vivant et les aspirations du public à un certain confort d'usage, alors on ouvre un potentiel d'innovation dans lequel l'industrie française de l'éclairage a de bonnes cartes à jouer.

Parmi les thèmes et l'évolution probable de l'éclairage, on retiendra les pistes suivantes :

1. **L'éclairage au juste besoin** : que ce soit dans un souci d'économie énergétique ou de confort visuel, l'éclairage au juste besoin correspond à une demande forte. Elle implique des développements optiques autour des LEDs, pour éviter l'éblouissement par exemple ou diriger la lumière où elle est requise en évitant la pollution lumineuse. Elle peut requérir l'intégration de capteurs de luminosité pour que le luminaire puisse s'adapter au besoin, ainsi que des capteurs de présence par exemple. On notera au passage, que les capteurs de présence actuellement sur le marché, sont des capteurs pyroélectriques, donc plus des capteurs de mouvement que de présence. Un capteur de présence « vrai », basé par exemple sur une technologie d'imageurs, permettrait d'améliorer ce contrôle de l'éclairage en localisant les zones occupées, donc à éclairer.
2. **Les spectres des luminaires adaptés, voire adaptables** : la connaissance des effets biologiques de la lumière s'est rapidement développée depuis la découverte chez l'homme, il y a une dizaine d'années, d'un nouveau photopigment : « la mélanopsine ». La mélanopsine est localisée dans des cellules ganglionnaires de la couche interne de la rétine et régule des fonctions non visuelles comme par exemple la synchronisation des rythmes biologiques par la lumière, le cycle veille-sommeil, la vigilance et la constriction pupillaire. Il s'agit d'une fonction totalement différente de la perception visuelle des images. Ces cellules sont plus particulièrement sensibles à la lumière bleue. En jouant donc sur le spectre des luminaires, on peut ainsi induire des effets sur l'homme, que ce soit dans un objectif médical (photothérapie et traitements des troubles du sommeil et de la dépression saisonnière par la lumière...), pour améliorer son confort (respect des cycles circadiens) ou faciliter l'apprentissage par exemple en adaptant le spectre au type d'activité. L'adaptation du spectre à l'usage est également importante en agriculture (fermes urbaines...) ou en élevage (bien-être animal, productivité...).
3. **Capteurs environnementaux** : la position « stratégique » des luminaires, notamment dans l'éclairage tertiaire ou industriel, permet de les utiliser comme plateformes, capables de fournir de

la lumière, mais également d'intégrer nombre de capteurs (présence, luminosité, CO, CO₂, incendie...) et d'utiliser l'infrastructure de communication ou d'alimentation des luminaires pour transmettre des alarmes par exemple.

4. **Intégration** : les dimensions extrêmement réduites des LEDs permettent des concepts d'éclairage complètement nouveaux (nouvelles formes, discrétion) et, c'est important, leur fonctionnement en très basse tension leur ouvre la porte à des secteurs industriels où l'éclairage était absent (intégration dans le mobilier, dans les structures de bâtiment...).
5. **Smart Lighting** : l'éclairage se dote de moyens de contrôle propres et, dans une certaine limite, autonomes. Les spectres s'adaptent au besoin. Les luminaires communiquent entre eux ou avec le bâtiment. La multiplication des sources de lumière fait naître le besoin d'interfaçage rationnel et les échanges inter-protocoles qui en découlent. On le voit, l'éclairage est d'ores-et-déjà entré dans l'ère du « Smart Lighting ». Les liens s'établiront avec l'intelligence artificielle au sein des bâtiments. Là encore, réside un fort potentiel d'innovation où nombre d'acteurs français sont en position de contribuer.
6. **Durabilité et recyclabilité** : le luminaire devient désormais un système électronique. Sa fiabilité va être limitée par le maillon faible du système, pas forcément celle de la source. Une approche sur l'estimation de la durée de vie par les techniques développées pour les systèmes électroniques serait à promouvoir. De même, une réflexion approfondie devrait être menée sur le recyclage des luminaires à LED en anticipation de l'arrivée massive des matériels dépassés ou hors services (à laquelle il faut s'attendre dans les années à venir).
7. **LiFi** : On l'a vu le système d'éclairage devient un réseau communicant. Jusqu'à présent les solutions développées sont multiples par le biais de liaisons radio (Zigbee, Bluetooth, WiFi) ou filaire (CPL, Ethernet). Mais le luminaire, encore une fois grâce à sa position « stratégique », peut être également la source d'émission d'informations par la modulation de son intensité à haute fréquence. Invisible à l'observateur, cette technologie qui superpose à la fonction éclairage, une fonction communication est appelée LiFi ou VLC (Visible Light Communication). Pour l'instant, elle se limite souvent à diffuser une information simple telle que l'identifiant (unique) du luminaire. Elle présente cependant la capacité d'offrir une nouvelle voie d'accès à Internet en complément ou à la place du WiFi.

