



Yvon Renotte, Dr Sci., enseignant-chercheur honoraire de l'Université de Liège
Past-prof invité, co-fondateur du HOLOLAB, Dépt AGO (Astrophysique, Géophysique et Océanographie)
y.renotte@uliege.be – <https://orbi.uliege.be/profile?uid=p041181> - www.linkedin.com/in/yvon-renotte-54a91a13
<https://hdl.handle.net/2268/300493>

Des applications

Introduction

Paradoxalement, alors que *l'imagerie holographique a peu à peu régressé au cours des vingt dernières années et quasiment disparu de notre espace public*, d'autres applications, nombreuses et variées, ont vu leurs champs d'exploitation croître sans que « Monsieur Tout-le-monde » se rende compte qu'il s'agit d'holographie ¹. C'est le cas des **composants optiques holographiques**, les **HOEs**, qui se sont multipliés dans notre environnement en raison de leur versatilité au point qu'ils remplacent de plus en plus souvent des composants électroniques notamment parce qu'ils sont devenus capables d'effectuer des opérations intégrées de plus en plus complexes, qu'ils peuvent être associés / couplés à des composants / dispositifs électroniques, mais contrairement à l'électron, le photon est peu sensible, voire insensible à l'environnement, notamment électromagnétique.

De nombreuses autres applications existent. Nous ne les détaillerons pas ici. Le lecteur intéressé peut consulter quelques références spécifiques ². Elles concernent des domaines aussi variés que les mondes médical, industriel ou patrimonial : comment un système conçu et réalisé pour l'archéométrie (relevé de formes d'objets archéologiques par interférométrie holographique) migra vers la métrologie optique et équipa finalement un outil de test et correction de rouleaux enducteurs dans l'industrie sidérurgique ? ^{2,3}

Les composants optiques holographiques, générés par ordinateur ou non

Les HOEs (Holographic Optical Elements) et coHOES (computer generated HOEs) ⁴

Des hologrammes peuvent être utilisés comme composants optiques : ce ne sont plus de simples lentilles de Fresnel ou réseaux zonés, ils se sont développés rapidement et tendent à remplacer les optiques classiques (lentilles, prismes, miroirs, . . .) dans un nombre croissant d'applications ne fut-ce qu'en raison de leur poids et leur encombrement nettement plus faibles à qualité égale. **Rappelons « qu'un gramme coûte très cher dans l'espace ! »**. Ce sont des composants « exotiques » au sens propre, « qui sortent de la norme » : Ils réalisent des opérations inaccessibles à l'optique conventionnelle, non seulement statiques mais aussi dynamiques, ainsi que des fonctions qui

1. Yvon Renotte, *Holographie, Hologrammes, Avatars électroniques, ce que l'on ne vous a pas dit : L'holographie a-t-elle encore un avenir ?*, (2023), 29-37 ; <https://hdl.handle.net/2268/300493>
2. Yvon Renotte, *Holographie, Hologrammes et (quelques) Applications*, in « *Lumière, réflexion, application, émotion* » (ouvrage collectif), éd. Embarcadère du Savoir, Maison de la Science – Liège (2015), 64-77, <http://hdl.handle.net/2268/258674>
3. Yvon Renotte, "De OSIRIS à MINT" ou "De Karnak (Haute Égypte) à CMI Group (Seraing)", Conférence donnée à l'U3A (université du 3^e âge – Liège), 15-01-2016, <https://hdl.handle.net/2268/302979>, présentation à l'U3A, <https://hdl.handle.net/2268/302979>
4. Yvon Renotte, *Holographie, Hologrammes, Avatars électroniques, ce que l'on ne vous a pas dit : Les hologrammes calculés / synthétiques, Les DOEs, HOEs et co-HOEs*, (2023), 54-62 ; <https://hdl.handle.net/2268/300493>

paraissent violer les lois de l'optique géométrique (réflexion, réfraction sous des angles n'obéissant pas aux lois de Snell-Descartes) [Figures 1 et 2], pas celles, « plus larges », de l'optique diffractive. Citons les **HUD** (Head up Display), viseurs tête-haute dans les avions et éléments de pare-brise automobile permettant aux pilotes et aux conducteurs d'observer le tableau de bord en accommodant sur l'infini, sans quitter le paysage des yeux. Ou encore les lecteurs de code-barre, les réseaux particulièrement performants pour la spectroscopie, . . . et la liste est loin d'être limitative. Associés à des **afficheurs LCD** (cristaux liquides) ou **LEDs**, ils peuvent effectuer des opérations plus ou moins complexes en manipulant par exemple les états de polarisation de la lumière : ce sont des interrupteurs optiques, des multiplexeurs / démultiplexeurs, des capteurs optiques, des commutateurs / adresseurs, des filtres électro-optiques ⁵ pour la reconnaissance de formes et le stockage de données, à mode de substrat mono et multi-couches très sélectifs, à résonance de mode guidé et de plasmons de surface ⁶, pilotables : autant de composants qui participent au développement « exponentiel » de la photonique. Combinés / accolés à des composants « classiques », ils corrigent des défauts (aberrations) et améliorent les performances des composants hybrides dans lesquels ils sont inclus, par exemple des objectifs d'appareils photographiques et/ou d'instruments, ou encore des concentrateurs solaires ⁷ [Figure 3].

Figure 1 – **DOEs / HOEs n'obéissant pas aux lois de l'optique géométrique**

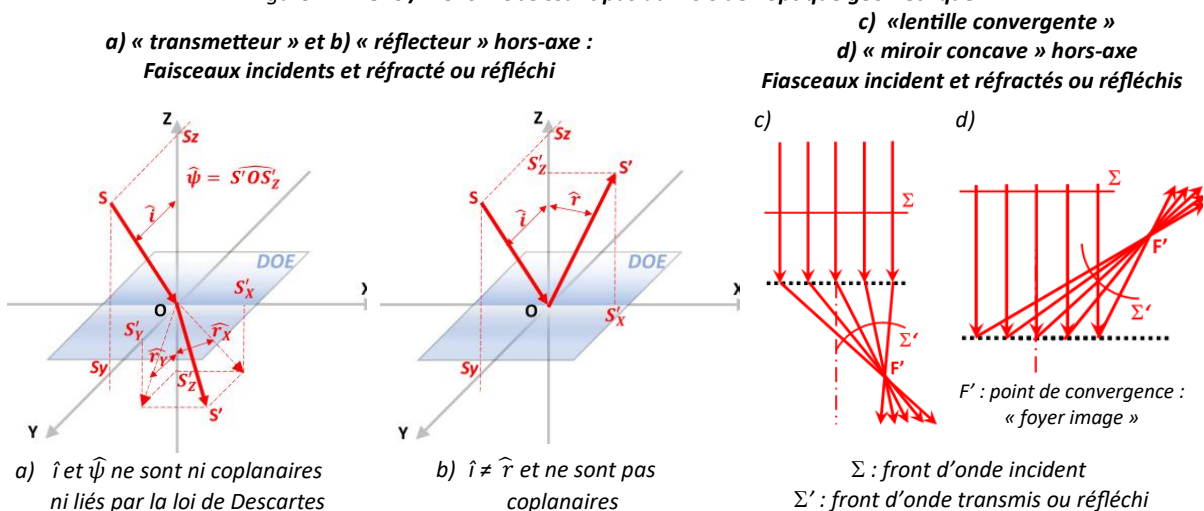
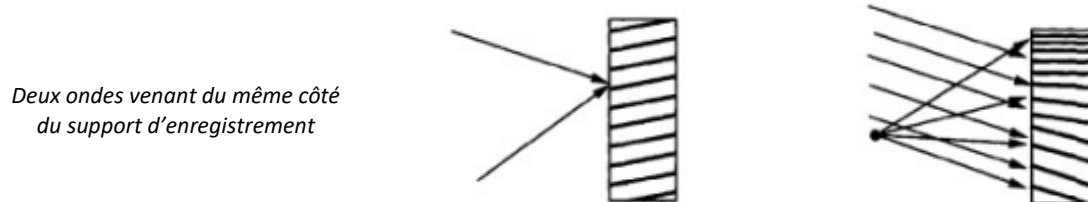
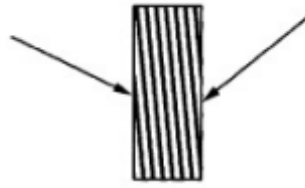


Figure 2 - **Orientation des franges d'interférence dans un support d'enregistrement**

