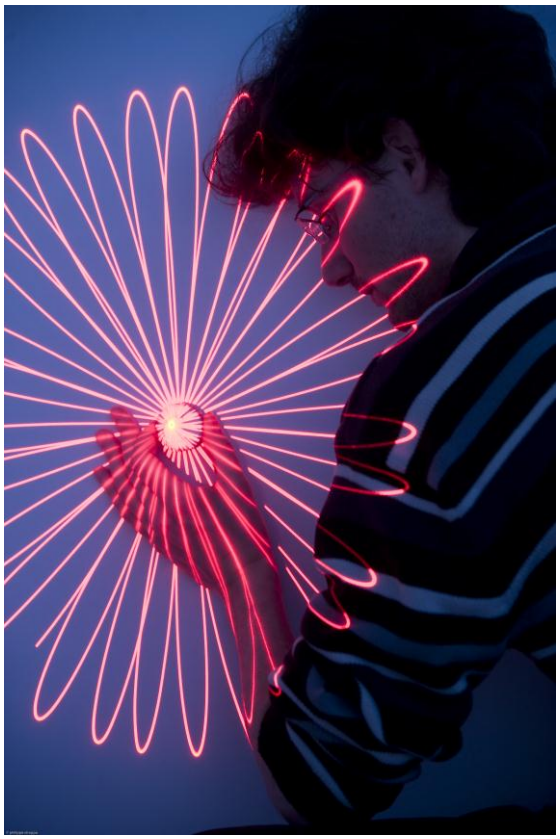
DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

ANNÉE INTERNATIONALE DE LA LUMIÈRE :

LES RECHERCHES DU CEA SUR LA LUMIÈRE : DE LA PHOTONIQUE À LA LUMIERE EXTRÊME



MARS 2015

DOSSIER DE PRESSE

Contact Presse : CEA / Service Information-Media
Nicolas TILLY | T. +33 (0)1 64 50 17 16 | P. +33 (0)6 82 47 39 85
nicolas.tilly@cea.fr

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Direction de la Communication | Service Information-Média
91191 Gif-sur-Yvette Cedex | T. +33 (0)1 64 50 20 11 | F. +33 (0)1 64 50 28 92
Établissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775 685 019

SOMMAIRE

INTRODUCTION 5

DOTER L'INDUSTRIE DE TECHNOLOGIES INNOVANTES 7

Capteurs : acquérir de l'information via les photons 8

Transmetteurs : des systèmes de communication 12

Écrans : les systèmes photoniques d'affichage 14

Éclairage : les led 18

Énergie : générer de l'électricité avec des photons 22

LUMIÈRE EXTRÊME ET RECHERCHE FONDAMENTALE 25

Lasers et lumière extrême 25

Le Laser Mégajoule 26
Le laser PETAL 29
Les lasers à impulsions ultra-brèves et/ou ultra-intenses 30

La nanophotonique : la lumière à l'échelle du nanomètre ou du photon unique 32

La plasmonique 32
Vers un traitement photonique de l'information quantique 32

ENJEUX ET PRINCIPAUX PÔLES DE R&D 34

Des écosystèmes de R&D en pointe 35

Des instituts nationaux et européens en soutien à l'industrie 36

ANNEXES 38

Connaître et manipuler la lumière 40

L'interaction de la lumière et de la matière 41
La lumière « standard » et la lumière « laser » 41

INTRODUCTION

Les technologies photoniques connaissent depuis une quinzaine d'années un essor considérable avec de nombreuses applications dans notre vie quotidienne : éclairage, communication, énergie… Ces nouvelles utilisations de la lumière proviennent d'avancées scientifiques majeures sur les propriétés des ondes électromagnétiques, de leur interaction avec la matière et dans la maîtrise des phénomènes physiques à l'échelle du photon unique ou des flux intenses de photons.

Pour la réalisation de ses grands programmes scientifiques et technologiques, dans les domaines des énergies bas-carbone, des technologies de l'information et de la communication, des technologies pour la santé, ainsi que pour les besoins de la défense et de la sécurité, le CEA développe des compétences, un savoir-faire en photonique et dans l'exploitation de la lumière dans ses états les plus extrêmes, et réalise des démonstrateurs pour de futurs transferts technologiques.

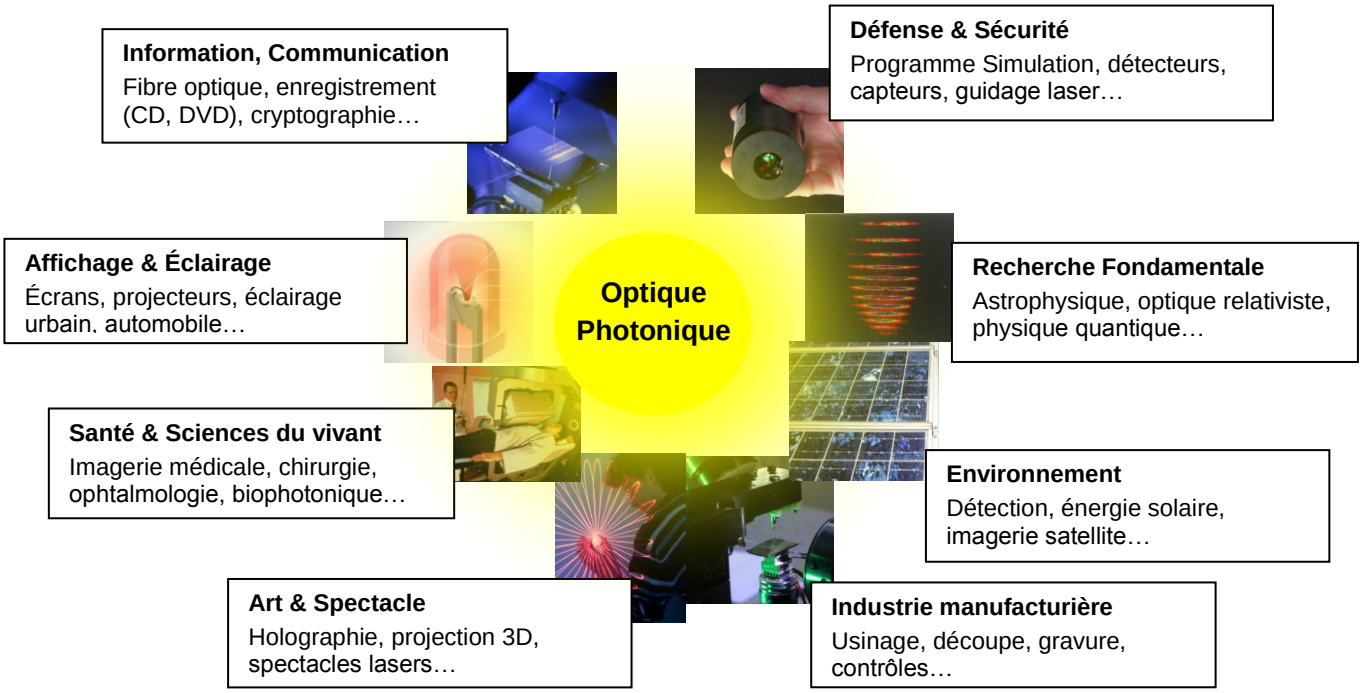


Figure 1 : Champs des applications de la lumière © CEA

De la photonique…

La photonique exploite les propriétés de la lumière, dans une large gamme de longueurs d'ondes au-delà du spectre visible, et développe de nouvelles technologies pour la génération, la transmission, le traitement ou la conversion de la lumière que l'on retrouve dans de nombreux domaines d'applications : l'éclairage, l'imagerie, l'affichage, les procédés de fabrication des technologies de l'information et de la communication (TIC), l'énergie… La photonique ne constitue donc pas une « filière industrielle » en soi, mais un ensemble de technologies transversales,

utilisées dans une grande variété d'objets. La Commission européenne a identifié[1] la photonique comme l'une des six technologies clés génériques (KET[2]), nécessaires à plusieurs secteurs stratégiques et à l'émergence des filières industrielles de demain.

… à la recherche fondamentale de pointe

Ces recherches ont pour objectif la compréhension des mécanismes physiques fondamentaux en jeu dans l'interaction de la lumière avec la matière. La lumière est autant un objet d'étude qu'un outil de recherche, depuis la physique quantique, en passant par l'optique relativiste, la physique des hautes énergies et l'astrophysique… Ces recherches s'appuient sur le développement d'outils de pointe (sources de lumière, lasers, mécaniques de précision, capteurs ultrasensibles, électroniques et systèmes numérique à très faible niveau de bruit, de basse consommation, de grande bande passante…) et contribuent au développement des technologies photoniques de demain.

Pour mener à bien ces recherches, le CEA s'appuie sur de grands instruments, pour lesquels il réalise des contributions remarquables à l'état de l'art mondial pour apporter des réponses à de grandes questions scientifiques. Un exemple emblématique est l'implication du CEA dans le domaine des grands lasers, et sa volonté de contribuer à la création de deux pôles de renommée mondiale sur le territoire national autour des lasers LMJ et Petal[3] à Bordeaux et sur le plateau de Saclay répondant à des thématiques de recherche ciblées.

Bref historique du développement de la photonique

La reconnaissance de la photonique comme secteur technologique au plan mondial a débuté dans les années 2000, fruit de trois facteurs de développement successifs :

- une dynamique de recherche, amorcée dans les années 1960, autour de la fibre optique et des lasers, et qui a atteint une maturité technologique 40 ans plus tard ;
- une utilisation de ces technologies de pointe dans les secteurs de la défense et de la sécurité, initiée dans les années 1970-1980, qui a permis d'améliorer leur fiabilité et leur maturité ;
- une introduction massive des composants optoélectroniques dans le domaine des télécommunications, dans les années 1990, ensuite portée par l'essor de la téléphonie mobile , qui ont permis leur développement industriel et leur diffusion dans tous les secteurs de l'industrie.

Les Prix Nobel de physique 2012 et 2014 ont récompensé des travaux fondés sur l'interaction des ondes électromagnétiques et la matière :

en 2012, les travaux de Serge Haroche et de ses collaborateurs, pour la manipulation et la mesure de systèmes quantiques au moyen de la lumière ;

en 2014, les travaux de Isamu Akasaki, Hiroshi Amano et Shuji Nakamura, sur les diodesélectroluminescentes (LED) bleues à haut rendement.

L'UNESCO A DECLARÉ L'ANNÉE 2015 « ANNÉE INTERNATIONALE DE LA LUMIÈRE ».

[1] « Une stratégie européenne pour les technologies clés génériques – Une passerelle vers la croissance et l'emploi », juin 2012
[2] *Key Enabling Technologies* (KET)
[3] Petawatt Aquitaine laser (pétawatt : 10^{15} watts)

DOTER L'INDUSTRIE DE TECHNOLOGIES INNOVANTES

La conception-réalisation de systèmes photoniques constitue une branche technologique transversale, dont les applications se trouvent dans de très nombreux domaines industriels (voir figure 1). Pour chacun de ces domaines applicatifs, les chercheurs et ingénieurs du CEA visent à développer des systèmes optimisés ou innovants, en lien étroit avec des partenaires industriels. Leurs recherches concernent :

- les matériaux (semi-conducteurs, photosensibles…) ;
- les systèmes optiques (lentilles, traitements de surface…) ;
- les procédés de conception - fabrication.

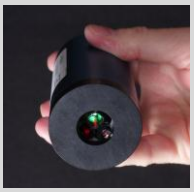
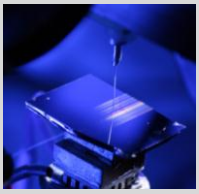
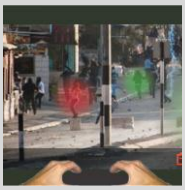
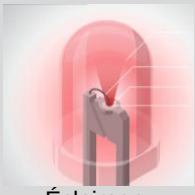
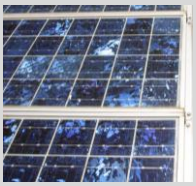
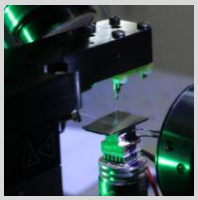
Types de systèmes	CAPTEURS	PUCES, PHOTONIQUE SUR SILICIUM	ÉCRANS, AFFICHAGE	LED	PHOTOVOLTAÏQUE	LASERS
Fonction	 Acquisition de l'information	 Transmission de l'information	 Restitution de l'information	 Éclairage	 Fourniture d'énergie	 Fabrication industrielle

Tableau : Les secteurs d'application des technologies photoniques © CEA/DR

EXEMPLE DE RECHERCHES
sur les solutions d'intégration de fonctionnalités optiques

Au-delà des travaux menés sur les technologies, les procédés de fabrication ou les systèmes, le CEA développe des approches innovantes et spécifiques d'intégration qui apportent des fonctionnalités optiques nouvelles ou qui peuvent servir dans d'autres applications :

- par technique d'impression : le CEA-Liten conçoit des LED (*Light Emitting Diodes*) et capteurs imprimés utilisés, par exemple, dans l'affichage, en logistique (surveillance de stock, en partenariat avec la société Isorg)…
- par « dépôt de nanomatériaux » : en développant des matériaux spécifiques et traitements de surface, le CEA-Liten propose des procédés dotant une surface de propriétés optiques particulières (domaine de longueur d'ondes absorbées, ex : protections anti-UV).

CAPTEURS : ACQUÉRIR DE L'INFORMATION VIA LES PHOTONS

Les capteurs photoniques sont des systèmes qui traduisent l'information lumineuse (arrivée d'un flux de photons) en un signal électrique. Ils permettent l'observation et l'enregistrement de phénomènes lumineux, y compris ceux non directement observable à l'œil humain, car hors du spectre visible, ou trop peu intense. L'assemblage d'un grand nombre de capteurs (pixels) permet, via une optique, l'acquisition d'une image complète. Les recherches dans ce domaine portent sur l'amélioration de la qualité des images produites (taille des pixels et diminution du bruit d'obscurité), la finesse de détection des systèmes, la réduction des coûts, de l'encombrement et de la consommation énergétique des systèmes, et l'ajout de fonctionnalités (traitement automatique de l'image notamment).