11.2 MARCHÉ ET PÉRIMÈTRE

Le marché de l'éclairage est considérable en volume et éclaté en de nombreuses spécialités. Suivant les acteurs industriels en France, ils se positionnent sur un ou plusieurs de ses marchés. Il est habituel de distinguer les secteurs suivants :

- ▶ Éclairage extérieur : voiries, parcs, stades, parkings, tunnels, zones industrielles et portuaires...
- ▶ Éclairage des locaux tertiaires (bureaux...), des centres commerciaux ...
- ▶ Éclairage des bâtiments industriels & logistiques
- ▶ Éclairage des hôpitaux et centres de santé, écoles ...
- ▶ Éclairage résidentiel
- ▶ Éclairage scénique et artistique
- ▶ Décoration lumineuse, objets lumière et connectés
- ▶ Éclairage horticole, élevages, fermes urbaines...
- ▶ Lumière et santé (luminothérapie, rythmes circadiens...)
- ▶ Éclairage des transports : automobile, aéronautique, ferroviaire, naval...

► Affichage et signalisation lumineuse

Ils présentent tous leurs spécificités et leurs besoins ou les solutions mises en œuvre, tant au niveau des caractéristiques requises pour la fonction éclairage, que les services annexes associés, sont souvent propres à un secteur donné.

11.3 LIEUX D'ÉCHANGE

L'industrie de l'éclairage se retrouve en France au sein de différentes associations telles que :

- L'[Association Française de l'Eclairage](#) (AFE), société savante fondée en 1930 en raison du développement considérable de la science de l'éclairage et de son marché. Une collaboration entre les spécialistes de branches d'activités très diverses (dont des médecins, scientifiques...) s'est avérée nécessaire pour le bien des usagers.
C'est la mission principale de l'AFE : étudier et rendre accessible à tous les meilleures pratiques de l'éclairage afin de garantir le respect des besoins humains.
- Le [Syndicat de l'Eclairage](#) est un syndicat professionnel tel que défini et encadré par la loi du 21 mars 1884, dite loi Waldeck-Rousseau. Il rassemble 51 fabricants de lampes et de matériels d'éclairage pour l'intérieur et pour l'extérieur.
- Le [GIL – Syndicat du Luminaire](#) a été fondé en 1818. Il exerce tous les droits conférés aux syndicats professionnels et remplit à ce titre un certain nombre de missions au bénéfice de ses adhérents. Le syndicat a exclusivement pour objet l'étude et la défense des droits ainsi que des intérêts matériels et moraux, tant collectifs qu'individuels, de tous ses membres.
- Le [Cluster Lumière](#) est une association regroupant plus de 150 adhérents intervenant sur toute la chaîne de la valeur de l'éclairage. Les entreprises et organismes y interviennent pour développer ensemble des opportunités d'affaires et de croissance à travers des solutions d'éclairage innovantes. Par son action, le Cluster a conduit à la création de [PISEO](#), au départ plateforme nationale d'innovation dédiée à l'éclairage. Il est actuellement au cœur du projet [LUMEN, la Cité de la Lumière](#) et contribue à l'émergence d'un label - [Certiled](#) - certifiant les caractéristiques des produits d'éclairage à LEDs.
- Grands salons : en France Forum LED, OnlyLight, en Europe : Light&Building, ailleurs dans le monde.

11.4 FONCTIONS TECHNOLOGIQUES PRIORITAIRES

1. **Spectre à façon (couleurs / IRC), spectres asservis** : un fort gisement d'innovation existe autour du contrôle du spectre des sources que ce soit en statique (spectre fixé à la fabrication) ou en dynamique (spectre fixé à l'utilisation). La première approche demande le développement de luminophores ad hoc, adaptés aux spécifications à atteindre, ainsi que des travaux de R&D sur leur mise en œuvre afin d'optimiser l'efficacité de conversion, la durée de vie, la maîtrise du spectre d'émission et rechercher dans une certaine limite, une relative indépendance aux caractéristiques de la LED de pompe. Ces recherches contribueraient fortement au développement de sources de lumière pour des applications spécifiques telles qu'en agriculture / élevage par exemple. L'obtention de spectre adaptable par l'utilisateur ou tout système de contrôle peut être réalisé en utilisant des sources constituées de LEDs de différentes couleurs et en mélangeant leur lumière. Le développement de telles sources pose de sérieux problèmes d'optique de minimisation des ombres colorées, mais également du contrôle et de l'asservissement du spectre émis. De nombreuses applications seraient envisageables si des solutions élégantes et surtout, compétitives en prix, arrivaient sur le marché.
2. **Capteurs intégrables dans le luminaire** : on l'a vu, l'éclairage intelligent n'émergera vraiment que lorsque l'on pourra implanter dans les systèmes des capteurs aux performances requises, on citera par exemple des capteurs de présence à très faible coût basés sur des imageurs infrarouges ou visibles, des microspectrophotomètres pour analyser les caractéristiques du spectre des

sources, des capteurs offrant des possibilités autres (CO, CO₂, composés organiques, fumées, feux)... Le luminaire doit désormais être vu comme une plateforme capable d'intégrer de nombreux services, et pour ce faire, il embarquera nombre de capteurs dont la plupart basés sur une technologie photonique.