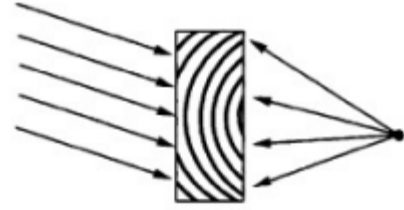


5. **Vincent Moreau**, *Intégration de systèmes d'interconnexions optiques reconfigurables*, thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences Physiques, Université de Liège (16-11-2001) ; **Cédric Lenaerts**, *Etude et réalisation de filtres spectraux – Application à la résonance de mode guidé et à la résonance de plasmons des surface*, thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences Physiques, Université de Liège (30-09-2005)
6. Bernard Tilkens, *Etude par spectroscopie de résonance de plasmons de surface de la formation de matrices pour matériaux photosensibles* ; thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences (groupe des Sciences Physiques), Université de Liège (20-05-2003)
7. Fabian Languy, Karl Fleury-Frenette, Cédric Lenaerts, Jérôme Loicq, D. Regaert, T. Thibert and Serge Habraken, *Flat Fresnel doublets made of PMMA and PC: combining low cost production and very high concentration ratio for CPV*, Optics Express, 19 (2011), A280-A294

Deux ondes venant des côtés opposés du support d'enregistrement

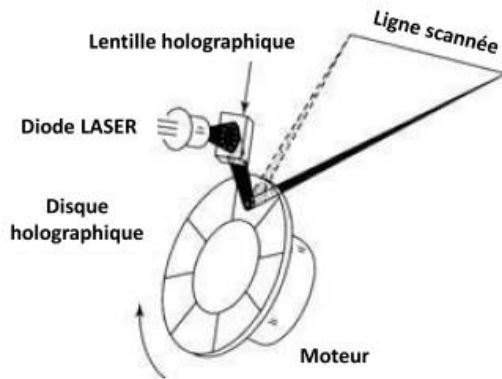


Deux ondes planes forment des franges obliques

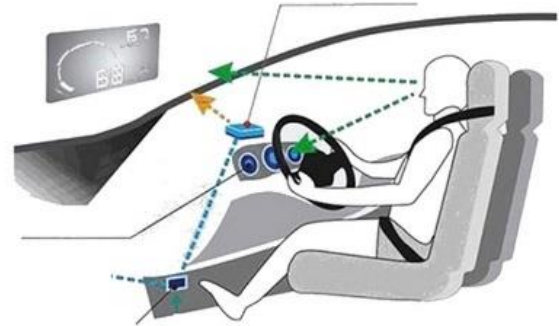


Une onde plane et une onde sphérique

Figure 3 – Exemples d'application des composants optiques holographiques dans des systèmes optiques



Scanner à disque holographique



Fonctionnement de l'affichage tête haute Head Up Display : schéma simplifié



Exemple d'affichage tête haute dans l'automobile



Exemple d'affichage tête haute dans l'aviation

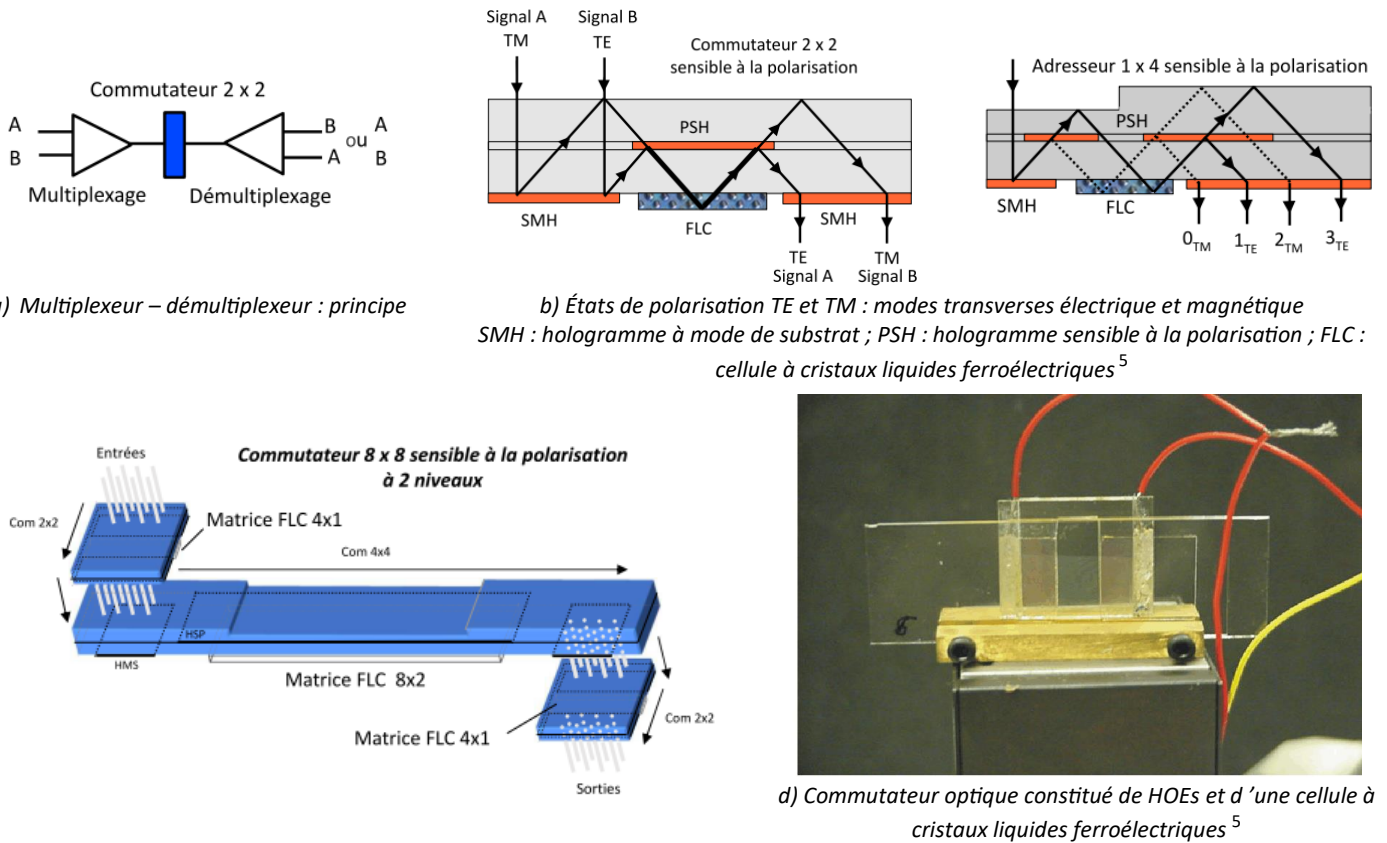
Des composants tels ceux illustrés aux figures 1 et 2 peuvent être aisément construits « analogiquement » par interférence entre deux faisceaux correctement choisis. Ils peuvent aussi être construits « analytiquement » par transfert-copie de l'image 2D d'un réseau pixellisé (calculé ou non) « dessiné » sur un calque transparent. Le réseau ainsi construit est une image 2D d'une structure diffractive qui peut entraîner un comportement 3D, éventuellement la formation d'une image 3D. Nous sommes en présence d'un comportement paradoxal : le « **principe holographique** » qui présente la particularité de permettre l'enregistrement de l'informations 3D dans un substrat 2D. Ce principe a généré des réflexions dépassant le simple contexte de l'imagerie holographique jusqu'à concerner la cosmologie.

Des logiciels de plus en plus performants ont été créés et sont aujourd'hui disponibles⁸. Ils sont capables de calculer des composants complexes (HOEs, DOEs - *éléments optiques diffractifs*, coHOEs

8. David Blinder, Ayyoub Ahar, Stijn Bettens, Tobias Birnbaum, Anastasia Symeonidou, Heidi Ottevaere, Colas Schretter, Peter Schelkens, *Signal processing challenges for digital holographic video display systems*, Signal Processing : Image Communication, Elsevier, Vol.70 (2019), 114-130; Peter Schelkens, IMEC Holography , <https://www.imec-int.com/en/imec-magazine/imec-magazine-may-2020/in-the-footsteps-of-princess-leia-the-search-for-the-holy-grail-of-holography>

et coDOEs) intervenant ou non dans des dispositifs et instruments. Ils sont couramment utilisés dans les centres de recherche (le Centre Spatial de Liège et Advanced Mechanical and Optical Systems pour ne citer que ces deux sociétés locales) et dans l'industrie.