Au CEA, les chercheurs et ingénieurs travaillent sur les capteurs d'images depuis la mise au point de matériaux photosensibles, jusqu'au dimensionnement complet des capteurs en intégrant de plus en plus les modules optiques de prise de vue.
L'objectif est d'aboutir à des produits fabricables à échelle industrielle, dans le cadre de partenariats avec les acteurs du secteur.

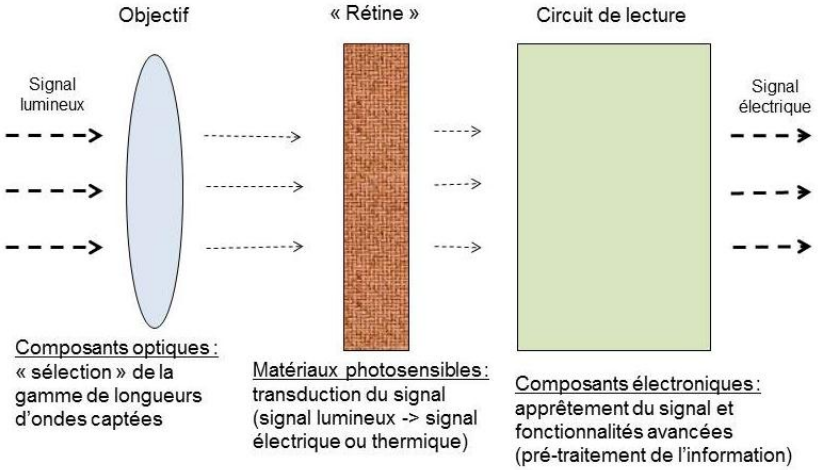


Figure 2 : Schéma des différents composants d'un détecteur © CEA

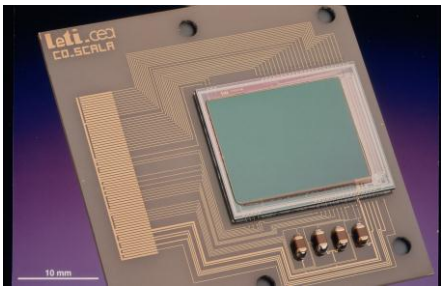


Photo : Mosaïque de détecteurs infrarouges © CEA

Principe général : un capteur d'image a une sensibilité limitée à une certaine gamme de longueurs d'onde. Précédé d'un objectif, qui permet d'imager la scène à observer, Il est composé :

- d'une « rétine » souvent arrangée en matrice 2D, composée d'un matériau photosensible assemblé en pixels, qui interagit avec la lumière : l'énergie des

photons collectés est alors convertie en signal électrique, de manière directe ou indirecte, par un transducteur ;

LES AXES DE R&D MENÉS AU CEA :

- la fabrication et l'intégration de nouveaux matériaux : optimisation de la croissance des lingots de tellure de cadmium (CdTe), investigation d'oxydes thermo-résistifs présentant des facteurs de bruit réduits… ;
- les phénomènes de transduction innovants ou au rendement amélioré : transformation du flux lumineux en variation de fréquence, transformation en chaleur optimisée (voir la technologie bolomètre en « imagerie infrarouge ») ;
- les empilements innovants ou optimisés de couches semi-conductrices : super-réseaux, diodes à avalanches en infrarouge refroidi, diodes à base de tellure de mercure-cadmium (HgCdTe) en visant un bruit minimum et un fonctionnement de la caméra à une température la plus élevée possible) ;
- les procédés de fabrication dans les filières microélectroniques impliquées : architecture des pixels pour en réduire le pas, techniques d'hybridation entre la rétine et le circuit de lecture.

- d'un circuit de lecture électronique permettant d'amplifier et de « mettre en forme » les signaux électroniques issus de chaque pixel.

LES AXES DE R&D MENÉS AU CEA :

- le voisinage proche du pixel : adapter le circuit de lecture au type de transducteur (les courants venant d'une diode ou d'un capteur thermique, par exemple, ne se lisent pas de la même manière) ;
- Les étages électroniques intermédiaires de la chaîne d'acquisition, en charge de filtrer, amplifier, convertir le signal analogique en signal numérique, permettant de multiplexer les signaux lus au niveau des différents pixels de la matrice ;
- le gain de fonctionnalité : intégrer de plus en plus de fonctions avancées dans ce circuit de lecture (grâce à la réduction de la taille des transistors, exemple : extraction automatique des silhouettes d'éléments mobiles de la scène imagée).

Les grands domaines spectraux

La détection des rayonnements de haute énergie (γ et X) : Les rayonnements très énergétiques permettent de sonder la matière en profondeur. Le CEA développe de nouveaux capteurs pour ce domaine de longueur d'onde, avec des détecteurs semi-conducteurs associés à une électronique CMOS[4], qui permettent une détection plus fine, et un rendu d'image amélioré. La sensibilité des capteurs permet de réduire la dose de rayonnement pour l'imagerie médicale par exemple (radiologie, scanner X, PETscan, Scintigraphie, radiographie dentaire), ou encore par une amélioration du traitement du signal, et d'une réduction des fausses alarmes, dans la détection d'explosifs dans les bagages (ce qui permettra d'autoriser à nouveau le franchissement des contrôles aux aéroports avec des liquides).

[4] *Complementary Metal Oxide Semiconductor*

L'imagerie dans le visible : Les capteurs visibles constituent un marché ultra-concurrentiel. Le CEA met au point des briques technologiques spécifiques à intégrer dans les puces imageurs que ST-Microelectronics développe pour les caméras, les téléphones ou pour l'industrie automobile. Les chercheurs et ingénieurs travaillent ainsi à l'intégration de composants multiéléments (microlentilles, filtres de couleur, imageur en mode « *global shutter* »[5]…) ou au développement de conceptions innovantes (empilement 3D des composants, illumination par face arrière). La production industrialisée peut être réalisée sur des plaques de silicium de 200 ou 300 mm, pour une bonne maitrise des coûts de fabrication. Le CEA développe également des capteurs « temps-de-vol »[6] pour l'imagerie 3D. Bien que n'ayant pas de procédé CMOS imageur complet dans son portfolio de technologies, le CEA possède un savoir-faire reconnu pour le développement d'un tel procédé à partir d'une technologie existante dans une fonderie industrielle.

L'imagerie proche infrarouge : La lumière proche infrarouge a la particularité de traverser les tissus biologiques tout en diffusant la lumière (exemple de la lumière rouge d'une lampe de poche traversant la main). Les chercheurs et ingénieurs du CEA-Leti ont participé au développement d'instruments permettant de localiser les tumeurs lors d'interventions chirurgicales ou pour l'aide à la ponction. Cette technologie est également utilisée dans la mise au point de médicaments pour localiser des tumeurs chez des modèles animaux ou pour suivre l'évolution d'un produit actif dans la peau (notamment avec les produits cosmétiques), ainsi que la mesure d'oxygénation des lambeaux de peau lors de chirurgie réparatrice.

L'imagerie infrarouge : Tout corps émet un rayonnement dont le spectre est fonction de sa température. Il est ainsi possible de visualiser aisément par contraste un corps plus chaud que son environnement, à température ambiante, dans le domaine infrarouge. Le CEA développe plusieurs technologies de capteurs infrarouges :

- Capteur infrarouge « refroidi » : cette technologie basée sur des photodiodes nécessite un refroidissement du détecteur à des températures comprises entre - 200°C et - 70°C (selon la bande spectrale visée). Le CEA développe une technologie infrarouge refroidie à base de tellurure de mercure-cadmium (CdHgTe, matériau qui permet de fabriquer des détecteurs sur une large gamme spectrale, en adaptant la proportion de cadmium et de mercure). Cette recherche est menée dans le cadre d'un laboratoire commun avec la société Sofradir (leader mondial sur cette technologie et 2e mondial toutes technologies « refroidies » confondues), pour des applications en défense, sécurité et observation spatiale.

[5] « *global shutter* » : l'image est instantanément prise dans son intégralité, en opposition au terrme « rolling shutter », où l'image est prise sur un temps plus long (le haut et le bas de l'image sont donc pris à des instants différents, pouvant entraîné une déformation).
[6] Capteurs mesurant le « temps-de-vol » des photons, soit le temps mis par les photons produits par un flash pour se réfléchir sur une surface et revenir sur le capteur, ce qui permet d'imager les distances et profondeurs.

- Capteur infrarouge « non refroidi » : le CEA travaille sur la technologie dominante, les bolomètres, qui traduisent les rayonnements reçus sous forme de chaleur, avant de les convertir en signal électrique. Les travaux s'orientent plus particulièrement sur leur miniaturisation et leur démocratisation pour des usages grand public (sécurité : conduite de nuit, détection de fuite de gaz… ; économie d'énergie : détection de présence humaine pour l'éclairage ou le chauffage ; santé : surveillance des hospitalisations à domicile, auto-diagnostic, robotique…). Ces travaux font l'objet de partenariat avec Ulis, né des activités du CEA-Leti.

L'imagerie infrarouge lointain ou térahertz : Initialement développée pour l'astrophysique[7], la détection de ces rayonnements est difficile car ils sont très peu énergétiques. Pour l'observatoire spatial *Herschel*, les chercheurs et ingénieurs du CEA-Leti et du CEA-Irfu[8] ont conçu et développé une matrice 2D basée sur des micro-bolomètres, dont l'architecture permet de les intégrer aux technologies silicium. Ce principe de détection permet également d'identifier par spectroscopie les molécules émettrices. Le CEA-Leti a ainsi mis au point une technologie de détection dérivée dans la gamme térahertz, et réalisé un prototype de scanner corporel à imagerie en temps réel couplée à de l'analyse spectroscopique de produits cachés.

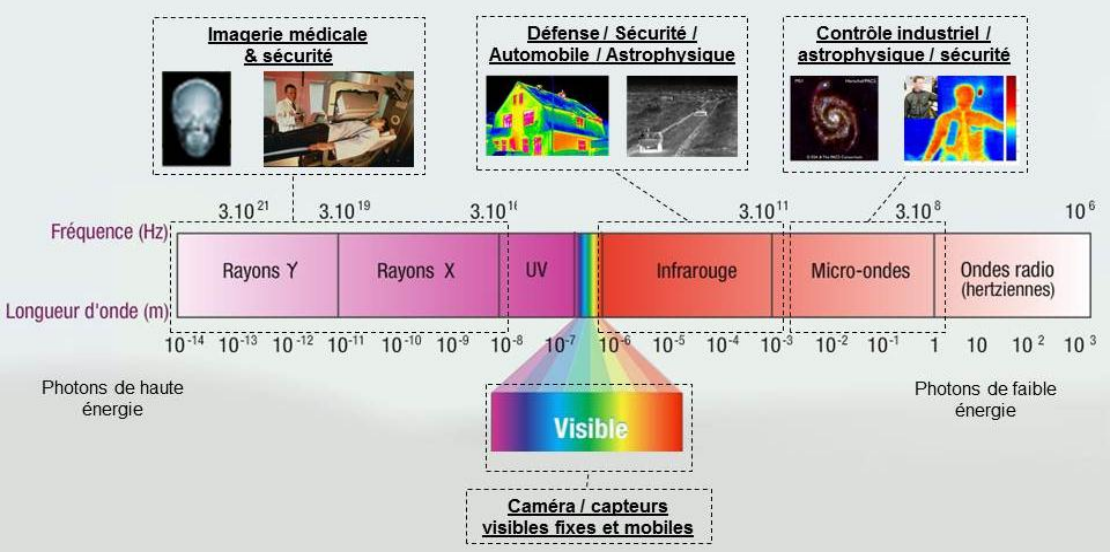


Figure 3 : Applications selon la gamme de longueur d'onde opératoire des capteurs © C.Beurtey/CEA/DR

[7] Plus de la moitié des photons émis depuis le Big Bang se situent dans cette région spectrale.
[8] Irfu : Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'univers (DSM/Saclay)

TRANSMETTEURS : DES SYSTÈMES DE COMMUNICATION

Pour faire face à l'explosion du trafic de l'information (+ 50 % par an), les transmetteurs photoniques s'imposent de plus en plus avec le développement des liaisons en fibre optique, qui a débuté dans les années 1970. Ces solutions se généralisent, intégrant aujourd'hui les supercalculateurs et les centres de données (*data center*), elles équiperont demain tous les appareils électroniques. Les propriétés physiques du photon permettent de concevoir des systèmes qui répondent en effet à chacun des défis posés par la modernisation de la circulation de l'information : quantité et rapidité d'informations, diminution des coûts et de la consommation d'énergie...

Les chercheurs et ingénieurs du CEA-Leti travaillent sur les procédés de fabrication de « circuits photoniques », combinant le savoir-faire acquis et les coûts maîtrisés de la filière microélectronique avec la performance des systèmes optiques. On parle de photonique sur silicium.