3. **Electronique et logiciels embarqués** : l'électronique intégrée aux luminaires à encore de nombreux progrès à faire pour en simplifier la conception, la fabrication, l'installation et la maintenance. On citera des besoins en drivers de haute qualité exempt de « flickering », y compris en cas d'usage de gradateurs, des modules de communication entre luminaires, des interfaces multi-protocoles. Des solutions autour du développement d'ASIC dédiés visant à faire des luminaires, des objets intelligents et interconnectés devraient être envisagées. Bien sûr le développement de logiciels embarqués ad hoc doit aussi être envisagé.
4. **Optique à façon** : les marchés de l'éclairage se distinguent souvent par de petits volumes, des demandes spécifiques qui demandent à adapter rapidement un produit standard pour répondre au besoin. Par ailleurs, il faut suivre également l'évolution rapide des sources. Les techniques de fabrication additive semblent parfaitement adaptées à la problématique des marchés de l'éclairage, du moins pour les marchés de petits à moyens volumes ou pour le prototypage rapide. Il semble nécessaire de développer ces techniques afin de rendre possible la fabrication de systèmes optiques de qualité.

11.5 ROADMAP TECHNOLOGIQUE

Thème / Périodes	2018-2019	2020-2021	2022-2023
Spectres	Développement de lampes & luminaires à spectres spéciaux fixes	Développement de lampes & luminaires à spectres variables asservis pour applications spécifiques - intégration de microspectromètres	
Capteurs embarqués	Développements de capteurs de présence "intelligent" et logiciels de traitement. Développement de capteurs environnementaux à intégrer dans les lampes et luminaires.	Développement de lampes et luminaires intégrant des capteurs de présence. Intégration de capteurs autres.	Intégration généralisée dans les luminaires professionnels de capteurs de présence. Intelligence artificielle dans l'éclairage. Utilisation du système d'éclairage pour d'autres fonctions que d'éclairer.
Électronique et logiciels	Mise en réseau des lampes et luminaires - Protocoles & interfaces. Réseau sans fils et filaires	Développement d'ASICS dédiés	Déploiements de solutions intelligentes
Optique	Développement de nouvelles techniques optiques pour l'éclairage. Optiques par impression 3D. Optiques free form...	Prototypage	Déploiement chez les industriels ou au sein d'une plateforme mutualisée de moyens de fabrication d'optiques en petite série pour les marchés de l'éclairage

12 ANNEXE 8 - MARCHÉS D'APPLICATION : TRANSPORT ET MOBILITE : AERONAUTIQUE, FERROVIAIRE, MARITIME, TRANSPORTS COLLECTIFS, AUTOMOBILE

A VENIR

13 ANNEXE 9 - TECHNOLOGIES PHOTONIQUES D'EXCELLENCE : IMAGEURS ET VISION

13.1 CARACTERISTIQUES DE L'INDUSTRIE DU DOMAINE

L'offre technologique est variée et évolue rapidement

Le civil détermine l'offre : le CMOS supplante le CDD en matriciel visible sous l'impulsion de la téléphonie mobile, le CIS prend le dessus sur le CCD en imageurs linéaires par effet de bascule du marché des copieurs, dans l'infrarouge thermique l'emploi des microbolomètres se généralise

La course à la résolution ne semble pas faiblir : une très large gamme de résolutions est disponible depuis le VGA jusqu'à >>100MPixels,

Le spectre est couvert du visible au TeraHertz, de nouvelles technologies apparaissent sans cesse, par exemple dans le proche IR l'InGaAs est bien établi mais les technologies Quantum Dot émergent

Les composants permettant de faire de la 3D apparaissent (SPAD)

La chaîne de valeur est bien structurée

Des équipementiers industriels établis consommateurs de Vision dans leurs systèmes (majoritairement ETI et grands groupes, focalisés marchés applicatifs)

Des intégrateurs développant des offres de « fonctions » vision standard ou custom (en très grande majorité des PME)

Des fabricants de caméras très nombreux en Europe, à tendances généralistes, peu de Français, positionnés sur des niches

Des distributeurs de composants qui s'insèrent entre les fondeurs et les utilisateurs de capteurs

Des fondeurs de composants et technologies, de plus en plus concentrés et moins nombreux

Peu de plateformes technologiques purement dédiés à la vision : CEA ...

13.2 FORCES FAIBLESSES

13.2.1 Forces

Très bonne connaissance des technologies

Capacités de conception au meilleur niveau mondial

Un leader mondial de l'infrarouge

13.2.2 Faiblesses

La guerre du mass market en production est jouée et perdue, oblige à se concentrer sur des niches

Dispersion des efforts des PME

13.2.3 Opportunités

Dynamisme des équipementiers industriels établis consommateurs de Vision dans leurs systèmes et des intégrateurs développant des offres de « fonctions » vision

13.2.4 Menaces

Concentration des acteurs du silicium, provoquant une moindre diversité et des problématiques de MOQ importantes, pour des niches applicatives à forte valeur ajoutée mais à volumes limités

Les barrières d'entrées à la mise en œuvre des technologies « souches » Imageurs / Vision ne cessent de s'abaisser et permettent l'arrivée de nouveaux concurrents

13.3 RECOMMANDATIONS

13.3.1 Capteurs

Situation actuelle et positionnement visé à 5 ans : sauf en IR, la France et l'Europe ne disposent plus de moyens de production de masse de capteurs mais conservent de très bonnes capacités de conception, il est possible de prendre position dans des domaines très différenciés (haute résolution, microscopie digitale, bio Imagerie, THz, haute sensibilité,...)