Figure 4 – Exemples de composants dynamiques : a, b et c : schémas de principe ; d : réalisation



Leur conception est esquissée dans une note séparée⁴, nous nous contenterons de proposer quelques exemples [Figure 4].

Le « spatial » offre un vaste panorama de possibilités d'applications des composants optiques diffractifs et holographiques, générés par ordinateur ou non, à la fois par la diversité des domaines potentiels d'utilisation et l'intérêt d'exploiter la souplesse d'adaptation, de conception et de réalisation de ce type de composants, associés ou non à des éléments réfractifs. Autant de caractéristiques qui les rendent extrêmement attractifs à condition de disposer / d'utiliser des matériaux photosensibles supportant les normes « espace » très sévères, particulièrement la résistance aux rayonnements agressifs et aux températures extrêmes. Des photopolymères ont été mis au point dans ce but.

La société **AMOS** (Advanced Mechanical and Optical Systems) et le **CSL** (Centre Spatial de Liège), associé au **HOLOLAB** (Dépt AGO - ULiège), ont joué, et continuent à jouer un rôle important en R&D, conception et réalisation de (co-)DOEs et (co-)HOEs. Ces recherches ont généré plusieurs thèses doctorales et de nombreux travaux de fin d'études en sciences et sciences appliquées, dont les résultats sont exploités par les sociétés précitées ainsi que par l'ESA (European Space Agency), l'ESO (European Southern Observatory – Paranal Observatory, Chili) et même la NASA (National Aeronautics and Space Administration, USA), sur des instruments terrestres et embarqués.

Sans être exhaustif, quelques exemples permettront de rendre compte de la polyvalence et de l'intérêt de ces collaborations pour les deux parties, académique et industrielle :

- **Développement de lentilles achromatiques adaptées à la concentration solaire** alliant haute concentration, faible coût de production et tolérance aux erreurs de fabrication ⁹.

Les concentrateurs solaires réfractifs souffrent d'aberrations chromatiques importantes. Pour améliorer les performances des cellules solaires, sources d'énergie incontournables dans l'espace, il faut augmenter le taux de concentration. Une lentille hybride (diffractive/réfractive) fournit une densité de flux plus uniforme et un éclairage achromatisé (au sens de doublet achromatique) de la cellule. Dans un premier temps, les recherches ont été menées sur une lentille hybride en plastique combinant une lentille de Fresnel réfractive avec une lentille diffractive ¹⁰. Elles ont permis de multiplier le facteur de concentration par 4. Le design de la lentille diffractive nécessite la maîtrise théorique des réseaux de diffraction blazés ¹¹ afin de les optimiser. Pour obtenir une efficacité de diffraction élevée, la lentille diffractive doit être composée de deux couches de matériaux différents, ce qui rend le système très peu tolérant aux erreurs de fabrication. Ultérieurement, des doublets de Fresnel achromatiques ont été développés. Ils permettent d'atteindre des facteurs de concentration très élevés (> 100 000 ×) pour des rayons collimatés sous incidence normale [Figures 5 et 6].

Figure 5 – Lentille à échelons de Fresnel et son équivalent « réfractif »

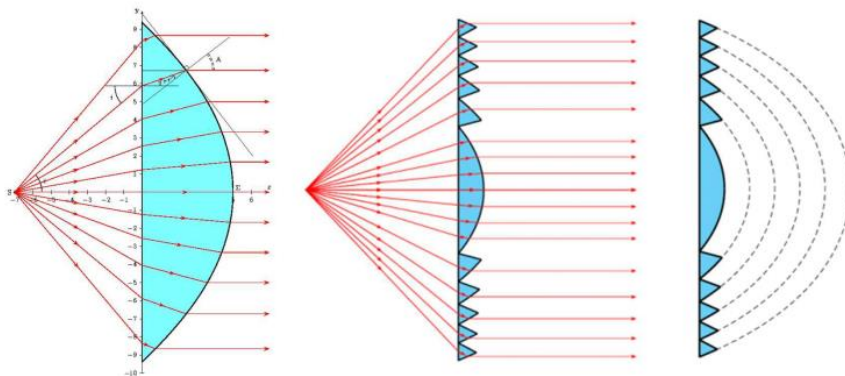
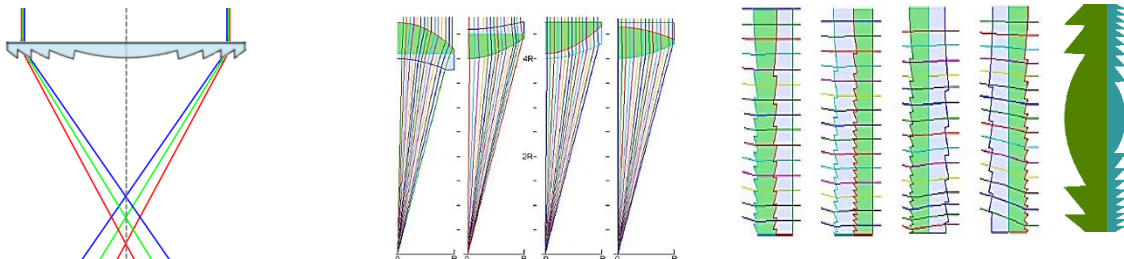


Figure 6 – Exemples d'applications de coHOEs pour la recherche spatiale et la correction d'instruments ⁹



Achromatisation de lentilles hybrides réfractives et diffractives pour concentrateurs solaires

Avec une lentille simple, les courtes longueurs d'onde convergent plus vite que les grandes : le foyer est donc une tache relativement large, non homogène spectralement, ce qui amoindrit le rendement des cellules photovoltaïques

Le but est de **diminuer la taille du spot focal** et de rendre le **flux** atteignant la cellule **le plus homogène possible spectralement** (le plus blanc)

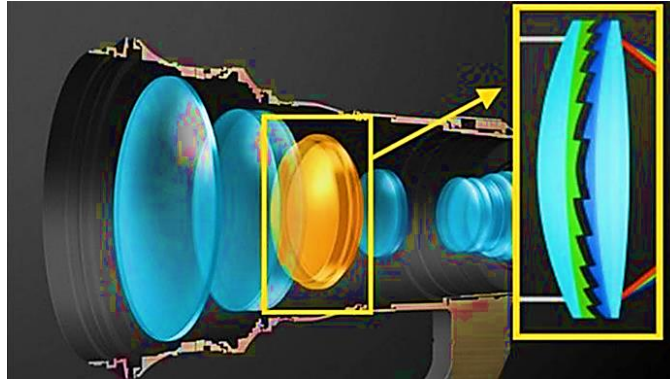
Solution : étude comparative
Multicouches réfractif / réfractif et hybrides réfractif / diffractif : divers cas

Solution : étude comparative
Lentilles hybrides formées de doublets de Fresnel : divers cas

9. Fabian Languy, *Achromatization of nonimaging Fresnel lenses for photovoltaic solar concentration using refractive and diffractive patterns*, thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences Physiques, Université de Liège (12-2012)

10. Yvon Renotte, *Holographie, Hologrammes, Avatars électroniques, ce que l'on ne vous a pas dit : Les lentilles de Fresnel* (2023), 56-58 ; <https://hdl.handle.net/2268/300493>

11. Yvon Renotte, *Holographie, Hologrammes, Avatars électroniques, ce que l'on ne vous a pas dit : Les réseaux blazés* (2023), 56-58 ; <https://hdl.handle.net/2268/300493> ; *Holographie, Hologrammes, Avatars électroniques [2^e partie]* (2023), 18 ; <https://hdl.handle.net/2268/301852>



- **L'imagerie hyperspectrale** en plein développement exige des **résolutions spectrale et spatiale élevées**. Les spectro-imageurs à réseau de diffraction sont privilégiés parce qu'ils offrent une résolution spectrale élevée sur une bande plus large que les autres types, tels ceux à prisme ou à transformée de Fourier. De plus, la miniaturisation des instruments hyperspectraux tendant à se généraliser, il faut disposer de réseaux qui répondent à cette exigence. Les réseaux convexes sont exploités à cette fin d'autant qu'il est aujourd'hui possible de les fabriquer quasiment sans aberration.