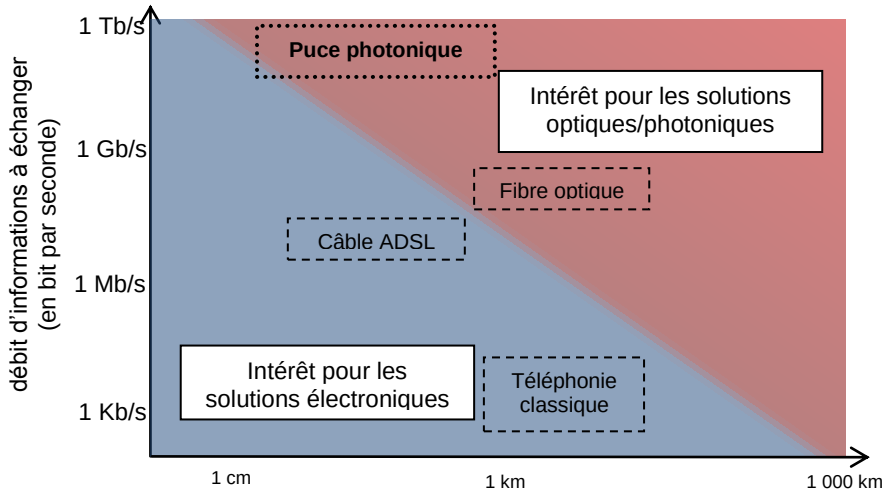


Figure 4 : Domaines d'intérêt pour les solutions photoniques ou électroniques © CEA

Principe général : le signal électrique est transformé en signal lumineux par une source laser intégrée à une puce silicium. Le silicium est gravé pour faire office de guide d'onde ou de fibre optique en remplacement des liaisons électriques, ce qui permet un gain spectaculaire en termes de bande passante, de consommation énergétique et de densité.

Les enjeux de la recherche pour la photonique sur silicium

Pour chacun des éléments constituant les puces photoniques, les chercheurs et ingénieurs du CEA-Leti, avec les chercheurs d'autres instituts, conçoivent des designs innovants pour en augmenter la performance. Ces études s'accompagnent de travaux sur les procédés de fabrication, afin d'optimiser le rapport coût/performance d'un produit fini, industrialisable et compétitif.

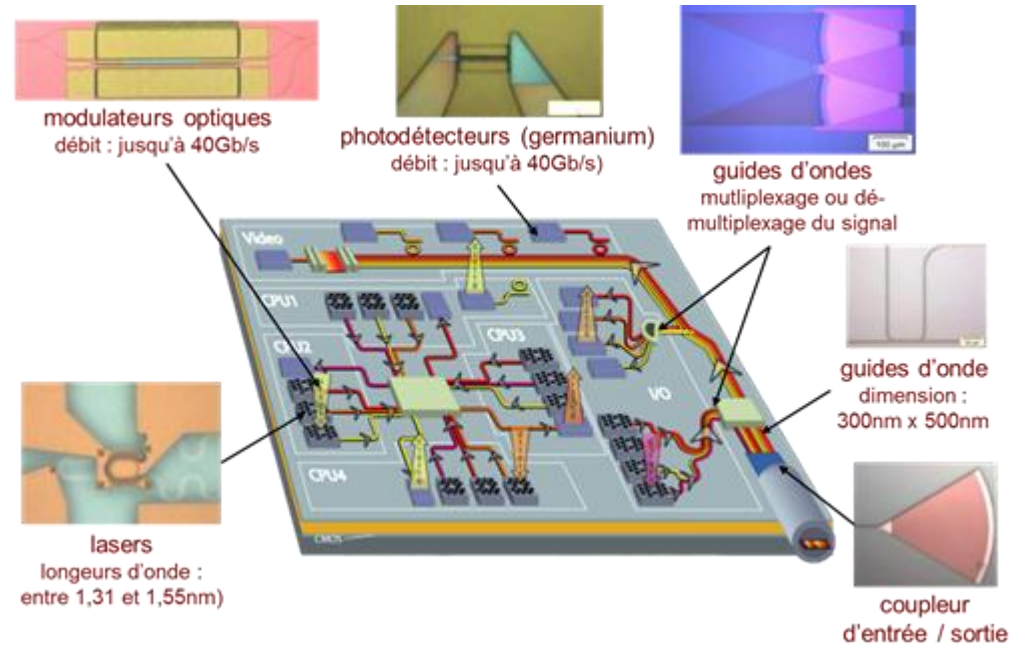


Figure 5 : Composition d'une « puce photonique » (© CEA)

Les coupleurs entrée/sortie, interfaces entre la fibre optique et le circuit photonique, permettent d'adapter les dimensions du faisceau lumineux au transmetteur qu'il traverse. Enjeu : diminuer la perte de signal (pouvant atteindre 50 %).

Les lasers génèrent le flux de photons qui « transporte » l'information (conversion électron → photon). Les travaux menés au CEA-Leti concernent les techniques de collage des lasers, et sont complétés avec des recherches plus exploratoires menées en partenariat avec l'Inac[9] sur la fabrication d'un émetteur laser à base de germanium « contraint » ou « déformé »[10], complètement intégrable dans une technologie silicium.

Les modulateurs, interrupteurs lumineux, « encodent » l'information dans le signal des lasers, par un système d'ouverture/fermeture, reconstituant un signal binaire.

➔ *Enjeu : diminuer la consommation énergétique de ces éléments.*

Les photodétecteurs reçoivent le signal lumineux et reproduisent les informations en signal électrique (conversion photon → électron).

➔ *Enjeu : améliorer leur sensibilité pour détecter des signaux plus fins, et augmenter leur bande passante.*

Les guides d'onde, équivalents des pistes en cuivre des circuits électroniques, déterminent le chemin que doit suivre le signal lumineux.

➔ *Enjeu : diminution des pertes d'information (quelques pourcents par millimètre).*

[9] Inac : Institut nanoscience et cryogénie, unité de recherche CEA/Université Joseph Fourier à Grenoble
[10] Le germanium est travaillé en structure nano ou micro-filaire, puis « étiré » pour gagner 2 % en taille et faire ainsi émerger de nouvelles propriétés physiques.

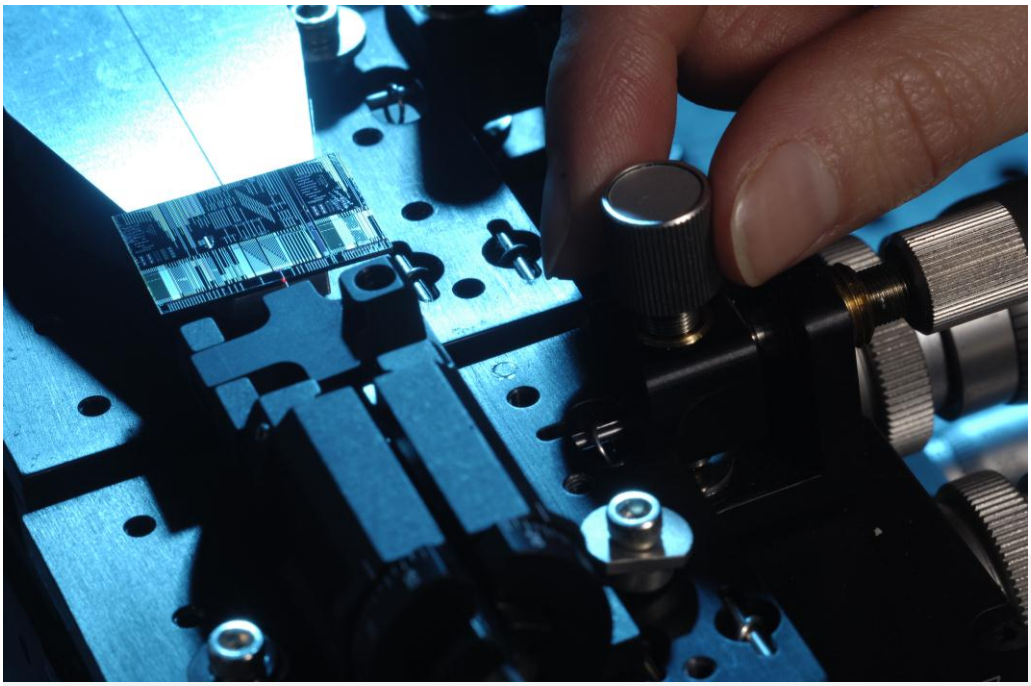


Photo : Alignement d'une fibre optique sur un circuit intégré en technologie photonique silicium
© P.Stroppa/CEA

1990-2000 : âge d'or des solutions photoniques pour le stockage d'information

Outre la fibre optique, la photonique a également déjà servi à optimiser les solutions de stockage d'information, avec l'avènement des CD, DVD et Blu-Ray. Offrant une possibilité de stockage étendue et une meilleure tenue des informations, les chercheurs et ingénieurs du CEA-Leti avaient travaillé sur les solutions de CD et DVD réinscriptibles, en travaillant sur la structure des disques, les matériaux et les technologies de dépôt, pour produire des « points mémoires » plus petits, et ainsi augmenter les résolutions et capacités mémoires de ces supports.

Ces objets sont aujourd'hui en passe d'être supplantés par le stockage dématérialisé (stockage magnétique, distant et dispersé), qui profite aussi des améliorations offertes par les technologies photoniques (fibre optique).

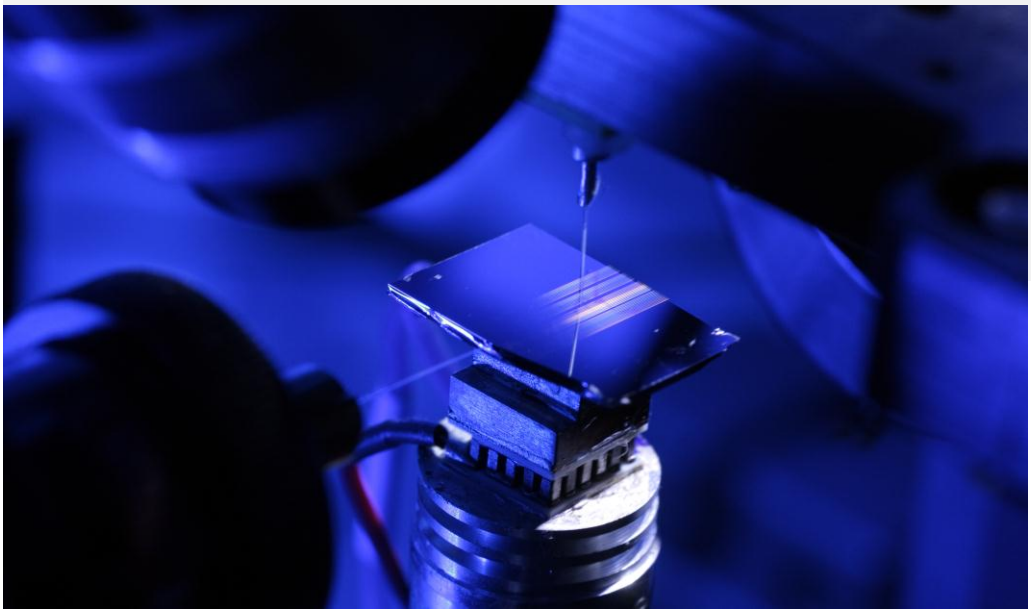


Photo : Spectroscopie d'émission de microcavités à une échelle sub-longueur d'onde par microscopie optique en sonde locale
© P.Avavian/CEA

ÉCRANS : LES SYSTÈMES PHOTONIQUES D'AFFICHAGE

Les technologies d'affichages ont récemment connu deux changements profonds : l'explosion de leurs usages dans notre quotidien (ordinateur, tablette, téléphone portable …) et la disparition des écrans à tube cathodique. Cette révolution se poursuit et la recherche vise à faire émerger de nouveaux écrans toujours mieux adaptés aux évolutions de leurs utilisations (notamment dans le domaine des micro-écrans), avec un rapport performance / coût du système optimisé.

Les chercheurs et ingénieurs du CEA travaillent sur les matériaux et les technologies d'écrans et conçoivent des systèmes de visualisation innovants adaptés aux nouvelles applications dans la sécurité, les objets nomades et les transports. Les recherches menées plus particulièrement sur les micro-écrans au CEA-Leti ont déjà fait l'objet d'une cinquantaine de brevets, en collaboration avec des acteurs industriels leaders ou émergents du secteur.

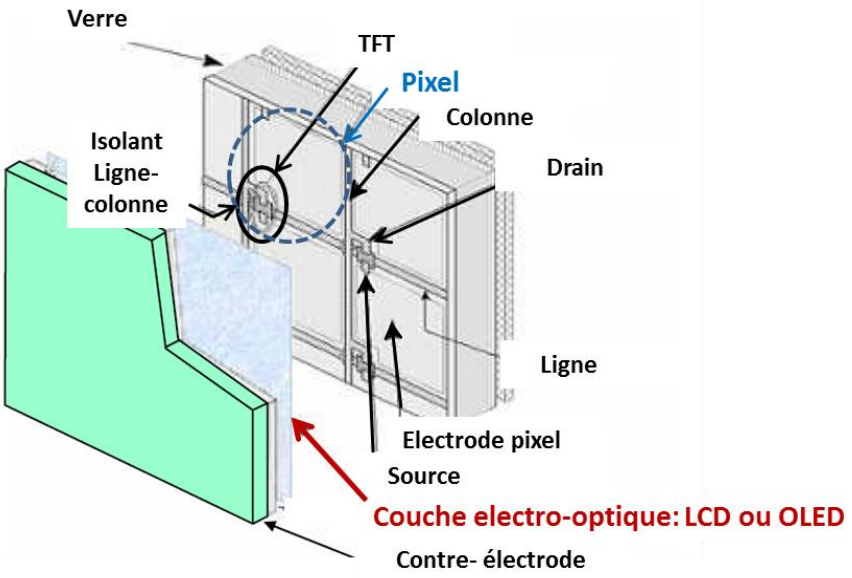


Figure 6 : Structure d'un écran à matrice active LCD ou OLED © CEA

Principe général : On appelle plus globalement « système de visualisation » les technologies d'affichages composées d'un écran et de composants optiques spécifiques, architecturés selon les utilisations souhaitées de l'image. Tout écran est composé…

… d'une matrice active : les composants en couches minces[11] qui la constituent produisent les signaux électriques destinés aux pixels, éléments constitutifs de l'image et déterminant ainsi ses caractéristiques principales (résolution, espacement des pixels, etc.). Aujourd'hui, pour les écrans classiques, la matrice active est à base de silicium amorphe ou polycristallin, déposé sur des plaques de verre (TFT, pour

[11] Quelques dizaines de nanomètres

Thin Film Transistor). Pour les micro-écrans, la matrice active utilisée est un circuit intégré CMOS[12].