Action proposée : **Maintenir l'accès à des moyens de prototypage ou de fabrication petite ou moyenne séries mutualisées**

13.3.2 Composants spécifiques

Situation actuelle et positionnement visé à 5 ans : il existe un fort enjeu de développement de fonctions complémentaires intégrées autour des capteurs pour étendre leurs performances dans des domaines applicatifs ciblés. Les initiatives sont aujourd'hui individuelles et fragmentées, un réseau d'excellence laboratoires, plateformes technologiques, entreprises, mixant les technologies permettrait de prototyper des briques dédiées

Action proposée : **Constituer un réseau d'excellence autour de plateformes communes pour prototyper des imageurs avec des fonctions intégrées**

13.3.3 Architectures, Intégration et Traitements

Situation actuelle et positionnement visé à 5 ans : la recherche de fonctions intégrées est un enjeu majeur pour la plupart des industriels et chacun d'entre eux développe sa propre stratégie. Les priorités sont clairement dans la miniaturisation, l'autonomie, le traitement embarqué, l'optique, l'usage de l'loT. La plupart des PME développent leurs solutions d'intégration car c'est là que se crée la valeur. Le développement de sous-ensembles mutualisables accélérerait la mise sur le marché

Action proposée : Constitution d'un groupe de travail et de réflexion permettant de définir ce qui est mutualisable de ce qui est plus sensible et spécifique aux acteurs.

14 ANNEXE 10 - TECHNOLOGIES PHOTONIQUES D'EXCELLENCE : LASERS

14.1 LES CARACTERISTIQUES DE L'INDUSTRIE FRANÇAISE DU DOMAINE : UN PANORAMA TRES VARIE

Depuis l'invention du laser il y a un peu plus de 50 ans, une très grande variété de sources laser est apparue (depuis les sources continues aux sources ultra rapides (fs), couvrant toutes les gammes de puissance et tout le domaine spectral de l'Ultraviolet profond à l'Infrarouge lointain)

Des acteurs français sont présents aux 3 grands niveaux d la chaine alimentaire, avec des problématiques spécifiques :

Les solutions lasers : machine industrielle, équipement médical, matériel de défense, instrumentation (ES Laser, Laser Cheval, BEAM, Cilas, Quantel Médical, Leosphère, Muquans, Sagem, Thales ...)

Les sources lasers (Amplitude, Keopsys, Oxxius, Quantel, Thales laser, ALS, Mirsense ...)

Les composants et technologies (Xfiber, Cristal laser, IDIL, le Verre fluoré, ISP, Cailabs, Quantel Diodes)

Le paysage laser français comporte 3 grands types d'acteurs :

Les entreprises sont en très grande majorité des PME et TPE (ce qui est spécifiquement Français)

Les laboratoires institutionnels : IOGS, XLIM, PHLAM, CEA, Femto ST, Ecole Polytechnique ...

Les plateformes technologiques : Photonics Bretagne, Alphanov, IREPA ...

La tendance des acteurs industriels est de se « verticaliser » de plus en plus pour se différencier et augmenter leur valeur ajoutée.

14.2 FORCES FAIBLESSES

14.2.1 Forces

- ▶ La recherche est au meilleur niveau mondial et les ingénieurs français sont de très bon niveau
- ▶ Présence solide dans des niches (lasers de faible et moyenne puissance « pointus » pour l'instrumentation, compétence de rang mondial dans les chaines ns de très forte puissance crête (LMJ))
- ▶ Leader mondial des lasers à impulsion brèves (ps et fs), le groupe Amplitude, depuis la faible puissance jusqu'à la très forte puissance crête (chaines PW).
- ▶ Une très bonne connaissance des besoins dans des domaines comme la Défense et la Santé

14.2.2 Faiblesses

- ▶ Pas de très grandes entreprises laser en France (comparé à l'Allemagne) et absence du marché des lasers continus de forte puissance (CO2, fibre, diodes...),
- ▶ Dans certains secteur applicatifs (tel que la machine industrielle) la France ne dispose pas de toute la chaine alimentaire. Or c'est au niveau des applications que se trouve la véritable valeur ajoutée et le bras de levier industriel de ce type de technologie.

14.2.3 Opportunités

- ▶ Regroupements en cours dans le paysage industriel (par ex. Keopsys/ Quantel)
- ▶ Maîtrise des technologies clés (fibres, optique non linéaire), connaissance de l'intégration/hybridation des fonctions
- ▶ De nouvelles applications dans tous les domaines : automobile, énergie, environnement, défense, industrie, santé ...

14.2.4 Menaces

- ▶ La non maîtrise au niveau Européen de sources de composants actifs ou passifs clés

14.3 LES RECOMMANDATIONS

Dans le domaine des fibres et des composants spécifiques

- ▶ **La base de la différenciation et de la compétitivité par rapport aux pays émergents est la maîtrise des technologies. Au niveau laser la fibre optique est devenue « le composant clé » par excellence.**
- ▶ 1.1 Tirer parti d'une R&D de niveau mondial mais à faible impact commercial pour faire émerger un industriel leader en fibre spéciale de nouvelle génération
 - - Soutenir une discussion entre les acteurs industriels laser et fabricants de fibres Français (Xfiber, Glo-photonics...) pour favoriser un plan industriel à 5 ans dans le domaine des fibres optiques spéciales.
 - - Prévoir une suite au projet 4F pour un déploiement industriel
- ▶ 1.2 Garantir l'accès à des composants clés et à des traitements de très grande qualité et tenue en s'appuyant sur une R&D académique active mais dispersée
 - - **Animation par France Photonics d'un forum entre labos et industriels** pour initier des projets multipartenaires dans le domaine des traitements optiques, des matériaux amplificateurs et ONL pour de la forte puissance, et valider et transférer plus efficacement les innovations en matière de traitements et matériaux des labos vers les industriels