Les concepteurs / fabricants doivent trouver une géométrie du réseau qui rencontre les exigences en efficacité de diffraction. Deux types de réseaux sont des candidats sérieux : les *réseaux mono-blaze* et *multi-blaze*. Le premier est optimisé pour une seule longueur d'onde de blaze, c'est un réseau à profil uniforme. Le second est optimisé pour plusieurs longueurs d'onde, c'est un réseau à plusieurs profils ou un ensemble de sous réseaux correctement « mélangés ». Différentes méthodes d'optimisation ont été testées qui ont conduit à d'excellents résultats ¹². Il est notamment possible de corriger correctement les aberrations des spectromètres, par réalisation de réseaux holographiques sur des surfaces non planes tout en conservant un rendement de diffraction suffisant ¹³.

L'optimisation du réseau de l'instrument hyperspectral de **la sonde spatiale Chandrayaan 2** a été exécuté par la société AMOS pour l'**ISRO** (Organisation de Recherche Spatiale Indienne) dont l'objectif est de recueillir des données scientifiques sur la Lune (lancement : 22 juillet 2019). L'instrument est actuellement sur orbite et fournit de très belles images [Figure 7].

Le processus d'optimisation appliqué au réseau de l'instrument hyperspectral **THEO** (*Technologies for Hyperspectral Earth Observation*) également développé par AMOS pour l'**ESA**, avait abouti à la conception de réseaux à 3 longueurs d'onde de blaze.

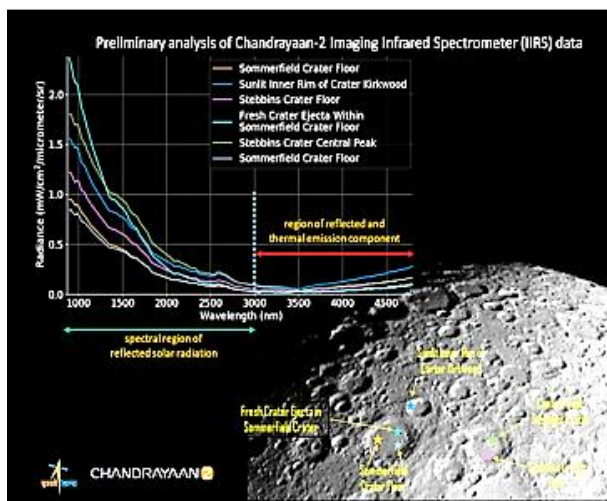
Il est aussi utilisé pour optimiser le réseau de **la mission CHIME** (*The Copernicus Hyperspectral Imaging Mission*) pour le soutien de la sécurité alimentaire, l'agriculture durable, la gestion de la biodiversité, la caractérisation des propriétés des sols, les pratiques minières durables et la préservation de l'environnement en Europe) ¹⁴ simultanément dans deux ordres de diffraction (l'ordre 2 du visible au proche infrarouge et l'ordre 1 dans l'infrarouge onde courte).

12. Bernard Sabushimike, *Conception et modélisation des réseaux de diffraction pour imageur hyperspectral miniature dans le domaine du visible à l'infrarouge moyen*, thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences Physiques, Université de Liège (09-2020)

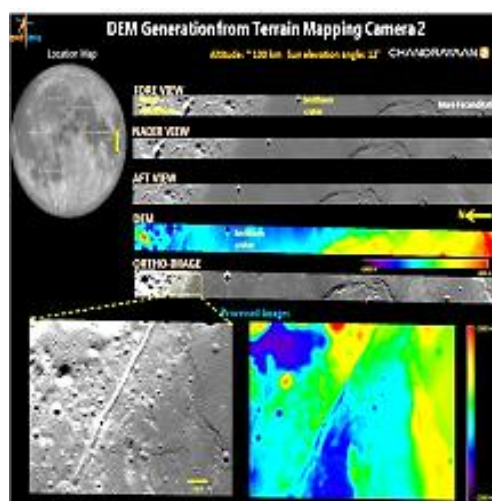
13. Georges Horugavye, *Correction d'aberrations de spectromètres à l'aide de réseaux holographiques enregistrés sur des surfaces non planes : études théorique et expérimentale*, thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences Physiques, Université de Liège (06-03-2023)

14. **Sentinel-10** ou **CHIME** est un satellite d'observation de la Terre de l'**ESA** (Agence Spatiale Européenne) développé dans le cadre du *programme Copernicus* de l'Union Européenne : lancement vers 2029.
https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/11/CHIME

Figure 7 – Imagerie lunaire fournie par l'instrument Chandrayaan 2 ¹²



Analyse préliminaire des données fournies par Chandrayaan 2



Imagerie initiale et observations par le radar à ouverture synthétique à double fréquence

- **L'optique adaptative et la coronagraphie** sont des outils clés et complémentaires pour atteindre les conditions de résolution et de contraste nécessaires à la **détection directe d'exoplanètes**. Cependant, les instruments n'étant jamais parfaits, des « défauts » à proximité de l'image de l'étoile gênent la détection de ses compagnons. La réduction des défauts peut se faire à deux niveaux : soit par un meilleur traitement des aberrations sur l'instrument, soit par une combinaison adéquate d'une stratégie d'observation et d'une technique de traitement des données ¹⁵. La procédure a été adaptée à **l'instrument VLT/NACO** ¹⁶ pour la détection d'exoplanètes autour d'étoiles jeunes possédant un disque de débris.

L'étude initiale s'inscrivait dans le cadre du **projet de télescope spatial DARWIN de l'ESA (2002)** ¹⁷ pour la recherche et l'observation d'exoplanètes de taille terrestre, et d'y découvrir d'éventuelles traces de vie primitive. Il s'agissait d'une flottille de huit véhicules spatiaux dont six emporteraient des télescopes, le septième combinerait la lumière provenant des six premiers et simulerait un miroir aux dimensions beaucoup plus grandes que celles d'un simple télescope. Le huitième communique avec la Terre et le reste de la flottille. Cette mission devait être lancée peu après 2014 mais elle fut **délaissée en 2007 au profit de techniques interférométriques terrestres** [Figures 8 et 9].

15. Dimitri MAWET, *Subwavelength gratings for extrasolar planetary system imaging and characterization*, thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences Physiques, Université de Liège (15-09-2006)

16. **NACO** est un instrument **VLT (Very Large Telescope)** de première génération, développé dans le cadre d'une coopération franco-allemande et l'**ESO (Paranal European Southern Observatory, Chili)**. **NACO** est la contraction de **NAOS-CONICA**, dont les acronymes désignent les deux sous-systèmes de l'instrument : **Nasmyth Adaptive Optics System (NAOS)** – **COude Near-Infrared CAMEA (Imager and Spectrograph) (CONICA)**. **NACO** est l'une des meilleures solutions au sol de correction des défauts produit par la turbulence atmosphérique. Son utilisation pionnière de l'optique adaptative fournit des images quasiment aussi nettes que celles enregistrées dans l'espace : VLT- UT1, imagerie assistée par optique adaptative + polarimétrie d'imagerie + coronagraphie et spectroscopie 0,8–2,5 μm (octobre 2001). La deuxième partie **CONICA** est la caméra infrarouge et le spectromètre attaché à NAOS. Ils forment le premier système d'optique adaptative installé sur le VLT.

NACO contribue depuis 2001 à des découvertes majeures dans divers domaines de l'astronomie : rechercher / détection d'exoplanètes, examen / étude du centre galactique de la Voie lactée, d'objets stellaires jeunes et du système solaire, etc. C'est un outil extrêmement performant : en 2004, il a fourni la première image directe d'une exoplanète ; en 2010, il a pu suivre directement le mouvement d'une exoplanète alors qu'elle se déplaçait d'un côté à l'autre de l'étoile Beta Pictoris. L'instrument a aussi fourni le premier spectre d'une exoplanète directement observée, permettant aux astronomes d'étudier l'atmosphère de la planète.