LES AXES DE R&D MENÉS AU CEA :

- la matrice active TFT sur verre : évaluer un nouveau semi-conducteur, l'IGZO (indium-galium-zinc-oxide), pour remplacer le silicium en couche mince dans les matrices TFT du futur et développer un système plus performant (ultra-haute définition des télévisions OLED et LCD).
- la matrice active pour micro-écrans : adapter la technologie du circuit intégré pour augmenter la qualité d'image des micro-écrans et leur apporter de nouvelles fonctionnalités et de nouveaux usages. exemple : réalisation d'une matrice active CMOS transparente, où du verre remplace le silicium, pour réaliser un micro-écran LCD transmissif exploitable dans des pico-projecteurs (applications nomades).

… d'une partie électro-optique (LED[13] ou LCD) : il s'agit de l'interface qui va convertir en signal optique l'information générée sur la matrice et ainsi générer l'image. Les principales technologies sont LCD (*Liquid Crystal Display*), et LED – organique (OLED) ou inorganique. Les écrans LCD nécessitent une source de lumière externe, tandis que, dans les systèmes LED, chaque pixel est une micro-source de lumière (diode rouge, verte ou bleue). Cette différence fait du LCD la solution préférentielle pour les écrans standards, et l'OLED et LED pour les objets nomades et micro-écrans.

LES AXES DE R&D MENÉS AU CEA :

- développer les techniques de dépôt d'OLED sur des circuits intégrés pour micro-écrans, en collaboration notamment avec la société Microoled (start-up issue du CEA-Leti, qui a développé des micro-écrans pour des lunettes vidéo et des viseurs d'appareil photo haut de gamme).
- adapter la partie électrooptique aux matrices actives développées (exemple : mise au point d'un cristal liquide spécifique pour le picoprojecteur LCD transmissif déjà évoqué).
- développer de nouveaux types d'écrans émissifs à très haute luminance, à base de GaN (nitrure de galium, qui assure une meilleure émission de la lumière). Cette technologie, baptisée « µLED », pourra être utilisée dans des applications de type « lunette à réalité augmentée » (que le laboratoire développe avec d'autres partenaires - projet Carnot), ou d'autres applications nomades et professionnelles.

Ces écrans sont intégrés dans un système de visualisation global : en ajoutant des composants optiques pour le traitement de l'image (loupe, projecteurs, lentilles…), l'écran peut être adapté à différents usages : affichage « proche de l'œil », projection, etc.

[12] *Complementary Metal Oxide Semiconductor*
[13] *Light-Emitting Diode*

LES AXES DE R&D MENÉS AU CEA :

- concevoir des systèmes de visualisation innovants : systèmes « *see-through* » (« voir à travers ») à grand champ de vision pour lunettes informatives, ou système de projecteur haute luminance pour automobile et parebrise intelligent…
- optimiser les composants optiques : la réalisation de tels systèmes nécessite la conception de composants optiques spécifiques – films holographiques, microlentilles, lentilles « *freeform* » (forme de la lentille non contrainte, permettant de compacter les systèmes et d'imaginer de nouvelles fonctionnalités).

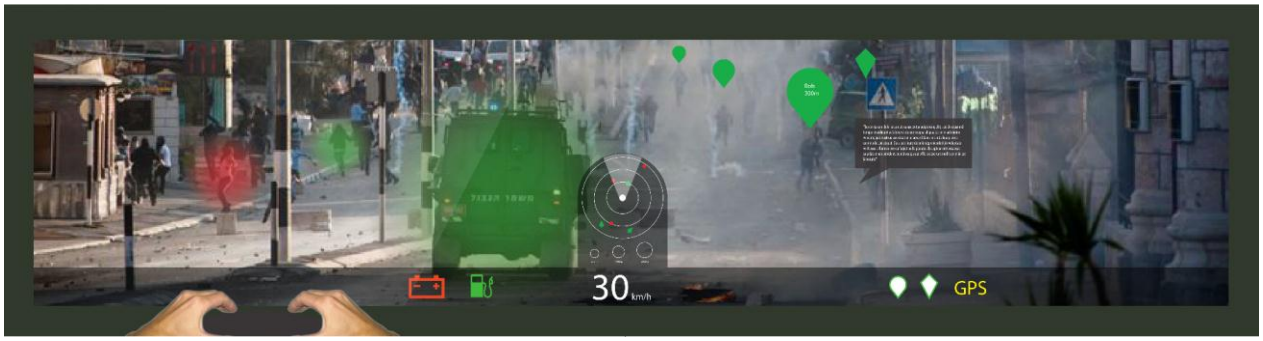
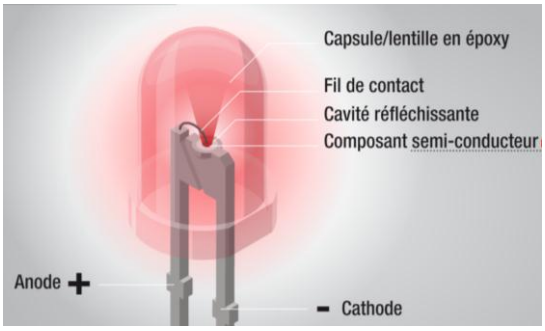


Figure 7 : Illustration de l'intégration de fonctionnalités de traitements d'image apportées à un écran. © CEA

ÉCLAIRAGE : LES LED

Depuis une quinzaine d'années, les LED blanches (*Light-Emitting-Diode*) connaissent un essor particulièrement important dans le domaine de l'éclairage, du fait de leur efficacité lumineuse très élevée[14], mais aussi de leur fiabilité, une capacité inédite de modulation, et des dimensions extrêmement faibles. Elles apportent aussi de nouvelles fonctionnalités à la lumière émise, comme la capacité de communiquer et constituent par conséquent une rupture technologique profonde.

Au CEA, Les chercheurs et ingénieurs du CEA travaillent sur l'ensemble de la chaîne de valeur de l'éclairage à LED. Ils ont, en particulier, développé à Grenoble une nouvelle technologie de LED dites « à nanofils »[15] (fig.9). Ces travaux se sont ensuite étendus vers le composant LED, incluant toutes les étapes du packaging[16] : extraction de la lumière produite, gestion thermique, conversion de couleur, puis le luminaire, enfin le système d'éclairage complet avec les notions émergentes de « *Smart Lighting* ».



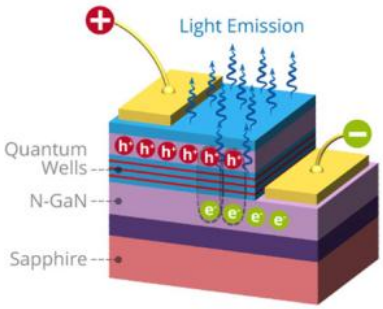


Figure 8 : Schémas typique d'une LED © CEA

Principe général : une LED émet de la lumière grâce à la recombinaison d'électrons et de « trous » dans le matériau semi-conducteur qui la constitue, produisant des photons (les meilleures LED bleues convertissent en lumière environ 55 % de l'énergie fournie, soit dix fois plus qu'un système à incandescence). Une LED émet de la lumière sur un spectre étroit (quelques centaines de nanomètres), donc une couleur saturée. Pour produire une lumière blanche, on utilise des LED bleues dont on convertit une partie de la lumière en d'autres couleurs grâce à des luminophores produisant ainsi de la lumière blanche.

Pour aller plus loin et comprendre comment fonctionne une LED : voir l'animation consacrée sur le site du CEA, rubrique jeunes / médiathèque

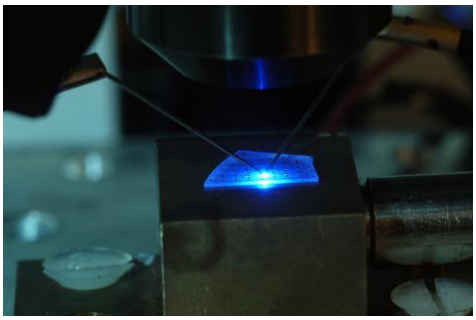


Photo : Caractérisation d'une LED bleue à base de GaN. © P.Stroppa/CEA

[14] L'efficacité lumineuse des meilleures LED blanches atteint désormais 10 fois celle des lampes à incandescence et continue à croître.
[15] Voir « les enjeux de la recherche photonique pour les systèmes LED », p.19
[16] Packaging : ensemble des opérations de mise en boitier des puces LED permettant sa mise en œuvre comme tout autre composant électronique.

Les enjeux de la recherche photonique pour les systèmes LED

Deux problèmes fondamentaux majeurs, intervenant dans le rendement des LED, font toujours l'objet de travaux intensifs dans les laboratoires de recherches :

- La chute sévère du rendement de conversion (« *droop efficiency* ») de l'énergie électrique en énergie lumineuse lorsque la densité de courant dans la LED augmente (inconvénient majeur pour l'éclairage exigeant des courants élevés). Les thèses s'affrontent encore sur l'origine du phénomène, et surtout les laboratoires de R&D s'évertuent à lui trouver des parades ;
- Le « déficit de vert » « (« *Green Gap* »), qui traduit l'absence de matériaux semi-conducteurs capables de produire directement de la lumière verte avec un bon rendement de conversion. L'origine du phénomène est connue (effet Stark confiné quantique - ESCQ), liée à l'axe piézoélectrique du nitrure de gallium (GaN). Plusieurs solutions sont à l'étude pour s'en affranchir. L'une des technologies développées au CEA pourrait résoudre ces deux problèmes : il s'agit des LED à nanofil.
    - ➔ Par leurs structures, elles permettent - sur une même surface de puce et à flux constant - d'augmenter la surface d'émission et donc de diminuer la densité de courant et ainsi limiter l'effet du *droop* (fig.10).
    - ➔ De plus, les surfaces émettrices de ces diodes sont orthogonales à l'axe piézoélectrique du GaN, ce qui est la clé pour supprimer l'ESCQ et permettre ainsi le développement de LED vertes.
    - ➔ Les LED à nanofil en nitrure de gallium sont l'enjeu du transfert de technologie opéré par le CEA-Leti, avec le soutien de l'Inac et au profit de la start-up Aledia, fondée en 2011, dont un conseiller scientifique est Hiroshi Amano, un des trois chercheurs lauréats du prix Nobel 2014 de physique.

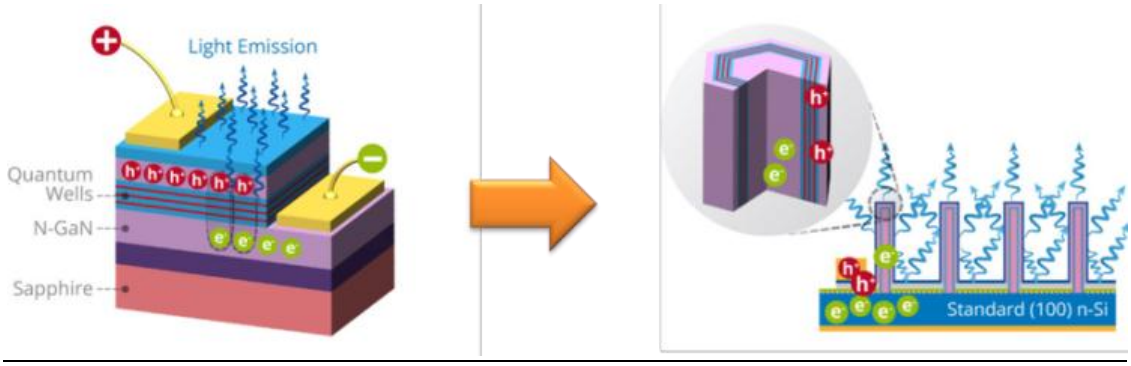


Figure 9 : illustration d'un système LED à nanofil © CEA

La conversion de couleur se fait grâce à des luminophores déposés de différentes manières sur ou à proximité de la LED bleue. Ils sont toujours l'objet d'études pour améliorer leur rendement de conversion, la stabilité spectrale de la lumière émise et leur durée de vie. D'autres travaux de recherche, menés au CEA-Liten, se focalisent

sur le développement de « nanoluminophores » : les chercheurs utilisent des semi-conducteurs nanométriques (7 nm) pour interagir spécifiquement avec la lumière incidente. Le CEA-Liten a développé des nano-objets originaux et performants, qui, combinés à des métaux plasmoniques, permettraient de concevoir des « structures nanophotoniques » (cf. « La nanophotonique : la lumière à l'échelle du nanomètre ou du photon unique» p.30).

La gestion thermique est essentielle à la durée de vie des luminaires à LED, l'énergie non convertie en lumière est dissipée par conduction, puis convection. Au niveau des LED, la densité thermique peut atteindre plusieurs centaines de W/cm². Le CEA étudie des architectures et des matériaux pour permettre une meilleure évacuation de la chaleur produite. Le projet Novalamp, mené en partenariat avec la société Novaday, a notamment permis de développer la preuve de concept d'un refroidissement à l'aide d'un caloduc pulsé, qui pourrait équiper des luminaires extra plats à bas coût, capables de fonctionner dans toutes les inclinaisons en convection naturelle. Ce travail a fait l'objet d'un dépôt de brevet en co-propriété entre le CEA et Novaday.

Les systèmes d'éclairage évoluent également continuellement. L'intégration de nouvelles fonctionnalités permet d'augmenter leurs performances et de développer des systèmes plus intelligents. Les ingénieurs travaillent ainsi à l'intégration de capteurs, de moyens et de protocoles de communication au sein des luminaires afin de les doter d'une relative autonomie (mise en réseau, auto-configuration, interfaçage avec le bâtiment…). Ces travaux permettront aux industriels de proposer des luminaires innovants capables de réguler leur propre éclairage (*Smart Lighting*). À travers l'institut de recherche technologique Nanoelec, le CEA-Leti travaille par ailleurs avec Schneider Electric, Bouygues et Cofely Ineo sur des systèmes d'éclairage intelligents urbains ou pour le bâtiment.