Dans le domaine des fonctions et modules optiques, et de la mise en système

- ▶ 2.1 Développer et mutualiser le développement de fonctions photoniques innovantes à travers les plateformes technologiques pour éviter la dispersion des efforts et réduire les risques
 - - Favoriser leur développement national des plateformes et leur coordination grâce à de nouveaux projets thématiques nationaux
- ▶ 2.2 Multiplier le nombre d'acteurs français proposant des « solutions lasers globales » sur les marchés applicatifs
 - - Donner un cadre pour multiplier les échanges et partenariats « transverses » dans des projets de systèmes lasers innovants entre secteurs applicatifs (mobilité, médial, TIC...) et industriels lasers et photoniques (fait partie des missions générales de France Photonics)
 - - Il existe en France une chaîne de valeur complète dans les applications du laser aux besoins de défense. Un autre secteur très dynamique et dans lequel la France dispose d'acteurs de premier plan à tous les niveaux est le domaine de la Santé. Il serait souhaitable de financer un grand plan laser et santé comme les allemands ont soutenu un plan laser et industrie dans les années 2000.

Dans le domaine des futurs Lasers et systèmes de forte puissance

- ▶ 3.1 Devenir leader mondial de sous-systèmes lasers de très forte puissance crête pour applications industrielles en capitalisant sur une Compétence de niveau mondial sur les grands lasers scientifiques
- ▶ Mieux identifier les besoins systèmes et les étapes de valorisation (roadmap) à horizon 2025/2030 à travers des actions transverses entre acteurs lasers et applicatifs. Ce soutien peut aussi s'inscrire dans un plan Laser et Santé.

Recommandations prioritaires

Tirer parti d'une R&D de niveau mondial mais à faible impact commercial pour faire émerger un industriel leader en fibre spéciale de nouvelle génération

Lasers pour médical (à confirmer)

15 ANNEXE 11 - TECHNOLOGIES PHOTONIQUES D'EXCELLENCE : OPTIQUE ET OPTO-MECANIQUE

15.1 LES CARACTERISTIQUES DE L'INDUSTRIE DU DOMAINE

L'industrie opto-mécanique rassemble des fabricants de composants (ex : micro-positionnement avec Micro-Contrôle Spectra-Physics, leader mondial) et des fabricants de sous-ensemble destinés à être incorporés dans un équipement (ex : ellipsomètre de Horiba Scientific). La segmentation entre l'optique et l'optomécanique est imprécise, des acteurs étant présents simultanément sur les 2 segments.

Plus de 300 entreprises en France (environ 6000 personnes) peuvent être considérées comme faisant de l'opto-mécanique pour de 1 G€ de chiffre d'affaires annuel.

15.2 FORCES FAIBLESSES

15.2.1 Forces

- ▶ L'industrie française du composant opto-mécanique est dynamique (ex Micro-Contrôle). Elle est tirée par la micro-électronique, le médical, les télécoms, mais aussi les grands projets de grands lasers de puissance (Lasers Mégajoule, ELI, ...),
- ▶ L'industrie française est bien positionnée sur les faibles et moyens volumes à forte valeur ajoutée et son expertise est reconnue. Par exemple : composants motorisés, conditionnement optique (propreté, faible dégazage, UHV, ...), optique adaptative

15.2.2 Faiblesses

- ▶ Il y a peu de fabricant français de machines-outils pour l'industrie (micro-électronique, optique, ...) ce qui freine le développement de produits photoniques destinés aux marchés de volume qui nécessitent une automatisation/robotisation de la production.
- ▶ La présence française est faible sur les colles optiques et les composants critiques de base (moteur, capteurs). Ces composants sont importés et peuvent être soumis à des restrictions à l'exportation (règlement ITAR), limitant ainsi les ventes à l'international.
- ▶ Le marché intérieur ne demande pas de production en grand volume, généralement faite en Asie
- ▶ Il n'y a pas, en France de groupe industriel qui jouerait le rôle de « locomotive » pour ce domaine d'activité.

15.2.3 Opportunités

- ▶ L'évolution de l'éclairage fixe et mobile, les petits lasers appellent l'innovation en packaging optique (concepts, procédés, machines) pour ces marchés croissants en volume.
- ▶ L'assemblage automatique de précision des composants hybride optique/électronique (par ex. télécoms à bas cout) crée aussi des nouveaux besoins en machines ultra-précises et demande des systèmes d'inspection automatique à haute résolution
- ▶ Le développement des procédés de fabrication additive notamment pour pièces de précision (par exemple en optique free form) crée également des nouveaux besoins en machines.
- ▶ Le tissu de start-ups optique ou médicale est riche, il appelle aussi des procédés nouveaux.

15.2.4 Menaces

- ▶ Les acteurs en micro positionnement à faible coût (Edmund Optics, Thorlabs...) proposent aussi des produits à plus forte valeur ajoutée
- ▶ La concurrence étrangère (exemple groupe BESY en Europe du Nord) a une avance technologique et une réputation incontestable dans le domaine des machines de production (dérivée de la micro-électronique).