<https://www.eso.org/public/teles-instr/paranal-observatory/vlt/vlt-instr/naco/>

17. Le positionnement de **DARWIN** dans l'espace était justifié pour pouvoir utiliser des longueurs d'ondes dans l'infra-rouge moyen (**Mid-InfraRed**) difficilement accessibles, ou non accessibles, à partir du sol en raison de l'écran atmosphérique terrestre alors que c'est précisément dans ces longueurs d'onde que les exoplanètes réfléchissent le plus de rayonnements électromagnétiques.

https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Darwin_overview

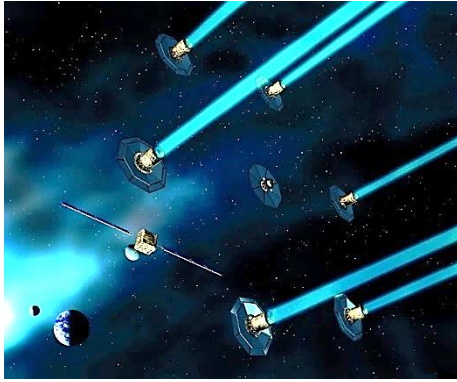


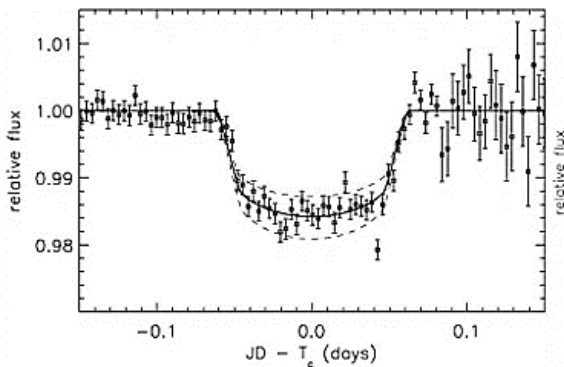
Figure 8 – Schéma de la Mission DARWIN
ESA

Darwin utilise la lumière venant de six télescopes et la transmet sur la Terre¹⁷
(vue d'artiste)

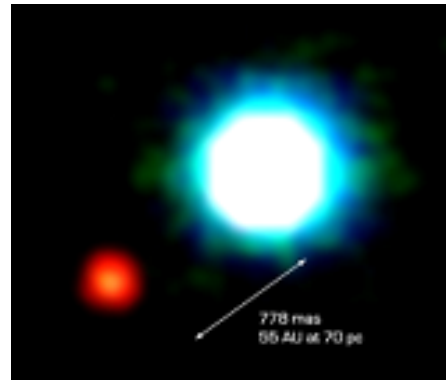
https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Belgium_-_Francais/De_la_mission_Darwin_a_Internet_a_la_vitesse_de_la_lumiere

<https://www.ias.u-psud.fr/fr/activites-de-recherche/systeme-solaire-et-systemes-planetaires/planetes-extrasolaires/la-mission-darwin>

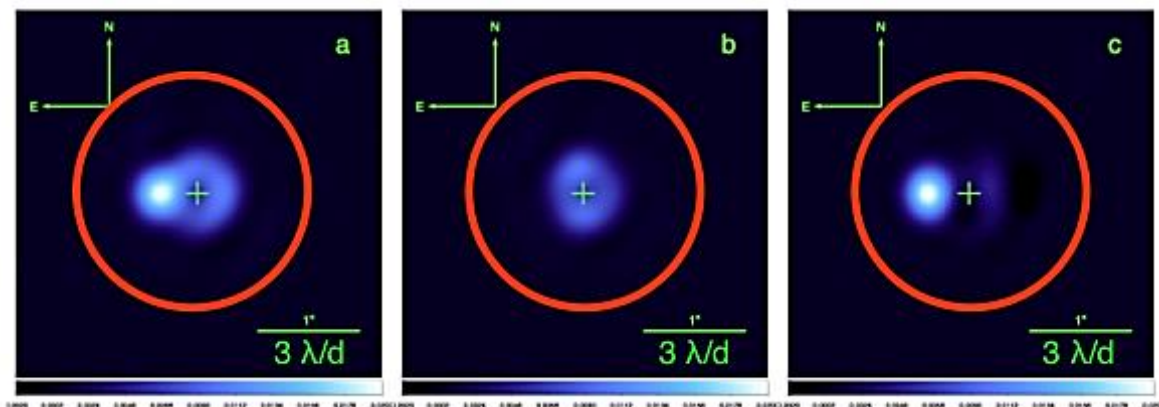
Figure 9 – Observation d'exoplanètes



Variation de l'intensité enregistrée lors du premier transit exoplanétaire enregistré : HD 209458 b¹⁸



Première image directe d'une exoplanète : 2M1207b¹⁹



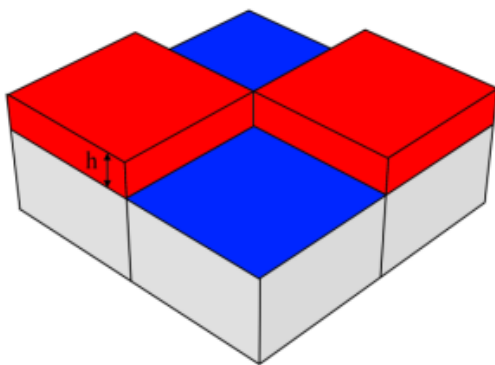
Images de ϵ Cephei et de son proche compagnon découvert à l'aide d'un coronographe à vortex vectoriel associé au télescope WCS (World Coordinate System) de 1,5 m à l'Observatoire du Mont Palomar – California Institute of Technology
a = image cible, b = étoile de référence, c = ax x b / Le candidat compagnon est 50 fois plus faible que ϵ Cephei^{20,21}

18. Michel Mayor, Didier Queloz, *A Jupiter-mass companion to a solar-type star*, Nature, **378** (1995), 355–359 ; prix Nobel de Physique 2019 ; David Charbonneau, Timothy M. Brown, David W. Latham, Michel Mayor, *Detection of Planetary Transits Across a Sun-like Star*, The Astrophysical Journal, 529 (2000), L45-L48 ; Olivier Absil & Dimitri MAWET, *Formation and evolution of planetary systems: the impact of high angular resolution optical techniques*, Astronomy and Astrophysics Review, 18 (2010), 317-382 , <https://doi.org/10.1007/s00159-009-0028-y>
19. Gaël Chauvin, A-M. Lagrange, C. Dumas, B. Zuckerman, D. Mouillet, I. Song, J-L. Beuzit and P. Lowrance, *Giant planet companion to 2MASSW J1207334-393254*, Astronomy & Astrophysics, 438 (2005), L25-L28
20. Dimitri Mawet, E. Serabyn, K. Liewer, R. Burruss, J. Hickey, D. Shemo, (2010, January), *The Vector Vortex Coronagraph : Laboratory Results and First Light at Palomar Observatory*. The Astrophysical Journal, 709 (2010), 53-57 ; Valentin Christiaens, *Optimization and application of a LOCI-type reduction pipeline to detect exoplanet*, thèse présentée pour l'obtention du grade de Master en Sciences Physiques, Université de Liège (15-08-2012)
21. Dimitri Mawet, B. Mennesson, E. Serabyn, K. Stapelfeldt, and Olivier Absil, *A DIM candidate companion to ϵ Cephei*, The Astrophysical Journal Letters, 738 (2011), L12, 5 pages

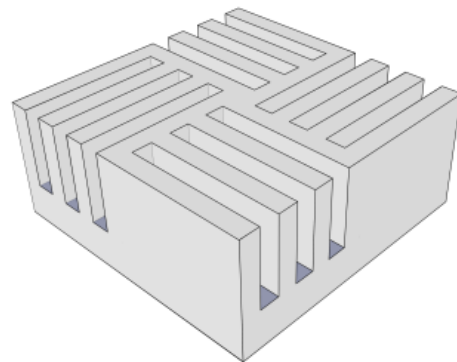
- **La coronographie** est une technique d'imagerie à haut contraste qui a le vent en poupe. En astronomie, elle reproduit artificiellement le phénomène des éclipses totales : le **coronographe** permet de masquer la partie centrale d'une étoile pour que sa seule couronne apparaisse. En plus de révéler la couronne de l'étoile, l'outil permet de rendre visible des objets orbitant près d'elle, même s'ils sont nettement moins lumineux que l'astre occulté. **Depuis les années 1980, la méthode a été adaptée à l'étude d'autres étoiles que le Soleil dans l'espoir de détecter des exoplanètes** ²².