La dernière étape consiste à rajouter *la couche communication* sur le faisceau de lumière lui-même, il s'agit du LiFi (*Light Fidelity*) ou VLC (*Visible Light Communication*). Le CEA-Leti a développé des systèmes LED performants permettant la transmission d'informations (vidéo HD, GPS en milieu fermé…). En utilisant les mêmes méthodes que le WiFi[17] pour les ondes radios, il est possible d'obtenir des débits atteignant 15 Mbps (mégabit par seconde), technologie à l'étude avec Luciom pour proposer un modem d'accès internet utilisant le LiFi.

[17] *Wireless Fidelity*

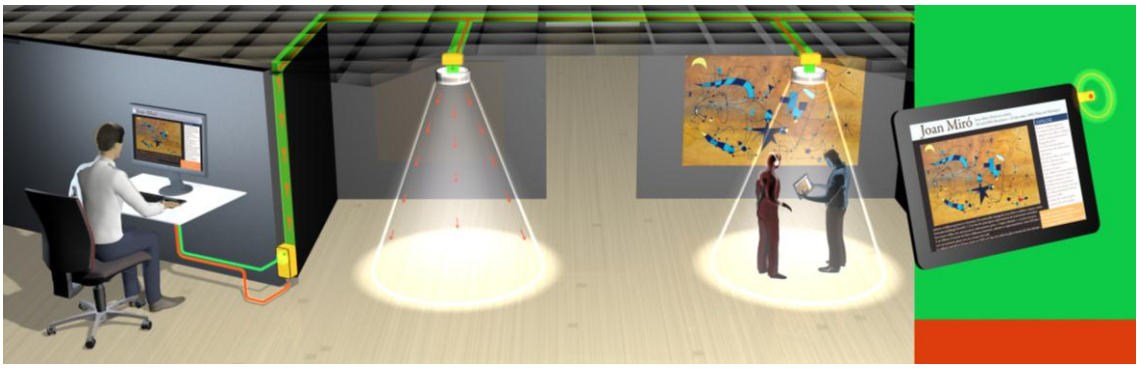


Figure 10 : illustration tirée des Défis du CEA *« Tout s'explique : le Lifi » © Fabrice Mathé/Amélie Lorec*

LES RECHERCHES ALTERNATIVES POUR CONCEVOIR ET ÉVALUER LES TECHNOLOGIES DU FUTUR

Les ingénieurs et chercheurs de l'Institut nanoscience et cryogénie (Inac) travaillent sur le développement de LED efficaces dans l'ultraviolet, qui ouvrirait des perspectives d'application importantes, telles que le remplacement des lampes à mercures, énergivores et utilisées pour la purification de l'eau ou la stérilisation de matériels en biologie. En collaboration avec la compagnie Newstep et des partenaires académiques*, l'Inac explore des solutions originales pour ces « LED ultraviolettes » à base de nitrure d'aluminium, matériau permettant d'émettre des rayonnements dans une gamme d'ultraviolets aux propriétés bactéricides.

Les ingénieurs-chercheurs de l'Institut rayonnement matière de Saclay (CEA-Saclay, DSM/Iramis) développent depuis de nombreuses années la technologie OLEDs (LED à base de matériaux organiques), avec l'objectif de proposer des sources de lumière plus efficaces et moins onéreuses, en étudiant d'une part de nouveaux matériaux organiques en collaboration avec de nombreux partenaires chimistes, et d'autre part en recherchant de nouvelles architectures de diodes utilisant des mises en œuvre bas-coûts comme l'impression.

** L'Institut Lumière Matière de Lyon (CNRS/Université Claude Bernard) et l'Institut Néel (CNRS/Université Joseph Fourier), Ces travaux ont bénéficié du soutien de l'Agence nationale de la recherche dans le cadre de son programme Nanotechnologies et Nanosystèmes*

ÉNERGIE : GÉNÉRER DE L'ÉLECTRICITÉ AVEC DES PHOTONS

Les recherches en photonique représente un axe d'innovation essentiel pour les technologiques solaires photovoltaïques. Celles-ci génèrent un courant électrique à partir des photons reçus de l'ensoleillement (conversion de l'énergie des photons en signal électrique et chaleur). La recherche vise à développer des systèmes capables de produire plus d'énergie, de manière toujours plus économique et ceci pour tous les types d'ensoleillement (direct, diffus ou concentré).

Les chercheurs et ingénieurs du CEA-Liten développent tout un ensemble de dispositifs photoniques pour optimiser ces systèmes énergétiques, que ce soit d'un point de vue coût / performance, intégration ou applications. Les recherches sont menées sur les matériaux et les procédés qui vont permettre de convertir le photon en excitation électronique, sur l'optique qui permet de confiner ou de concentrer les rayons du soleil, ou sur l'ensemble du système photovoltaïque.

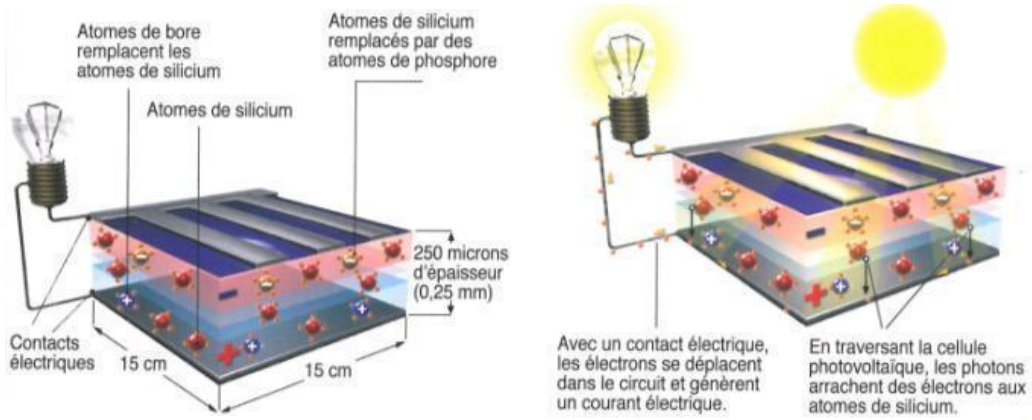


Figure 11 : illustration du principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque © CEA

Photo : Panneaux photovoltaïques en silicium polycristallin (à gauche) et monocristallin (à droite), deux technologies aux performances et coûts de production différents © C.Dupont/CEA

Principe général : un panneau photovoltaïque est constitué principalement d'un matériau semi-conducteur – couramment du silicium – dopé de façon à absorber les photons appartenant au spectre du visible, et à les convertir en courant électrique. C'est « l'effet photoélectrique ». Tout système photovoltaïque est donc constitué :

- d'une partie optique, dont le but est de collecter la plus grande part du rayonnement possible.

LES AXES DE R&D MENÉS AU CEA

- le confinement optique : élaborer des traitements de surface (antireflets, autonettoyante…) et texturation (jusqu'à la nano-architecture) des surfaces des cellules, pour favoriser l'interaction entre la cellule et le rayonnement solaire.
- la conversion spectrale optique « up & down » : élaborer des composants optiques capables de convertir une partie des rayonnements optiques reçus pour les rendre « compatibles » avec la cellule photovoltaïque développée.
- les optiques de « concentration » : concevoir des systèmes optiques (lentilles) permettant de concentrer l'énergie lumineuse et développer des cellules à haut rendement.
- la durée de vie : allonger la durée d'exploitation de la surface (actuellement : 20-25 ans), en permettant un maintien de la transparence, de l'étanchéité etc. des optiques dans le temps.
- l'encapsulation : adapter les systèmes à de plus en plus d'applications en développant des packagings spécifiques, assurant un maximum de transparence aux rayonnements.

- d'un matériau « convertisseur » de l'énergie solaire : très souvent à base de silicium, semi-conducteur performant et peu cher. Il existe néanmoins différentes approches dans la constitution du matériau de la cellule photovoltaïque – possibilité d'empiler différents matériaux pour optimiser les performances de la cellule aux utilisations que l'on souhaite en faire.

LES AXES DE R&D MENÉS AU CEA

- le silicium cristallin, qui peut être « mono », « quasi-mono » ou « poly » cristallin (intervenant sur la performance et la fabrication des cellules).
- les cellules à hétérojonction : étudier des combinaisons de matériaux photosensibles permettant d'atteindre de meilleurs rendements énergétiques (généralement basée sur du silicium monocristallin + silicium amorphe).
- les cellules « à couche mince » : optimiser des matériaux photosensibles utilisables en petite quantité, ainsi que les procédés de dépôts (exemple : jet d'encre) et des architectures innovantes pour favoriser l'intégration des cellules photovoltaïques (textiles…) ;
- les cellules solaires organiques : développer des matériaux polymères ou à base de molécules organiques pour diminuer le coût de production des panneaux et fabriquer des panneaux souples ou transparents et plus esthétiques ;
- les cellules à concentration : concevoir des cellules haut de gamme à haut rendement de conversion d'énergie lumineuse (supérieur à 40 %, contre 20 % pour le silicium cristallin actuel).

Photo : Cellule solaire Souple © C.Dupont/CEA

Au-delà de la conception de systèmes photovoltaïques plus performants, les chercheurs et ingénieurs du CEA-Liten travaillent sur leur intégration dans le bâtiment et le réseau électrique, leur intégration dans les transports (parking, route), ou dans les tissus et objets nomades.

Photo : Modules photovoltaïques à concentration (à gauche) et à couches minces (à droites) © P.Avavian/CEA

LES RECHERCHES ALTERNATIVES POUR CONCEVOIR ET ÉVALUER LES TECHNOLOGIES DU FUTUR

Au-delà des travaux menés au CEA-Liten, d'autres instituts du CEA travaillent, en parallèle, sur la conception de matériaux nouveaux pour le photovoltaïque

À l'Inac, les scientifiques explorent des solutions basées sur des matériaux innovants : cellules photosensibilisées par un colorant organique ; cellules hybrides exploitant une couche mince de nanocristaux semiconducteurs ou de composé pérovskites (travaux menés en collaboration avec le CNRS et l'Université Joseph Fourier)…

Au CEA-Iramis, plusieurs équipes travaillent également sur la conception de matériaux nouveaux, permettant de proposer des solutions technologiques innovantes : ils cherchent en particulier à maitriser la fabrication de couches minces diélectriques, intégrant des nano grains (type Si) ou des agrégats (terres rares). La modélisation de dispositifs basés sur ces couches oriente les recherches vers de nouveaux concepts dans le domaine du photovoltaïque ou de la plasmonique.

D'autres travaux, menés depuis quatre ans, portent sur la croissance de films minces d'oxydes pour élaborer des matériaux modèles capables de convertir l'énergie solaire en hydrogène par photocatalyse. Récemment il a pu être montré que l'on pouvait améliorer nettement le rendement des électrodes de tels systèmes, à base d'hématite (oxyde de fer), par dopage avec du titane.

LUMIÈRE EXTRÊME ET RECHERCHE FONDAMENTALE

Afin de sonder les propriétés de la matière au moyen de la lumière et des grands lasers, les chercheurs et les ingénieurs du CEA se mobilisent pour concevoir et réaliser avec leurs partenaires des équipements de pointe permettant des avancées scientifiques majeures.

La Direction des applications militaires (CEA-DAM) coordonne la réalisation et l'exploitation du Laser Mégajoule (LMJ), mis en service en octobre 2014 au CEA-Cesta[18], avec pour objectif la compréhension et la maitrise des phénomènes physiques en jeu dans le déclenchement d'une arme nucléaire, pour les besoins de la Défense nationale. L'installation sera, par ailleurs, ouverte à la recherche scientifique à hauteur de 20 %, à partir de 2017 avec la mise en service de la ligne Petal.

L'Inac possède un savoir-faire unique au développement de cibles cryogéniques et de systèmes de refroidissement pour les grands lasers.

À travers ses instituts Irfu[19], Inac et Iramis[20], le CEA est partie prenante de ces recherches aux côtés de ses partenaires académiques (CNRS, grandes écoles, universités). Il p exploite, au CEA-Iramis, plusieurs installations lasers remarquables. Ces recherches ont des retombées dans le domaine des TIC et en métrologie.

Le CEA est également impliqué dans des recherches de pointe pour élaborer, synthétiser et caractériser des nano-objets, prédire leurs propriétés afin de manipuler la lumière à l'échelle du photon unique (optique quantique) ou du nanomètre (plasmonique). Les principaux enjeux de la nanophotonique sont de réduire la consommation des composants sur silicium, liée aux petites tailles de gravure, et d'améliorer significativement leurs performances.

LASERS ET LUMIÈRE EXTRÊME

Les grands lasers sont devenus des outils incontournables au service de la recherche. Ils permettent de porter et de sonder la matière dans des états extrêmes, où émergent de nouveaux phénomènes physiques. Pour développer ces instruments, les scientifiques conduisent une R&D de pointe dans le domaine des matériaux, de l'optique de haute précision, et des composants, en collaboration étroite avec les industriels fabriquant ces dispositifs.

Les grands lasers se rassemblent en trois grandes familles :

- Les lasers de haute densité d'énergie (HDE), produisant des impulsions de grande énergie (supérieures au kilojoule) et de longue durée (de la pico à la

[18] Cesta : Centre d'études scientifiques et techniques d'Aquitaine
[19] Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'univers (DSM/Saclay)
[20] Institut rayonnement matière de Saclay (DSM/Saclay)

nanoseconde) pour étudier en laboratoire les plasmas chauds et denses, les processus radiatifs et de transport d'énergie et de matière. Ces recherches sont principalement menées au centre CEA-Cesta de Bordeaux (LMJ) et au sein d'une unité mixte de recherche avec le CEA-Iramis, le Luli[21], et implantée à l'École Polytechnique.