15.3 LES RECOMMANDATIONS

Ces recommandations ne sont pas exhaustives, elles visent à pallier certaines faiblesses identifiées

15.3.1 Optique free form

Le but est de développer une activité française sur ces composants révolutionnaires. Les USA, l'Allemagne, le Royaume-Uni ont déjà mis en place des centres de compétences.

Soutenir l'initiative en cours à l'IOGS de St Etienne pour faire émerger un centre français de compétences freeform, intégrant les 3 volets conception/modélisation, fabrication, métrologie

- ▶ Poursuivre la définition de ce centre :
 - Préciser la forme de ce centre (centre de recherche partenariale ?), ses relations avec les plateformes photoniques existantes, son financement
 - Élargir le panel de partenaires industriels
 - Inscrire cette action dans le renouveau de la formation au génie optique
- ▶ Initier et promouvoir des projets R&D collaboratifs
 - Dans un cadre national (DGA, DGE...)
 - Dans le cadre européen (projets européens ciblés (H2020 en 2009, ESA ...))
- ▶ Développer des standards de définition pour faciliter la métrologie

15.3.2 Optique adaptative

Le but est de renforcer le leadership de l'industrie française et de se préparer à des marchés de plus fort volume (télécoms, ophtalmologie, petits lasers, vision industrielle, téléphonie mobile, ...)

Créer un groupe de travail collaboratif Industriels et laboratoires, sous l'égide de Photonics France

- ▶ Menant une action de standardisation à l'échelon France, pour
 - Les interfaces miroir-capteur-contrôle-commande
 - La métrologie
- ▶ Préparant l'arrivée des optiques adaptatives bas coût
 - Analyse des applications (coûts cibles) avec les acteurs majeurs des marchés (télécom espace-libre, ophtalmo, petits lasers etc.)
 - Projets collaboratifs pour industrialiser les solutions répondant aux marchés de volume et, en incluant

15.3.3 Machines de production de haute précision pour l'intégration de fonctions optiques et électroniques

Le but est de positionner l'industrie française en aval de la réalisation de composants, pour lesquels nous sommes souvent bien placés, pour faire émerger une industrie des modules directement utilisables par les

intégreurs systèmes. La réalisation de ces modules requiert des machines spécifiques de packaging, d'intégration optique et d'alignement opto-mécanique.

- ▶ Assister les industriels dans une démarche d'industrialisation pour une production en volume des équipements photoniques et renforcer la compétitivité de l'industrie photonique Française.
Par la mise en place d'une Plateforme en réseau pour l'industrialisation de la photonique (projet de filière PHOTOMATIQ) :
 - Développer des moyens de production automatisés (ligne pilote)
 - Aider à l'industrialisation et valider le processus série sur la ligne pilote des produits : lasers et modules photoniques.
 - Assister les industriels dans la mise en place de moyens de production automatiques propres à leur activité

Priorités

- Centre français de compétences freeform

- Plateforme en réseau pour l'industrialisation de la photonique

16 ANNEXE 12 - TECHNOLOGIES PHOTONIQUES D'EXCELLENCE : SEMICONDUCTEURS ET INTEGRATION

16.1 LES CARACTERISTIQUES DE L'INDUSTRIE FRANÇAISE DU DOMAINE

16.1.1 Plusieurs types de technologies et de composants

Les technologies d'intégration de composants photoniques sont dérivées de celle de la microélectronique sur différentes familles de substrats : silicium, InP, GaAs, GaN, GaSb, InSb, CdZnTe, LiNbO₃, verre, matériaux hétérogènes.

Les composants obtenus vont du composant élémentaire (eg. Laser, LED, Modulateur, bolomètre) jusqu'au circuit complexe (eg. Transceiver, Microdisplay, Imageurs, capteur intelligent), fonctionnant dans un spectre allant des rayons X au THz

16.1.2 4 grands niveaux dans la chaîne de la valeur avec des problématiques spécifiques

- ▶ Les fabricants d'équipements (de production de composants) : Riber, Yenista, SET,
- ▶ Les fabricants de substrats et de couches épitaxiées : SOITEC, InPACT, III-V Lab, Almae Technologies, 3SP Technologies, St Gobain, Aledia,
- ▶ Les fabricants de composants, circuits et sous-systèmes : STMicro, III-V Lab, Almae Technologies, 3SP Technologies, Mirsense, Aledia, Sofradir, Ulis, Teledyne e2v, Photline-iXBlue, Teem Photonics, IRLynx, Trixell, Multix, Photonis, HGH, Keopsys, i2S...
- ▶ Les intégrateurs de systèmes : Thales, Nokia, Safran, Valeo, Ekinops, ...

2 grands types d'acteurs :

- ▶ Les entreprises : start-up, PME, ETI et grands groupes
- ▶ Les laboratoires et instituts de recherche : LETI, C2N, INL, FEMTO, IES, CRHEA, LAAS, ...