Le principe de base consiste à « placer » un masque opaque de diamètre adapté à l'étoile observée dans le télescope. Dans un premier temps, **Bernard Lyot** (1897-1952) a conçu une optique, le « **diaphragme de Lyot** », permettant de séparer la lumière provenant de la couronne solaire de celle diffractée par le bord de l'objectif principal. **En 1997, Claude et François Roddier** ²³ proposent d'**introduire un décalage de phase dans le masque pour occulter la lumière stellaire par une interférence destructive à l'aide d'un masque circulaire produisant un déphasage de π dans la partie centrale du disque d'Airy.**

Figure 10 – Schémas de principe des coronographes quatre cadrans



a) Schéma bloc du masque de phase à quatre cadrans
Les surfaces rouges comportent une épaisseur additionnelle h par rapport aux bleues de manière à produire un retard de phase π supplémentaire par rapport à celles-ci



b) Représentation du masque de phase réalisé avec quatre réseaux sub-longueur d'onde : les caractéristiques des réseaux sont identiques mais l'orientation des rainures est tournée de 90° d'un cadran à ses voisins

En 2000, **Daniel Rouan** ²⁴ utilise un masque à 4 quadrants : il est **divisé en quatre carrés dont deux produisent un décalage de π lors de leur traversée tandis que les deux autres laissent passer la lumière sans décalage** [Figure 10]. Le déphasage π entre deux zones adjacentes produit une interférence destructive au centre et la lumière est « rejetée » à l'extérieur du diaphragme de Lyot [Figure 11.c] : ils permettent une forte atténuation de la lumière de l'étoile et ainsi de détecter des objets très proches. Les réseaux sub-longueur d'onde conviennent particulièrement bien pour la réalisation « pratique » de ce type de composants [Figures 10.b et 11-haut]. Ils permettent d'éviter des problèmes de chromatisme mais présentent des discontinuités aux bords des cadrans qui pourraient « masquer » des compagnons d'étoiles malencontreusement situés dans cette zone. Les discontinuités peuvent être évitées de deux manières : soit à l'aide de réseaux sub-longueur d'onde annulaires : cf. **AGPM** [Figure 11], soit à l'aide de coronographes vortex fonctionnant sur le même principe mais en modifiant la phase lors de la traversée du masque : l'ajout de phase varie selon une structure hélicoïdale dans le masque : cf. **VVC** (Vector

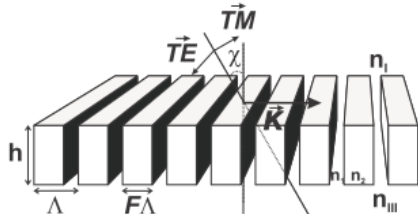
22. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Coronographie>

23. François Roddier and Claude Roddier, *Stellar coronagraph with phase mask*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 109 (737) (1997), 815–820

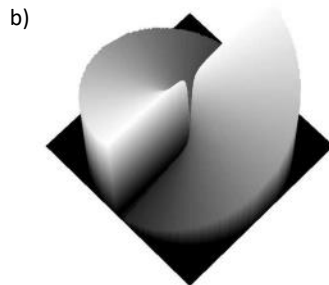
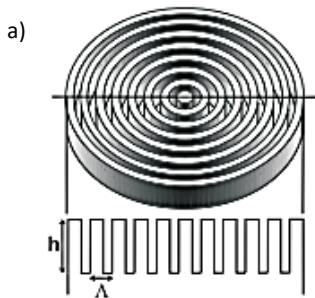
24. **Daniel Rouan**, Pierre Riaud, A. Boccaletti, Y. Clénet, and Antoine Labeyrie, *The four-quadrant phase-mask coronagraph. i. principle*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific 112 (777) (2000), 1479–1486 ; **Pierre Riaud**, A. Boccaletti, J. Baudrand, and **Daniel Rouan**, *The four-quadrant phase mask coronagraph. iii. laboratory performance*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific 115(808) (2003), 712–719 ; **A. Boccaletti**, Pierre Riaud, P. Baudoz, J. Baudrand, **Daniel Rouan**, D. Gratadour, F. Lacombe, and A.M. Lagrange, *The four-quadrant phase mask coronagraph. iv. first light at the very large telescope*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific 116 (825) (2004), 1061–1071

Vortex Coronagraph) [Figure 12]. Chaque méthode présente « ses avantages » et « ses défauts » comme la difficulté de produire les caractéristiques optimales des réseaux sub-longueur d'onde ou celle de produire l'orientation correcte des cristaux liquides au centre du retardeur. Les deux approches ont été adoptées et perfectionnées à Liège.

Figure 11 – Réseaux sub-longueur d'onde pour la coronagraphie – Masque de phase annulaire



Paramètres caractéristiques d'un réseau sub-longueur d'onde²⁵
 $K = 2\pi/\Lambda$ est le vecteur du réseau, perpendiculaire aux traits du réseau, Λ la période spatiale, h la profondeur des traits du réseau et F le facteur de remplissage tel que $F\Lambda$ est la largeur des arêtes du réseau
 TE (transverse électrique mode) et TM (transverse magnétique mode) sont les composantes de l'état de polarisation du faisceau lumineux incident
 n_I et n_{III} sont les indices de réfraction des milieux incident et transmetteur. n_1 et n_2 sont les indices de réfraction du réseau (ici $n_1 = n_I$ et $n_2 = n_{III}$)



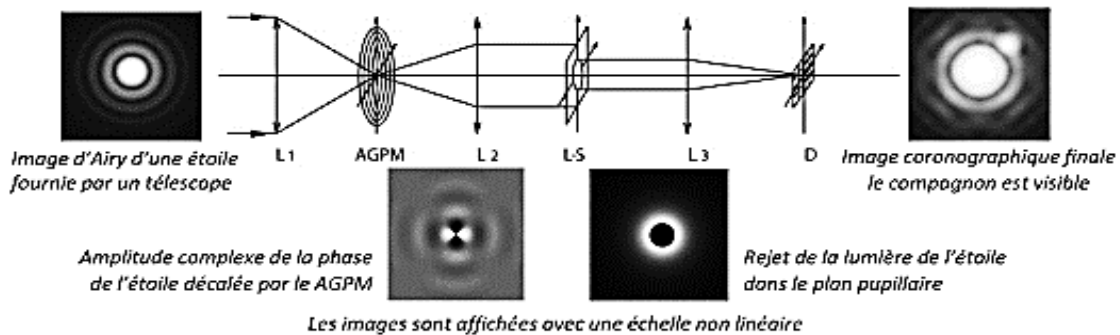
a) AGPM (Annular Groove Phase Mask)²⁵

Schéma de principe d'un masque de phase à rainures rectangulaires circulairement concentriques satisfaisant aux conditions ZOG (Zero Order Grating) et HWP (Halfwave Plate)

b) Rampe de phase de l'AGPM menant à la génération de vortex

c) Schéma de base du banc optique coronagraphique AGPM : principe

c) L1, L2, L3 : lentilles ; L-S : diaphragme éliminant la lumière diffractée par l'étoile
 L3 forme l'image coronagraphique sur le détecteur D



- Plusieurs dispositifs ont été développés dont les « réseaux microstructurés sub-longueur d'onde » qui sont particulièrement appropriés pour les applications dans l'infrarouge moyen où ils présentent une solution originale presque unique en son genre. Des lames demi-onde pour l'infrarouge moyen, capables de modifier la polarisation de la lumière, ont permis de dégrossir le problème. Elles servent de base au coronographe AGPM (Annular Groove Phase Mask) installé au foyer d'un télescope Cassegrain de 8 mètres au VLT : instruments NACO et VISIR (VLT Imager and Spectrometer for mid-InfraRed) pour l'observation dans le domaine de l'infra-rouge thermique (8-28 μm - 2012)^{26,27}.

25. Dimitri Mawet, Pierre Riaud, Olivier Absil, and Jean Surdej, *Annular Groove Phase Mask Coronagraph*, The Astrophysical Journal, 633 (2005), 1191-1200 ; Dimitri Mawet, Pierre Riaud, Charles Hanot, Denis Vandormael, Jerome Loicq, Jacques Baudrand, Jean Surdej and Serge Habraken, *The Annular Groove Phase Mask coronagraph: an achromatic optical vortex*, Techniques and Instrumentation for Detection of Exoplanets III, edited by Daniel R. Coulter, Proc. SPIE Vol. 6693, 66931 (2007), 9 pages

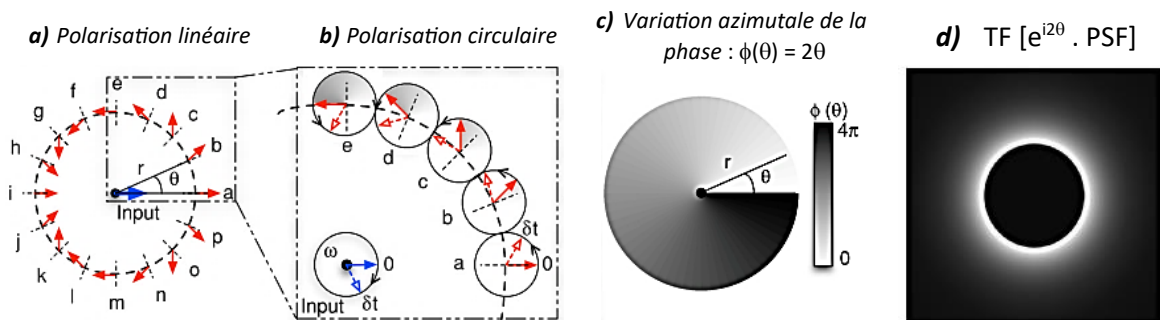
26. VISIR au VLT : https://irfu.cea.fr/dap/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast_sstechnique.php?id_ast=1098