- Les lasers capables de délivrer des impulsions lasers d'intensité extrême (de 100 térawatts à plusieurs pétawatts), Le champ électrique, au maximum d'intensité de l'impulsion, est capable d'induire une accélération phénoménale des charges électriques présentes dans la matière (électrons, entrainant les ions). C'est le domaine de l'optique relativiste avec, en perspective, la mise en évidence de phénomènes quantiques, tels que la génération de particules dans le vide. Ce champ d'étude est exploré au CEA-Iramis.
- Les lasers délivrant des impulsions ultra-courtes, dont la durée est de l'ordre du temps caractéristique associé à la dynamique des orbitales électroniques dans les atomes, les molécules ou les matériaux. C'est l'échelle temporelle des réactions chimiques ou de l'évolution des plasmas. Ce champ d'étude est également exploré au CEA-Iramis.

Le Laser Mégajoule

Photo : Vue extérieure du LMJ © CEA

Au CEA-DAM, les têtes nucléaires, appelées à remplacer les armes en service arrivant en fin de vie, sont désormais garanties sans essais nucléaires nouveaux. Le programme Simulation, lancé en 1996, répond à cet objectif de garantie de leur fiabilité et de leur sûreté.

Le programme Simulation repose d'une part sur des équipes scientifiques de haut niveau et, d'autre part, sur de grands équipements indispensables pour résoudre et valider les équations modélisant le fonctionnement des armes nucléaires : supercalculateurs, machines radiographiques, laser Mégajoule (LMJ).

Le laser Mégajoule est l'outil indispensable de validation expérimentale de la phase de fonctionnement (dite phase nucléaire) des armes. Sa mise en service opérationnel a été prononcée par le Premier Ministre, Manuel Valls le 23 octobre 2014, lors du lancement de la première expérience.

Photo : Aperçu de la chaîne amplificatrice © CEA

Fonctionnement

Le fonctionnement de la chaîne laser se décline en 3 étapes : produire (à faible niveau) de la lumière laser (pilote), puis l'amplifier (chaîne amplificatrice) et enfin la focaliser (fin de chaîne) dans la chambre d'expériences.

Le pilote délivre l'impulsion lumineuse initiale qui

[21] Luli : Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses

sera amplifiée dans la chaîne. Il génère le faisceau, lui donne sa forme temporelle et spatiale ainsi que sa fréquence (« sa couleur ») et permet la synchronisation de tous les faisceaux. À la sortie du pilote, le faisceau laser a une section carrée de 40 mm de côté, son énergie est faible (de l'ordre du Joule) et sa durée est de quelques milliardièmes de seconde.

La chaîne amplificatrice a pour rôle d'amplifier fortement (de l'ordre de 20 000 fois) l'impulsion initiale sortie du pilote, afin d'obtenir l'énergie nécessaire aux expériences. Le LMJ accueille 176 faisceaux groupés en 22 chaînes de 8 faisceaux et répartis dans 4 halls laser.

Afin d'acquérir son énergie, chaque faisceau laser parcourt quatre fois la chaîne amplificatrice pour extraire le maximum d'énergie des amplificateurs.

Après amplification, les faisceaux sont transportés en fin de chaîne vers la chambre d'expériences. Chacun des faisceaux est orienté par un jeu de six miroirs successifs afin de les distribuer autour de la chambre d'expériences. Chaque faisceau traverse ensuite un système de conversion de fréquence (changement de couleur) et de focalisation, à l'intérieur duquel sa fréquence passe de l'infrarouge à l'ultraviolet. Enfin, ce système focalise le faisceau sur la cible, placée au centre de la chambre d'expériences.

La chambre d'expérience est une sphère d'aluminium et de béton de 10 mètres de diamètre pesant de l'ordre de 300 tonnes. Sous vide[22], la chambre d'expériences abrite la cible et supporte de nombreux instruments de mesure qui permettent de caractériser les plasmas[23] générés dans la cible au cours des expériences (spectres, neutrons, températures, densités...).

La cible est un microsystème conçu pour permettre, après avoir reçu l'énergie du LMJ, de reproduire en laboratoire un phénomène de même nature que celui intervenant dans les armes. Une catégorie spécifique de cibles, mettant en jeu une très faible masse (quelques microgrammes) d'isotopes de l'hydrogène (deutérium et tritium) sera utilisée pour les expériences de fusion par confinement inertiel. Les autres (plusieurs dizaines de types), de formes variées, sont destinées à étudier des processus physiques et le comportement des matériaux dans des conditions extrêmes.

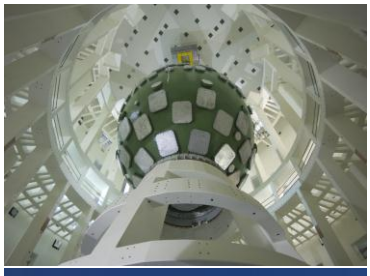


Photo en haut : Chambre d'expérience du LMJ © CEA

Photo en bas : Prototype de la cible du LMJ © CEA

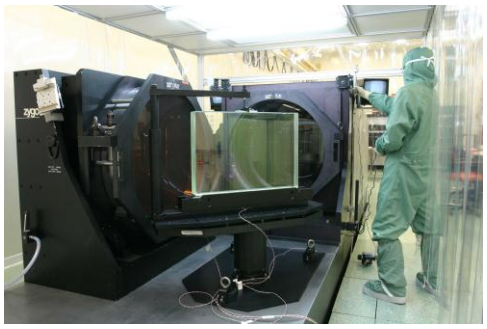
Succès des premières expériences sur le LMJ

Une première campagne de 8 expériences a été menée avec succès fin octobre 2014 sur le Laser Mégajoule. L'objectif de cette campagne de physique des armes était de caractériser la dynamique de l'évolution d'un matériau soumis à du rayonnement produit dans une cavité. Grâce à la remarquable stabilité des performances laser du LMJ, il est ainsi possible de réaliser des études paramétriques portant sur l'énergie laser investie, les caractéristiques de l'impulsion laser et la nature du matériau de la cible, afin de caractériser finement certains phénomènes physiques.

[22] Un milliardième de la pression atmosphérique y règne
[23] État de la matière dans des conditions extrêmes de température et de pression

Réalisation

Dès le lancement du projet LMJ en 1995, le CEA-DAM s'est vu confier la maîtrise d'œuvre d'ensemble, c'est-à-dire la responsabilité de la conception du système global et de l'obtention des performances. Pour la réalisation du LMJ (bâtiments et composants du laser), elle a fait appel aux industriels très majoritairement français (environ 95 %), les plus compétents dans les domaines considérés.



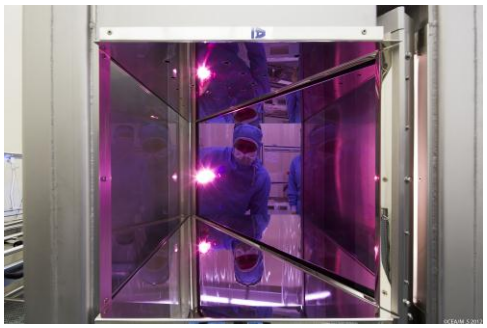


Photo : Caractérisations de composants optiques du LMJ © CEA

L'installation a été divisée en des ensembles aux périmètres bien définis (les sous-systèmes) pour être confiés, à l'issue d'appels d'offres, à des industriels dont le sous-système était la spécialité. Le retour d'expérience de son prototype, la Ligne d'intégration laser (LIL), a prouvé la pertinence du découpage et de la quasi-totalité des choix des industriels.

Dans le domaine des composants du laser, le CEA-DAM a fait profiter les industriels de son expérience en les accompagnant dans les phases de conception et de développement technologiques. Les très fortes exigences techniques requises pour l'installation LMJ ont tiré vers le haut le niveau d'excellence des industriels en charge des sous-ensembles.

Le CEA-DAM a recherché, dès le départ du projet, les PME capables de prendre en charge la réalisation des composants du laser. Pour des composants critiques, des études préalables ont été lancées dans certaines PME françaises (SEIV, Alsyom, Cilas, Sodern…) afin qu'elles acquièrent les capacités qui seront utilisées dans la phase d'exploitation du LMJ.

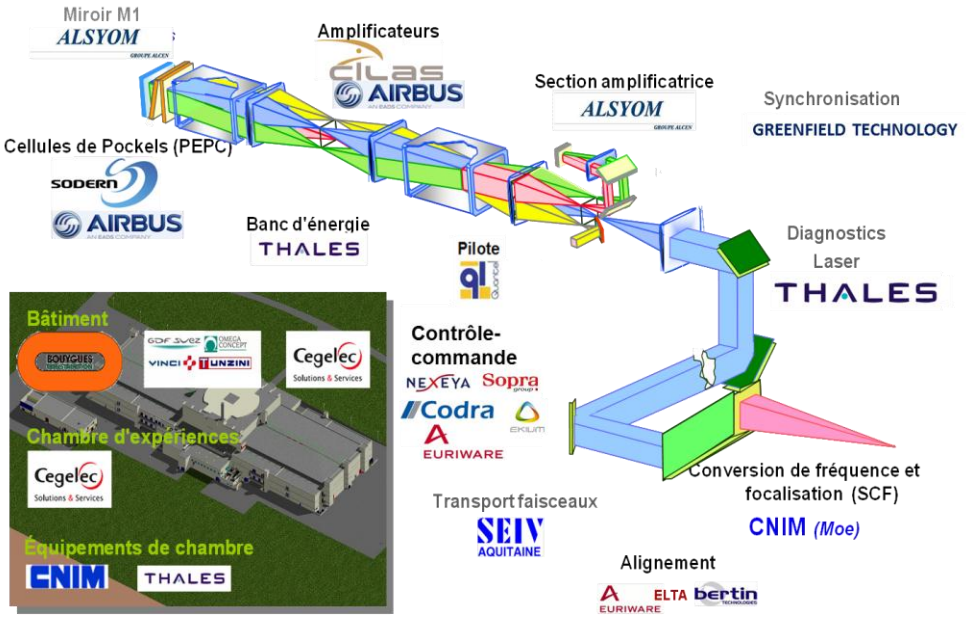


Figure 12 : Le synoptique représente le parcours d'un faisceau laser, depuis sa création dans le pilote (industriel Quantel), jusqu'à sa conversion en fréquence de l'infra-rouge à l'ultra-violet et sa focalisation dans le système de conversion de fréquence (industriel CNIM, Nexter…), après amplification et transport (industriels : Airbus, Cilas et Sodern, Thales, Alsyom, SEIV, Euriware, Elta et Bertin). © CEA

Ce sont de l'ordre de 1 000 entreprises qui ont participé au projet LMJ dans les domaines aussi variés que l'optique, l'opto-mécanique, l'électronique, l'informatique, le bâtiment, le bureau d'études… Une large majorité de ces industriels est constituée de petites et très petites entreprises. La DAM a eu la volonté de faciliter l'accès de ces PME aux marchés industriels en découpant le marché de certains sous-ensembles, en effectuant des transferts industriels de technologies développées en interne CEA vers ces PME (par exemple, les traitements antireflets des optiques par procédé sol-gel vers la société SEIV, le polissage…) ou en soutenant le transfert du savoir-faire du CEA sur des procédés industriels à ces entreprises.

L'implantation du LMJ en Aquitaine a permis de créer une activité laser sur le centre CEA-Cesta qui fait appel à environ 350 personnes. La construction du LMJ a généré en moyenne 700 emplois industriels, hors CEA, par an. À l'issue de cette phase, l'exploitation génèrera (hors CEA) de l'ordre de 150 à 200 emplois industriels pérennes, majoritairement en Aquitaine.

Au-delà de la réalisation du laser proprement dit, le LMJ a soutenu le développement d'une industrie nationale de haute technologie dans le domaine de l'optique, l'opto-mécanique, l'électronique. Des infrastructures d'accueil ont été mises en place dans un parc technologique à proximité du centre CEA-Cesta pour accueillir les industriels impliqués dans le LMJ.

Le laser PETAL

Le laser pétawatt Petal est en cours d'implantation au sein de l'installation LMJ. Ce projet vise la création d'une très grande infrastructure de recherche civile (TGIR), unique en Europe, dont la maîtrise d'ouvrage est confiée à la région Aquitaine, contributrice pour un tiers de l'investissement. Il consiste à réaliser un faisceau supplémentaire aux 176 existants de l'installation Mégajoule, dont la puissance sera de plusieurs pétawatts. Les scientifiques pourront ainsi réaliser des impulsions ultra-brèves de l'ordre de la picoseconde, c'est-à-dire environ 100 fois plus puissantes que celles d'un faisceau LMJ, avec une durée 1 000 fois plus brève.

Les chercheurs de la communauté académique bénéficieront de 20 à 25 % des expériences réalisées sur cette installation Petal-LMJ quasi-unique au monde, leur ouvrant ainsi de nouvelles portes dans la connaissance de la matière, notamment dans le domaine :

- la physique de l'extrême : Petal va conduire à créer des champs électromagnétiques hors du commun ;
- la connaissance de l'Univers : Petal permettra de recréer en laboratoire les conditions physiques exceptionnelles qui existent au cœur des étoiles ;
- la recherche médicale : récemment plusieurs équipes de recherche ont démontré la possibilité de contrôler la divergence du faisceau d'ions accélérés par laser ainsi que la sélection de l'énergie des protons. Ces progrès sont une réelle opportunité pour l'hadronthérapie, une des techniques les plus précises pour le traitement des tumeurs cancéreuses.
- l'étude de l'allumage pour la fusion thermonucléaire : en vue d'explorer la possibilité de produire de l'énergie par fusion thermonucléaire, l'installation

Petal-LMJ sera l'outil indispensable pour étudier la voie de la fusion par confinement inertiel, plus futuriste que la solution nominale de la fusion par confinement magnétique qui sera évaluée grâce à l'installation Iter, en construction près du site du CEA-Cadarache. L'installation Petal-LMJ contribuera à démontrer la potentialité de « l'allumage rapide » ou « par chocs » et à maîtriser l'ensemble des processus conduisant à la fusion dans un réacteur de production d'énergie.