16.2 FORCES FAIBLESSES

16.2.1 Forces

- ▶ R&D au meilleur niveau mondial
- ▶ Des industriels leaders dans leur domaine au niveau Européen/mondial

16.2.2 Faiblesses

- ▶ L'écosystème industriel a souffert de la crise des télécoms et certaines compétences/entreprises dans le domaine de la fabrication des composants ont disparu
- ▶ L'industrie de la microélectronique a ralenti ses investissements et se concentre sur le « More Than Moore »

16.2.3 Opportunités

- ▶ Fortes perspectives de croissance sur les marchés pour lesquels l'intégration est un différentiateur : photonique silicium, imagerie, display
- ▶ Les technologies d'intégration appliquées à la photonique ouvrent de nouvelles perspectives aux acteurs existants. La typologie des marchés est bien adaptée aux capacités de production des industriels français

16.2.4 Menaces

- ▶ Forts investissements publics aux US et en Chine pour mettre en place des écosystèmes complets
- ▶ Verticalisation des gros acteurs (eg. GAFAM).

16.3 LES RECOMMANDATIONS

16.3.1 Substrats, matériaux et process semiconducteurs :

La France dispose d'un écosystème au meilleur niveau avec des leaders mondiaux. La maîtrise de cette compétence est critique pour tout l'écosystème. L'objectif est de conforter le leadership et la chaîne de valeur, de pérenniser les filières et de faire émerger des acteurs composants/sous-systèmes.

Moyen d'action proposé : création d'une ligne pilote dédiée à la photonique silicium et combinant les savoir-faire et les plateformes SOI et III-V existantes pour servir les marchés émergents en petit volume et préparer le déploiement à grande échelle sur une ligne CMOS

16.3.2 Intégration de matériaux « non-CMOS » sur silicium :

La France dispose d'une R&D de niveau mondial, mais la plupart des acteurs développent leurs solutions propres. L'objectif est de devenir leader sur les filières d'intégration de matériaux optiques sur silicium

Moyen d'action proposé : création d'une ligne pilote pour développer les solutions d'intégration sur Silicium en 200/300mm à grande échelle (et capter le marché mondial) avec pour objectif le développement de filières technologiques (intégration monolithique, intégration hétérogène, hybridation) et de mener des actions de standardisation/normalisation. Cette action devrait faciliter l'accès à la technologie pour les faibles/moyens/grands volumes.

16.3.3 Intégration de fonctions optiques et électroniques, packaging

L'enjeu est de miniaturiser en conservant les performances et les fonctionnalités, ce qui pose des problèmes de fabrication et d'assemblage (automatisation)

Aujourd'hui l'assemblage de composants discrets est souvent sous-traité dans des pays à faible coût de main d'œuvre. L'augmentation du niveau d'intégration et la robotisation permettrait de relocaliser certaines activités en France et à certains acteurs de remonter dans la chaîne de la valeur.

Moyen d'action proposé : Mise en place d'un groupe de travail pour définir la mise en place des actions et leur localisation, par exemple :

Développement de filières d'intégration wafer-level : localisation au LETI

Automatisation de l'assemblage optoélectronique, encapsulation bas coût : localisation soit au LETI, soit dans une structure type IRT

16.3.4 Test et caractérisation, automatisation de test sur wafer et après la mise en module

La plupart des acteurs ont leurs propres moyens de tests, l'objectif serait de développer des moyens de tests automatisés pour les chips intégrés ou des modules complexes.

Moyen d'action proposé : Mise en place d'un groupe de travail pour définir la plateforme mutualisée de test optoélectronique (tests automatisés sur wafer, tests fonctionnels complexes en modules, fiabilité) et sa localisation.

16.3.5 Actions retenues en priorité (provisoire)

▶ Intégration de matériaux « non-CMOS » sur silicium :

- Moyen d'action proposé : création d'une ligne pilote pour développer les solutions d'intégration sur Silicium en 200/300mm à grande échelle (et capter le marché mondial)

Cohérent des besoins variés et très spécifiques des divers marchés

▶ Intégration de fonctions optiques et électroniques, packaging

- Moyen d'action proposé : Mise en place d'un groupe de travail pour définir la mise en place des actions et leur localisation, par exemple ...

Cohérent de la demande du groupe optoméca qui propose des machines de précision

17 ANNEXE 13 - TECHNOLOGIES PHOTONIQUES D'EXCELLENCE : PHOTONIQUE QUANTIQUE

Cette réflexion commencée début 2018 est à compléter

L'**optique/photonique quantique** désigne l'ensemble des sciences et technologies mettant à profit l'utilisation de la nature quantique de la lumière (ou d'autres particules) et de ses interactions avec la matière. C'est un domaine de recherche en plein essor, au confluent de la mécanique quantique et de l'optique. Les progrès sont tels que l'on parle de 2^{ème} révolution quantique (la première ayant eu lieu au début du siècle et établissant les propriétés quantiques de la matière)

L'Union Européenne a pris conscience de l'importance des technologies quantiques en général et a publié un document appelé « Quantum Manifesto »⁶ qui a servi de point de départ au lancement d'un programme de recherche ambitieux sur le sujet : le Flagship sur les technologies quantiques. Ce programme est prévu pour 10 ans et vise à faire de l'Union Européenne un leader mondial dans l'exploitation des retombées économiques et sociétales des technologies quantiques. Un « high Level Steering Committee » (HLSC) a été nommé pour définir la structure et les axes de recherche de ce programme. Il a émis un rapport en novembre 2017⁷ qui propose une roadmap de mise en œuvre de ces technologies et définit cinq domaines de recherche. Quatre d'entre eux concernent une application spécifique des technologies quantiques : les communications, le calcul, la simulation, les capteurs et la métrologie. Le cinquième axe est transverse aux quatre premiers et concerne la science fondamentale. Sur cette base, l'appel à projets de la phase de lancement du Flagship a été lancé et clôturé en février 2018.