27. Dimitri Mawet, N. Murakami, Christian Delacroix, E. Serabyn, Olivier Absil, N. Baba, J. Baudrand, A. Boccaletti, R. Burruss, R. Chipman, P. Forsberg, Serge Habraken, S. Hamaguchi, C. Hanot, A. Ise, M. Karlsson, B. Kern, J. Krist, A. Kuhnert, M. Levine, K. Liewer, S. McClain, S. McEldowney, B. Mennesson, D. Moody, H. Murakami, A. Niessner, J. Nishikawa, N. O'Brien, K. Oka, P. Park, Pierre Piron, L. Pueyo, P. Riaud, M. Sakamoto, M. Tamura, J. Trauger, D. Shemo, Jean Surdej, N. Tabirian, W.

- Parmi les propriétés de la lumière, **la polarisation** est quasiment inobservable par l'œil. Nous pouvons voir la différence entre des faisceaux rouge et bleu, des faisceaux collimaté et divergent mais nous sommes incapables de distinguer différents états de polarisation sans l'aide d'instruments. Et pourtant, nous avons appris à manipuler ces états au cours des dernières décennies, notamment en concevant et réalisant des (co-)HOEs spécifiquement dédiés pour ces opérations. Des dispositifs intégrés statiques et dynamiques sont capables d'effectuer des opérations complexes telles le multiplexage / démultiplexage de signaux et/ou d'informations en « jouant » avec les états de polarisation TE (Transverse Electric mode) et TM (Transverse Magnetic mode) ⁵.

Il est possible de concevoir un coronographe basé sur un dispositif « **retardeur de phase à variation spatiale (SR)** ». Un tel dispositif était réputé irréalisable il y a quelques années, trop complexe avec les moyens disponibles. Une des méthodes « les plus simples » (si l'on peut dire) pour y parvenir consiste à créer un faisceau polarisé à variation spatiale : un « **vortex d'états de polarisation** ». La réalisation est devenue possible grâce à la construction d'un retardateur à variation spatiale avec des polymères à cristaux liquides capable de « traiter » des faisceaux polarisés différemment. Le retardateur a été spécifiquement formaté pour une application particulière, la coronographie [Figures 12 et 13] ²⁸.

Figure 12 - Représentation schématique du fonctionnement d'un coronographe à vortex vectoriel
VVC (Vector Vortex Coronagraph) : Variation azimutale de la phase ²⁰



a) **HPW (Half Wave Plate)** : Lame demi-onde à symétrie de rotation avec une orientation d'axe optique qui tourne autour du centre : lignes pointillées perpendiculaires à la circonférence. L'effet net d'une HWP sur une polarisation linéaire incidente est de la faire pivoter de $-2 \times \alpha$, où α est l'angle entre la direction de la polarisation entrante et l'axe optique rapide. Une polarisation horizontale entrante (flèche bleue) est transformée par le vortex vectoriel de sorte qu'elle tourne autour de son centre deux fois plus vite que la coordonnée azimutale θ (flèches rouges).

b) Pour la polarisation circulaire, la rotation du champ de sortie est strictement équivalente à un retard de phase (l'angle de départ 0 a tourné et est donc déphasé). L'angle de rotation locale du vecteur polarisation correspond à une phase « géométrique » : lors d'une rotation complète autour du centre de la HWP à symétrie de rotation, il a subi une variation de phase totale de $2 \times 2\pi$, ce qui correspond à la définition d'un vortex optique de charge topologique 2

c) Lors de la propagation du signal du plan focal au plan pupillaire suivant, la transformée de Fourier (FT) du produit de la fonction d'étalement du point (PSF : Point Spread Function) par la variation azimutale de phase « envoie » la lumière en dehors de la zone pupillaire d'origine (d). Elle peut alors être « supprimée » par un diaphragme de Lyot de même taille ou légèrement plus petite que la pupille d'entrée.

Un montage inédit ²⁹ a été conçu sur base du coronographe à quatre cadrans. Le banc d'enregistrement des vortex déphaseurs sur les couches photopolymères combine deux lames de

Traub, J. Wallace, K. Yokochi, *Taking the vector vortex coronagraph to the next level for ground- and spacebased exoplanet imaging instruments: review of technology developments in the USA, Japan, and Europe*, Techniques and Instrumentation for Detection of Exoplanets V (S. Shaklan, ed.), Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, vol. 8151, 10 (2011), p. 815108 - 14 pages ; **Christian Delacroix**, *Exoplanet imaging with mid-infrared vector vortex coronagraphs: design, manufacture, validation and first light of the annular groove phase mask*, thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences Physiques, Université de Liège (25-06-2013)

28. Pierre Piron, *Space-variant optical phase retarders in liquid crystal polymers and their applications*, thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences Physiques, Université de Liège (10-02-2014)

29. **Pierre Piron**, Pascal Blain, Serge Habraken, and Dimitri Mawet, *Polarization holography for vortex retarders recording*, Applied Optics, 52 (2013), 7040–7048 ; **Pierre Piron**, Pascal Blain, Marc Décultot, Dimitri Mawet and Serge Habraken, *Polarization holography for vortex retarders recording: laboratory demonstration*, Applied Optics, 54 (2015), 4765-4770

Savart croisées et des lames quart d'onde agencées pour produire quatre retardeurs correctement polarisés [Figure 14], dispositif présentant l'avantage d'être particulièrement compact et robuste.

Figure 13 - **Résumé** : Représentation d'un vortex retardateur de phase et de la phase du faisceau transmis



a) Variation de l'axe rapide, en pointillés bleus, il tourne le long du centre pour un rotation totale de 2π

b) Distribution hélicoïdale de la phase d'un faisceau transmis par le vortex

Figure 14 – **Montage expérimental pour l'enregistrement des vortex retardeurs de phase** ²⁸Erreur ! Signet non défini.

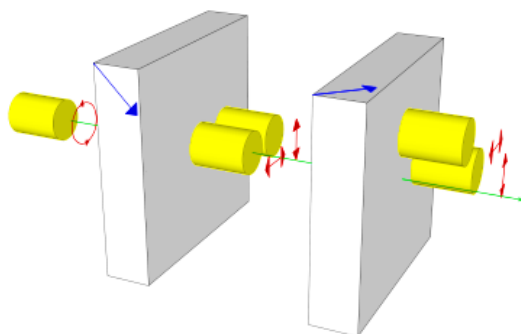
Le matériau utilisé pour l'enregistrement du retardeur comporte deux couches dont seule la première est un photopolymère sensible dans l'UV. L'exposition est détaillée ci-dessous. La seconde est un polymère à cristaux liquides qui s'orienteront en fonction de la distribution des champs électriques enregistrés dans la première couche



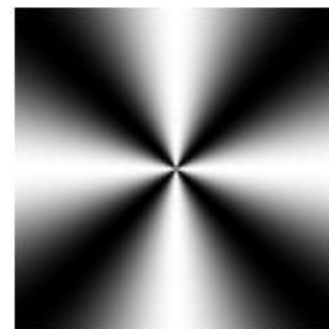
Les faisceaux sont représentés en bleu et leur état de polarisation en rouge

BE : élargisseur de faisceau ; p_1 : polariseur linéaire vertical ; $\lambda/4$: lames quart d'onde ; S_1 et S_2 : lames de Savart
La première lame de Savart sépare les faisceaux verticalement, la seconde agit horizontalement ce qui produit quatre faisceaux de même intensité puisque les faisceaux incidents étaient polarisés circulairement

En réalité, les faisceaux sont plus larges que représentés et se superposent sur le matériau photosensible















Lame de Savart « éclatée » - en réalité les deux composantes biréfringentes sont accolées *



Intensité transmise par un vortex « idéal » de charge topologique 2 [cf. Figure 12.b]