Les lasers à impulsions ultra-brèves et/ou ultra-intenses

Alors que le LMJ délivre l'énergie accumulée en quelques nanosecondes, les chercheurs et ingénieurs du CEA-Iramis développent et utilisent des systèmes lasers qui libèrent leur énergie sous forme d'impulsions ultra-brèves (dans le domaine femtoseconde, soit 10^{-15} s) et ultra-intenses. Pour y parvenir des chaines lasers spécifiques sont développées dans le cadre d'un laboratoire commun avec la société Amplitude Technologies.

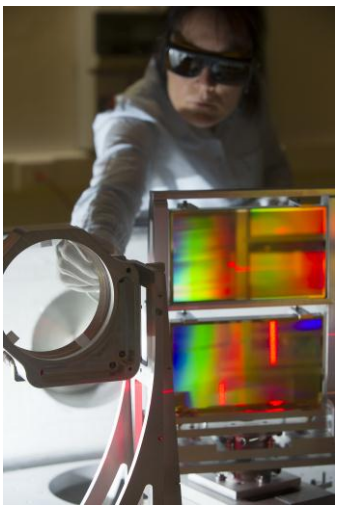


Photo : Laser UHI, installé au CEA-Saclay © P.Stroppa/CEA

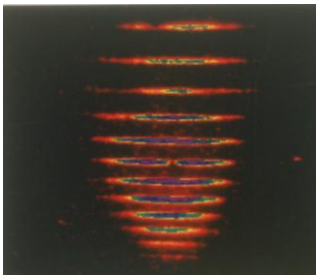


Figure 13 : harmoniques lasers © DR

Les chercheurs du CEA-Iramis étudient ces impulsions pour maitriser la lumière et les utilisent pour exciter et sonder la matière, en suivant trois objectifs principaux :

- Comprendre l'interaction lumière-matière à l'échelle de temps des impulsions laser. Une fois excitées par un laser ultra-bref, les « cibles » solide ou gazeuse utilisées peuvent convertir la lumière en générant des impulsions encore plus courtes (domaine attoseconde soit 10^{-18} s), pour lesquelles une métrologie spécifique doit être développée et qui seront, elles-mêmes, utilisées pour explorer la matière.
- Sonder des dynamiques déclenchées, comme des réactions chimiques par exemple ou des modifications induites des propriétés des solides : il s'agit alors d'exciter des molécules ou des solides puis de suivre leur évolution ultra-rapide.
- Etudier les propriétés optiques de la matière que le laser a accélérée à des vitesses proches de celle de la lumière : c'est le domaine de l'optique relativiste. Concentrer les impulsions de lumière sur des temps ultra-courts permet en effet d'atteindre des puissances crêtes très élevées (pouvant être supérieures au pétawatt !) qui conduisent à la création de champs accélérateurs plusieurs milliers de fois supérieurs à ceux exploités dans les plus grands accélérateurs de particules. En collaboration avec la communauté de recherche du plateau de Saclay, les scientifiques du CEA-Iramis s'intéressent ainsi à la génération de faisceaux de particules

chargées de très haute énergie au moyen de lasers, qui pourraient ainsi à l'avenir constituer une source utile pour les grands accélérateurs de particules et les synchrotrons. Ce type de recherches a aussi amené le CEA à participer au projet Saphir, qui a pour objectif de définir les meilleurs paramètres pour générer par laser des faisceaux de protons à usage thérapeutique (protonthérapie).

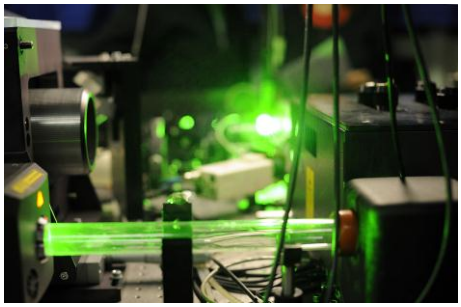


Photo : Laser Luca (Laser ultra-court accordable, à gauche) et UHI 100 (à droite)
© PF.Grosjean/CEA ; P.Stroppa/CEA

LA RECHERCHE SUR LES MATÉRIAUX POUR LES LASERS DU FUTUR

Au-delà de la conception de systèmes lasers de pointe pour la recherche, les équipes du CEA-Iramis possèdent un leadership sur la recherche et la fabrication de matériaux dopés en terres rares et/ou métaux de transition, pour les applications laser. Leurs compétences concernent la croissance et l'étude de cristaux de fluorures ou de verres spéciaux. Des analyses expérimentales et théoriques, essentiellement spectroscopiques, sont menées afin de comprendre les interactions entre les ions et leur réseau environnant, qui influent sur l'amplification laser. L'objectif est de développer des systèmes laser "tout-solide" innovants (laser RGB), des milieux à gain pour des lasers de forte énergie et de forte puissance (tels que Apollon ou le LMJ) ou des capteurs optiques pour l'environnement (détection de CO_2).

Les chercheurs travaillent également sur l'étude des propriétés spatio-temporelles des résonateurs optiques et des lasers ainsi que sur le développement de techniques optiques pour la mesure et l'instrumentation. Les compétences reconnues concernent notamment l'étude des effets transverses dans les cavités laser et la mise en forme de faisceau, avec l'objectif d'améliorer les performances.

LA NANOPHOTONIQUE : LA LUMIÈRE À L'ÉCHELLE DU NANOMÈTRE OU DU PHOTON UNIQUE

La plasmonique

Concentrer la lumière sur de petites échelles (sur des distances inférieures à sa propre longueur d'onde) rencontre des limitations techniques (défauts des optiques) et physiques (limite de diffraction). Si on souhaite, par exemple, exploiter le rayonnement visible (de longueur d'onde comprise entre 390 et 780 nm) pour développer un système de communication, celui-ci devrait avoir une taille supérieure au micromètre.

Les chercheurs du CEA-Iramis tentent de lever ce verrou, en étudiant les moyens de réaliser une « optique nanométrique » par une « compression » de l'onde lumineuse. Par interaction avec des nano-objets, l'onde électromagnétique est convertie en une oscillation d'électrons (plasmon[24]), que l'on peut ensuite manipuler (propagation dans des nanofils, réflexion sur des « miroirs », lames séparatives, production d'interférences…), le signal résultant étant restitué ultérieurement sous forme lumineuse. Il est aussi possible d'exploiter ces effets pour convertir en fréquence une impulsion lumineuse incidente et développer ainsi de nouvelles sources ultraviolettes femtoseconde ultra-compactes.

Les recherches en « plasmonique », si elles sont aujourd'hui encore très fondamentales, présentent un potentiel d'applications important pour la photonique de demain.

Vers un traitement photonique de l'information quantique

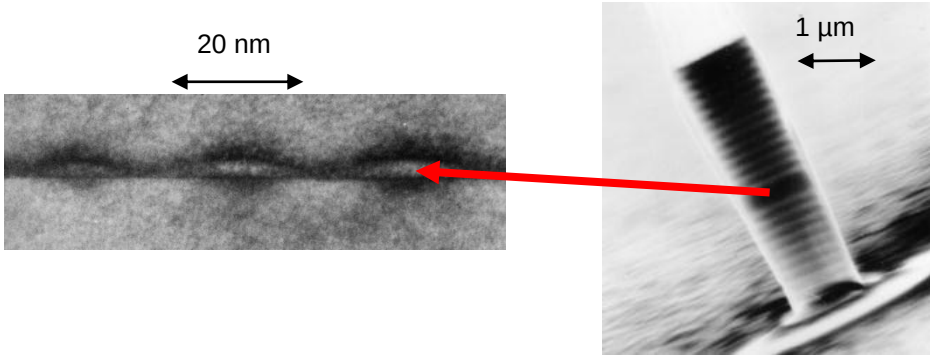
Les scientifiques de l'Inac étudient et développent des sources de photon unique : de tels composants permettent de générer à la demande des impulsions lumineuses contenant exactement un photon. Cette fonctionalité originale, qui ne peut être remplie par une LED ou un laser, ouvre des perspectives d'applications en cryptographie quantique, en métrologie des flux lumineux[25], et pour le calcul quantique photonique (le photon devient alors le support physique d'un bit quantique).

Le système le plus simple capable d'émettre des impulsions à un photon est constitué d'un atome isolé. Les chercheurs ont ainsi développé depuis une quinzaine d'années des « atomes artificiels », boîtes quantiques de semiconducteurs (fig.14a). Ces systèmes sont malheureusement difficilement exploitables, car ils rayonnent dans toutes les directions de l'espace. Une approche connue consiste à placer la boîte quantique dans une microcavité optique (fig.14b), sorte de « cage à photons », capable de confiner la lumière dans toutes les directions, à une échelle spatiale de l'ordre de celle de la longueur d'onde. Mais les difficultés liées à ces composants résident cette fois-ci dans leur fabrication.

[24] La longueur d'onde du plasmon est très courte

[25] Le développement de telles sources pour la métrologie des flux lumineux de faible intensité est soutenu à l'Inac par un projet du Programme de recherche européen en métrologie (EMRP) http://www.ptb.de/emrp/siqute-project.html

Pour contourner ces problèmes, l'Inac a récemment introduit une nouvelle source de photon unique, baptisée « trompette à photon » (fig.14c). Cette structure filaire en arséniure de gallium (GaAs) présente un pied très fin (250nm de diamètre) au sein duquel est placé une boîte quantique. Un fil aussi fin se comporte comme un guide d'onde monomode. Pour cette géométrie très particulière, les chercheurs ont montré que 95 % des photons émis par la boîte quantique sont injectés dans le mode guidé du fil. La forme évasée de la trompette permet de déconfiner le photon lors de sa propagation le long du fil, et d'obtenir un diagramme de rayonnement très directionnel, parfaitement adapté en vue d'un couplage à une fibre optique.



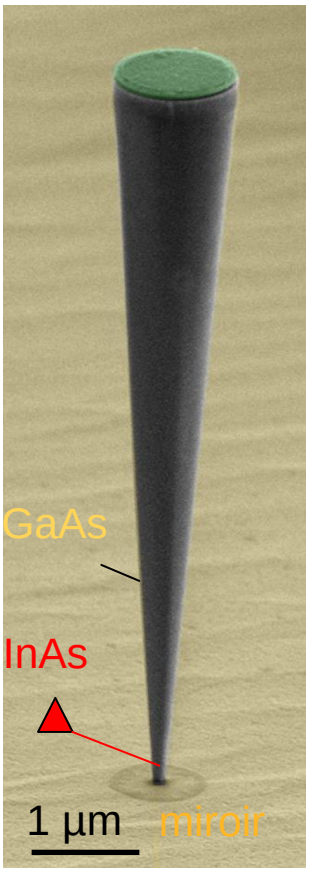


Figure 14a (en haut à gauche) : Boîtes quantiques d'arséniure d'indium (InAs) dans de l'arséniure de gallium (GaAs) vues par microscopie électronique.

Figure 14b (en haut à droite) : Microcavité optique en GaAs (couches sombres) et AlAs (couches claires)

Figure 14c (à gauche) : Trompette photonique en GaAs, vue au microscope électronique à balayage.

© CEA-Inac

ENJEUX ET PRINCIPAUX PÔLES DE R&D

La photonique est un secteur technologique appelé à un essor très fort au cours du XXIe siècle, en témoignent l'explosion du marché des LED ou ses performances en matière de traitement de l'information. En septembre 2009, la Commission européenne a identifié l'optique et la photonique comme l'une des six technologies-clés majeures (KET) à soutenir au niveau communautaire, à la fois :

- pour la croissance endogène qu'elle représente ;
- mais aussi pour les externalités importantes qui lui sont liées.

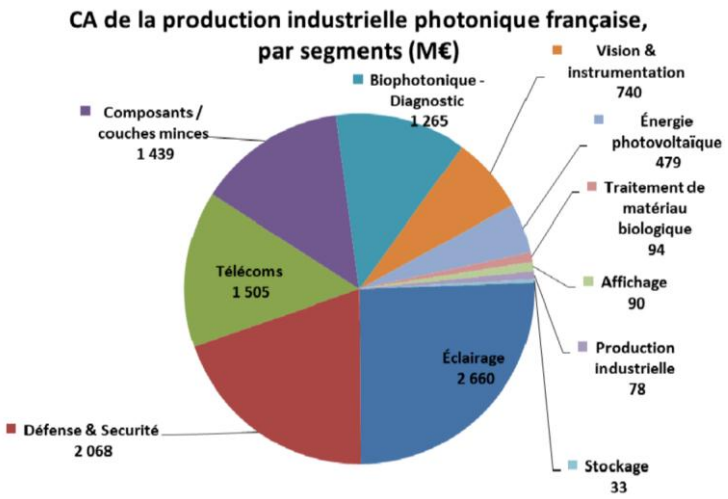


Figure 15 : Poids des segments de marché dans la photonique française, source : TEMATYS)

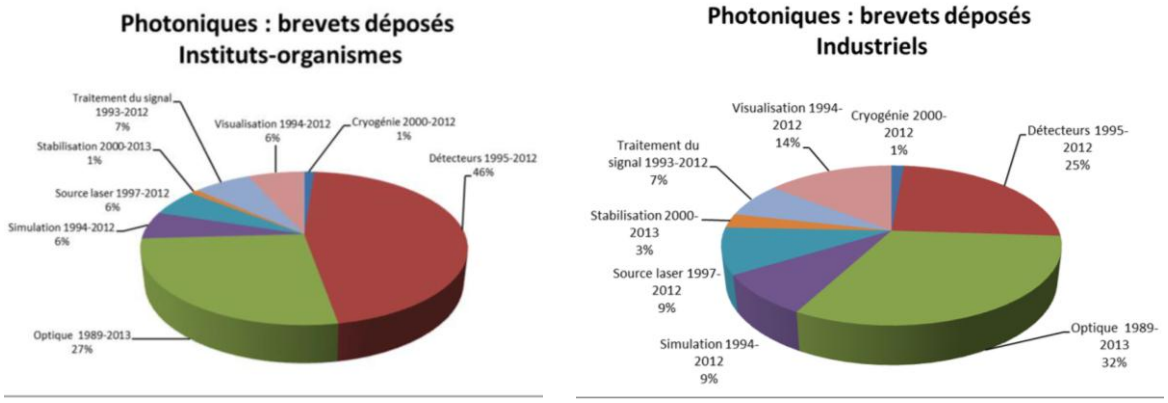


Figure 16 : Répartition thématique des brevets photoniques déposés sur 15 ans par les académiques (> 1 700) et industriels (> 2 500), source 3AF étude DGA 2014

DES ÉCOSYSTÈMES DE R&D EN POINTE

La Route des lasers en Aquitaine

Grâce au Laser Mégajoule, un pôle de compétitivité « Route des lasers » est né en 2005, regroupant aujourd'hui 75 entreprises et 700 chercheurs ; ce pôle impulse une forte dynamique de transferts de technologie dans le domaine des applications industrielles des lasers. Outre de grandes entreprises comme Thales et Airbus, cet écosystème se compose de très nombreuses PME innovantes à très forte croissance telle Amplitudes Systèmes (spéciualiste en laser à impulsions brèves). Près de 1 500 emplois industriels directs ont été créés.