Par ailleurs, le Royaume-Uni, le Danemark, la Suède, les Pays-Bas et l'Allemagne ont lancé des programmes nationaux de grande ampleur sur cette thématique. Des initiatives similaires sont en place au Canada, en Chine et aux Etats-Unis.

Cette technologie a de nombreux impacts potentiels en matière de senseurs de très haute précision, de communications sécurisées et d'ordinateurs de très haute puissance. Les marchés potentiels ne sont encore que partiellement identifiés de par la nouveauté de cette technologie de rupture.

Situation française

- ▶ -un très fort tissu de laboratoires publics au meilleur niveau mondial (deux prix Nobel) couvrant tous les axes du Flagship.
- ▶ -deux start-ups, spin-offs des laboratoires, proposant des produits basés sur les technologies quantiques : Muquans, créée en 2011, comptant 25 personnes et produisant des senseurs gravimétriques et des horloges atomiques et Quandela, créée en 2017, comptant 3 personnes et produisant des sources de photon unique. Par ailleurs, plusieurs PME proposent des technologies génériques pour la mise en œuvre des technologies quantiques comme les sources laser, les compteurs de photon unique ou la cryogénie.
- ▶ - De grands groupes comme Thales mènent leur propre activité de recherche dans ce domaine et ont acquis un savoir-faire unique dans le transfert des résultats de laboratoire vers les applications notamment concernant les communications quantiques et les senseurs quantiques.

Le potentiel de cette technologie et la qualité des laboratoires sont tels que de nombreuses opportunités de création de start-ups devraient voir le jour. Les recommandations que l'on peut formuler, à la lumière

⁶ http://quope.eu/system/files/lu7193056_Quantum%20Manifesto_WEB.pdf

⁷ http://ec.europa.eu/newsroom/dae/document.cfm?doc_id=46979

des premiers retours d'expérience, ont pour but de favoriser ces créations. Le développement de ces technologies est long et se heurte à plusieurs types de difficultés que les recommandations suivantes visent à résoudre.

Proposition 1 : Conduire une étude de marché spécifique à la photonique quantique

Les documents existants comme celui émis par l'action de coordination QUROPE⁸ ou l'initiative britannique « Innovate UK »⁹ produisent principalement des roadmaps sans réelles perspectives chiffrées justifiant un investissement industriel massif.

Proposition 2 : Participer activement à l'action de coordination sur les technologies quantiques lancée par la Commission européenne

La Commission européenne a notifié une action de coordination ayant pour objectif de structurer la communauté concernée par les technologies quantiques, à la fois académique et industrielle. Ce projet, dénommé QSA pour « Quantum Coordination and Support Action », a démarré en décembre 2017. Des groupes de travail sont mis en place dont l'un concerne l'innovation et l'exploitation (responsable Thales) et a en charge de promouvoir le transfert des résultats vers le milieu industriel. Un réseau de correspondants nationaux sera créé et aura pour charge de proposer des représentants dans ces groupes de travail. C'est l'occasion pour la communauté française de contribuer de manière active aux objectifs du Flagship sur les Technologies Quantiques et de mener une réflexion sur les objectifs nationaux, notamment en ce qui concerne la photonique.

Proposition 3 : Mise en relation des acteurs de la technologie photonique quantique avec les industries applicatives

La forme de l'action reste à préciser mais elle doit avoir deux objectifs

- ▶ Expression des besoins techniques des industries applicatives
- ▶ Mutualisation d'efforts pour développer certaines technologies, y compris les technologies auxiliaires elles-mêmes très pointues (lasers, cryogénie...)

Proposition 4 : Création d'un fond spécifique photonique quantique

La frilosité des investisseurs français sur les sujets hardware, non spécifique de ce domaine, est à la mesure du risque et de la longueur des développements, le manque de financements de R&D ne permet pas aux industriels de conduire des activités de recherche amont mais appliquées sur de longues durées (> 5 ans).

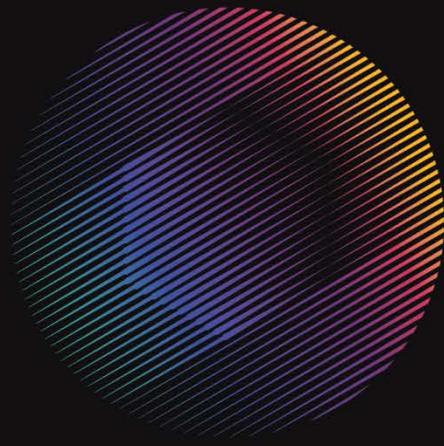
⁸ http://qurope.eu/system/files/u7193056_Quantum%20Manifesto_WEB.pdf

⁹ https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/470243/InnovateUK_QuantumTech_CO004_final.pdf



Rejoignez-nous !





Photonics
France

LA FÉDÉRATION
FRANÇAISE DE
LA PHOTONIQUE

FUSION DE L'AFOP ET DU CNOP

Photonics France - www.photonics-france.org

13, rue Moreau - 75012 PARIS

Tél. : + 33 1 53 46 27 09 - Email : contact@photonics-france.org