Le rapprochement du pôle « Route des lasers » avec les pôles applicatifs du médical et de l'aéronautique (signature d'une convention avec Aerospace Valley), le travail sur le ressourcement pour préparer de nouveaux transferts technologiques et l'ouverture aux actions européennes marquent une dernière avancée en 2014. L'implication très forte de la région Aquitaine pour développer cette filière optique-laser, se manifeste aussi dans le domaine de la recherche et de l'enseignement supérieur.

Le pôle optique Rhône-Alpes (ORA)

Le pôle optique Rhône-Alpes est une association régie par la loi du 1er juillet 1901 qui a pour objet le développement et la mise en valeur de la filière optique dans la région Rhône-Alpes. Il vise à renforcer le potentiel régional en s'appuyant sur les compétences locales et en développant des liens avec l'ensemble des compétences scientifiques nationales et internationales. Il a vocation à promouvoir les technologies des domaines de l'optique instrumentale, de la photonique et la vision en lien avec la demande industrielle, en vue de contribuer à l'essor économique régional et de créer ainsi des emplois industriels. En juin 2010, le pôle optique Rhône-Alpes comptait 70 adhérents, dont 10 organismes académiques intégrant une quinzaine de laboratoires de recherche et autant de plateformes technologiques, et plus de 50 industriels allant de la TPE au groupe international. Le pôle optique Rhône-Alpes est soutenu par le Conseil régional Rhône-Alpes, le Conseil général de la Loire et la Communauté d'agglomération Saint Etienne Métropole.

Le Cluster Lumière

Le CEA est membre du Cluster Lumière, réseau de compétences de la filière éclairage basé à Lyon. Créé en 2008, il rassemble 175 adhérents représentant l'ensemble de la filière : fabricants de modules d'éclairage, laboratoires et centres techniques, bureaux d'étude et d'architectes…75 % des adhérents sont des PME. Le Cluster s'est rapidement ouvert à des entreprises de toute la France. Ces entreprises et centres techniques se complètent et développent des solutions d'éclairage innovantes, allant de la recherche à la production. Le Cluster Lumière les mobilise et stimule le travail collaboratif pour accélérer le développement des techniques innovantes d'éclairage (dont la technologie LED), promeut la filière française à l'international et anime des projets collaboratifs autour des grands marchés de l'éclairage.

DES INSTITUTS NATIONAUX ET EUROPEENS EN SOUTIEN À L'INDUSTRIE

L'**Institut de recherche technologique Nano-élec** à Grenoble, doté d'un budget de 300 millions d'euros, dont 60 millions consacrés à la photonique sur silicium, réunit les acteurs régionaux du secteur de la photonique, tels que ST-Microelectronics, Mentor Graphics, mais aussi les chercheurs du CNRS et du CEA-Leti, pour initier l'émergence d'une filière industrielle de fabrication de puces photoniques.

L'**Institut national de l'énergie solaire (Ines)** est le centre français et l'un des premiers européens dédié à la recherche, à l'innovation ainsi qu'à la formation sur l'énergie solaire et l'énergétique du bâtiment. Porté par le Conseil général de la Savoie et la Région Rhône-Alpes avec les équipes du CEA et de l'Université de Savoie, il réunit aujourd'hui 400 collaborateurs venus d'horizons divers sur un site de plus de 22 000 m² doté des meilleurs équipements.

Photo : Bâtiment Ines, à Chambéry © P.Dumas/CEA

L'**Institut Laser et Plasma (ILP)**, groupement d'intérêt scientifique, fédère 200 chercheurs et 25 laboratoires, coordonnant les recherches dans le domaine des lasers hautes densités d'énergie (HDE) et ultrahautes intensités (UHI). L'objectif est de créer une communauté autour d'objectifs communs et favoriser l'émergence de programmes scientifiques adaptés aux instruments, en charge plus particulièrement de l'accès des lasers du CEA-Cesta. Le CEA, membre de l'ILP, est un partenaire majeur de la recherche menée avec les grands lasers, en lien étroit avec ses partenaires académiques (CNRS, universités et École polytechnique). Le CEA est également membre du **réseau européen Laserlab**, qui réunit 19 États membres et 27 partenaires (dont le Luli, le LOA, le CEA-Iramis, le CELIA, le CEA-Cesta). Ce réseau facilite l'accès des chercheurs européens aux installations laser existantes et soutient les développements technologiques nécessaires à leur développement.

ANNEXES

CONNAÎTRE ET MANIPULER LA LUMIÈRE

En physique, la particule associée à la lumière – et plus généralement à l'interaction électromagnétique – est le photon. La lumière est alors décrite comme un flux de photons que l'on peut caractériser par son spectre en énergie et son intensité. De façon équivalente, un photon peut être caractérisé par sa longueur d'onde (en mètre), la fréquence d'oscillation du champ électromagnétique qui le porte (en hertz) ou directement en unité d'énergie (le plus souvent en électronvolt, eV - fig.17).

Si sa partie visible nous est familière (arc-en-ciel), le spectre électromagnétique s'étend dans l'infra-rouge pour atteindre les ondes radios, et dans l'ultra-violet, jusqu'aux rayons X et aux rayons gammas.

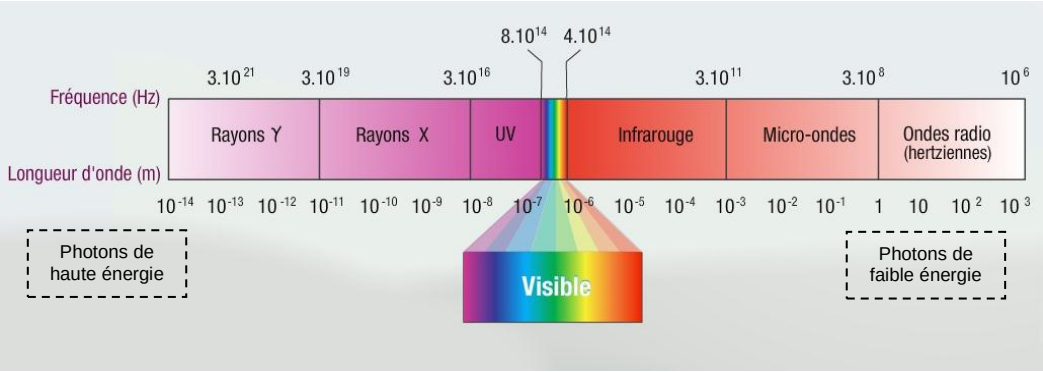


Figure 17 : Le spectre de la lumière (© C.Beurtey/CEA)

La lumière est donc une forme d'énergie que les chercheurs et ingénieurs peuvent exploiter, afin de bénéficier des propriétés spécifiques de ce rayonnement :

- La vitesse de propagation des photons, dont la masse est nulle, est égale à la plus grande vitesse permise par les lois de la physique (300 000 km/s dans le vide) ;
- La très haute fréquence des ondes lumineuses permet une transmission de données avec une très large bande passante, autorisant le transfert de flux d'information importants.
- L'étendue du spectre électromagnétique permet une grande diversité d'applications : de la transmission radio à la thermométrie infra-rouge, la transmission d'information par la lumière visible (fibre optique), ou encore la diffraction des rayons X permettant de caractériser les matériaux, … ;
- L'interaction avec la matière est fonction de l'énergie des photons et de leur flux (éclairement lumineux). On peut ainsi détecter le comportement d'une cellule biologique avec un photon unique, ou découper les métaux les plus réfractaires par des impulsions lumineuses ultra-intenses !

Les propriétés de la lumière sont exploitées dans plusieurs grands domaines d'applications, liées à son interaction avec la matière : éclairer, produire de l'énergie, détecter un signal et traiter l'information, etc... Les recherches se poursuivent sur l'ensemble de ces thématiques et de nouveaux effets, de nouvelles méthodes et dispositifs sortent des laboratoires pour exploiter au mieux toutes les possibilités offertes par l'étendue du spectre lumineux, des plus basses (photon unique !), aux plus hautes intensités (impulsion laser pétawatt).

L'interaction de la lumière et de la matière

Toute exploitation de la lumière repose sur l'interaction entre la lumière et la matière : les photons, selon leur énergie, peuvent interagir avec certains matériaux, de façon spécifique ou non. Par exemple, dans la nature, la photosynthèse ou la vision reposent sur l'interaction entre la lumière visible et des cellules spécifiques, qui convertissent cette lumière en énergie chimique pour la plante, ou en signal électrique dans le système nerveux.

La compréhension de l'interaction entre la lumière et la matière est donc un secteur-clé de la recherche pour le développement des technologies photoniques.

Les interactions rayonnement / matière exploitées :

- la « conversion » chaleur → photon : ce phénomène, le premier que l'Homme a appris à exploiter, suit le principe que tout corps à température non nulle émet de la lumière. Le bois qui brûle et le filament très chaud d'une ampoule à incandescence émettent dans le visible.
- La conversion directe de l'énergie des électrons en photons : dans les atomes, les molécules ou la matière condensée, la transition radiative d'un électron sur un niveau de haute énergie électronique vers un niveau de plus basse énergie conduit à l'émission d'un ou plusieurs photons.
- la « conversion » de l'énergie d'un photon en excitation électronique qu'il est possible d'exploiter. C'est le principe utilisé dans beaucoup de capteurs optiques dans les technologies de la communication, ou pour la production d'électricité dans les panneaux photovoltaïques.

Les propriétés physiques de l'électron et du photon

	masse	charge	spin
électron	≈ 0,5 MeV/c^2	-1	½
photon	0 eV/c^2	≈ 0	1

La lumière « standard » et la lumière « laser »

La lumière « ordinaire » - celle émise par le soleil, ou la lumière blanche d'une ampoule à incandescence… - est composée de photons qui se propagent dans toutes les directions, sur une large gamme d'énergie : la lumière « visible » est composée de photons compris dans une gamme de longueur d'onde allant de 390 nanomètres (nm) à 780 nm.

Le laser (« *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* ») est une lumière « ordonnée » dont la caractéristique principale est d'être cohérente : l'oscillation du champ électrique associé à chaque photon est en phase avec celle des autres (l'ensemble des photons contribuent à une seule et même onde électromagnétique).

Cette cohérence permet d'obtenir des faisceaux laser :

- unidirectionnels : les photons se propagent pratiquement tous dans la même direction, la divergence du faisceau est très faible,
- monochromatiques : un faisceau laser monochromatique est composé de photons qui ont pratiquement tous la même énergie (très faible largeur spectrale). On peut noter que ce n'est plus forcément le cas pour les impulsions laser ultra-courtes, dont la largeur du spectre est fonction de la durée de l'impulsion (selon le principe d'Heisenberg, plus l'impulsion est courte, plus le spectre sera large).

De nombreux types de laser ont été conçus, avec chacun son domaine d'application et le domaine est très vaste : depuis le lecteur laser de DVD, ceux pour la métrologie, le laser de haute puissance pour l'usinage industriel, ou encore celui des spectacles de nuit !

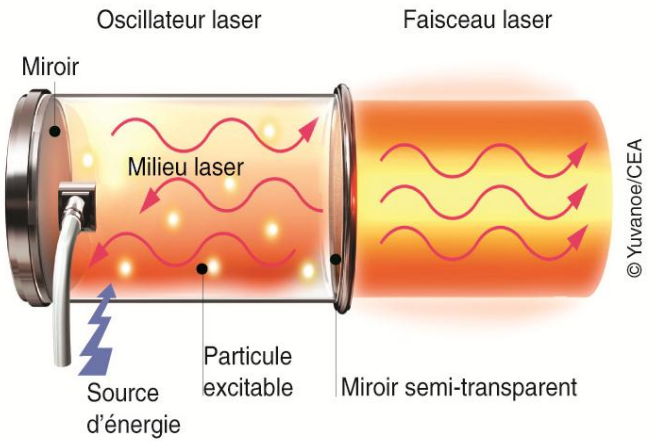


Figure 18 : Schéma d'un laser (© Yuvanoe/CEA)
Une source d'énergie excite le milieu laser. Le milieu laser favorise l'émission stimulée (l'interaction avec un photon conduit à l'émission d'un deuxième photon identique). La multiplication des photons au sein de la cavité définie par les miroirs permet d'obtenir le faisceau laser cohérent.