*) Une lame de Savart consiste en deux cristaux biréfringents uniaxes identiques, généralement de calcite ou de quartz, taillés à 45° par rapport au plan normal et accolés de manière telle que leurs axes optiques soient perpendiculaires entre eux. Dans ces conditions, le rayon ordinaire du premier cristal coïncide avec le rayon extraordinaire du second, et vice-versa. Par biréfringence, une lame de Savart cisaille le rayon incident en deux rayons décalés transversalement d'une distance proportionnelle à l'épaisseur des cristaux. Les deux faisceaux cisailés sont partiellement superposés et colinéaires alors que les autres prismes biréfringents livrent des faisceaux avec un angle entre eux ³⁰

30. Fabrice Michel, *Métrieologie optique Métrieologie optique : développements pour la shearographie développements pour la shearographie et extrapolation à la projection de franges*, thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences Physiques, Université de Liège (12-09-2011)

Les précurseurs . . .		Les pionniers . . .		Aujourd'hui	
Recherche et détection d'exoplanètes Coronographie		
Pr Jean Surdej PhD ULg 1979 AES ULg 1991 Dept AGO	Pr Olivier Absil PhD ULg 2006 Dept AGO-ULg	Pr Dimitri Mawet PhD ULg 2006 Dept AGO & HOLOLAB Caltech – Ca. USA	Dr Christian Delacroix PhD ULg 2013 Dept AGO & HOLOLAB Dept AGO-ULg	Dr Pierre Piron PhD ULg 2014 HOLOLAB TU-Delft NL	Dr Pascal Blain PhD ULg 2014 HOLOLAB CSL - ULg
					
Pr Serge Habraken PhD ULg 1995 HOLOLAB CSL, Dept AGO-ULg	Dr Vincent Moreau PhD ULg 2001 HOLOLAB AMOS s.a.- Lg	Dr Cédric Lenaerts PhD ULg 2005 HOLOLAB CSL - ULg	Pr Jérôme Loïcq PhD ULg 2004 HOLOLAB CSL & TU-Delft NL	Dr Fabian Languy PhD ULg 2012 HOLOLAB CSL - ULg	Dr Bernard Sabushimike PhD ULg 2020 HOLOLAB Dir. Tech. OSA
					
Composants sensibles à la polarisation Correcteurs, concentrateurs, composants mixtes		

Dr Georges Horugavye, PhD ULg 2023

On ne peut pas parler d'exoplanètes sans évoquer **un événement majeur** des dernières années **révélé** au grand public **le 22 février 2017** lors d'une conférence de presse internationale au siège de la NASA et via une publication dans la prestigieuse revue scientifique *Nature* : **la découverte et l'étude d'un système de sept exoplanètes semblables à la Terre, le système Trappist**^{31,32}, par une équipe d'astrophysiciens liégeois entre 2015 et 2017 à partir d'observations faites à l'aide du **télescope belge Trappist** (the TRAnsiting Planets and Planetesimals Small Telescope) installé sur deux sites : *la Silla* (Chili) et *Oukaimeden* (Maroc). Les informations fournies par ces deux instruments ont été croisées et complétées par celles de quatre autres sites basés aux Canaries, à Hawaï, en Afrique du Sud et une observation durant une vingtaine de jours à l'aide du télescope spatial *Spitzer* qui a permis de découvrir les quatre dernières planètes.

Michaël Gillon³³ est le responsable scientifique du volet exoplanètes du projet Trappist qui a participé à la détection de plus d'une centaine d'exoplanètes en transit, il dirige le groupe ainsi que le

31. Christian Du Brulle, *Sept exoplanètes découvertes par les astronomes liégeois* – 22 février 2017, Daily Science ; <https://dailyscience.be/22/02/2017/sept-exoplanetes-decouvertes-par-les-astronomes-liegeois/>

32. Michaël Gillon, Amaury H. M. J. Triaud, Brice-Olivier Demory, Emmanuël Jehin, Eric Agol, Katherine M. Deck, Susan M. Lederer, Julien de Wit, Artem Burdanov, James G. Ingalls, Emeline Bolmont, Jeremy Leconte, Sean N. Raymond, Franck Selsis, Martin Turbet, Khalid Barkaoui, Adam Burgasser, Matthew R. Burleigh, Sean J. Carey, Aleksander Chaushev, Chris M. Copperwheat, Laetitia Delrez, Catarina S. Fernandes, Daniel L. Holdsworth, Enrico J. Kotze, Valérie Van Grootel, Yaseen Almkleay, Zouhair Benkhaldoun, Pierre Magain & Didier Queloz, *Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1*, *Nature*, **542** (23 February 2017), 456–460

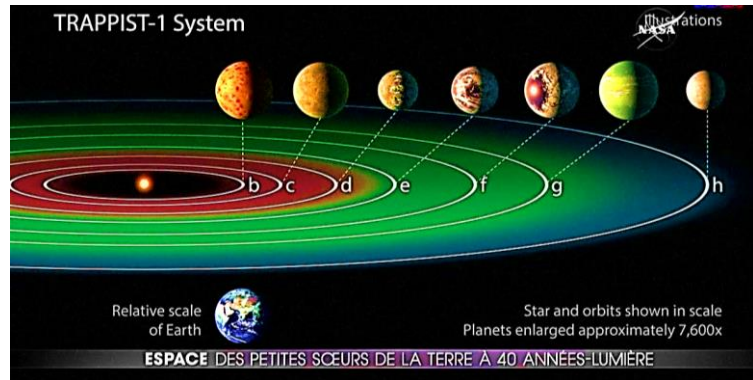
33. <https://www.wawmagazine.be/fr/michael-gillon-le-nouveau-copernic> ; https://www.uliege.be/cms/c_9054334/fr/repertoire?uid=u193465 ; https://fr.wikipedia.org/wiki/Micha%C3%ABl_Gillon

projet SPECULOOS (Serach for habitable Planets Eclipsing ULtra-coOL Stars) qui cible l'étude des naines rouges ultra froides pour détecter des planètes potentiellement habitables. Il a obtenu le prestigieux *prix Francqui 2021* après avoir été classé dans la liste des *100 personnes les plus influentes par le Time Magazine en 2017*.



Le Dr Emmanuel Jehin et le Pr Michael Gillon
 Découvreurs du système Trappist
 (Dept AGO – ULiege)

Figure 15 – Projet Trappist



Quelques applications développées par des équipes universitaires

En terminant, je voudrais rappeler que *plusieurs équipes de l'ULiege ont développé des applications de l'holographie dans des domaines autres que le spatial, aussi différents que l'archéologie, le médical et l'industrie sidérurgique.*

Le système d'éclairage (lentilles diffractives) et la visière holographique de la *Luminette*® ont été conçus et mis au point au **HOLOLAB** (Dr Vincent Moreau, Prs Yves Lion et Yvon Renotte : *projet ECLAT - Emission Ciblée de Lumière Ana-Thymique 2001-03 **) en collaboration avec le **CETES** (Pr Robert Poirrier, Centre d'Étude des États de l'Éveil et du Sommeil, CHU – Liège) et la société *Schröder s.a.* (Constructions électriques, Experts en éclairage – Ans). L'originalité du dispositif réside dans sa compacité et sa légèreté par rapport à la concurrence : les HOEs de la visière, associés à des rampes de LEDs adressent directement la lumière « active thérapeutiquement » dans une partie non-imageante de la rétine, ce qui évite les éblouissements caractéristiques des casques et bancs antérieurs et permet d'accomplir diverses activités pendant le traitement. Le brevet est aujourd'hui exploité par une PME régionale, *Lucimed s.a.*^{2,34,35}.

En collaboration avec le **CEA** (Centre Européen d'Archéométrie - ULiege) et le **Département d'Égyptologie** (Pr Dimitri Laboury), le **HOLOLAB** a développé un *scanner 3D* fonctionnant sur le principe du moiré optique, avec pour composant de base un DOE spécifique séparant les états de polarisation TE et TM d'un faisceau lumineux cohérent associé à un dispositif permettant de les « manipuler » pour construire, piloter et projeter des systèmes de franges « *sur mesure* » sur les objets d'intérêt en même temps qu'une caméra couplée au projecteur enregistre et traite les figures de moiré³⁶ (projets *OSIRIS - Optical Systems for Interferometric Relief Investigation and Scanning*, *DEIOS - Development and*

34. Yvon Renotte, *Au croisement de l'Optique et de la Photométrie* : « *La Luminette*® », Science et Culture, 407 (mai – juin 2007), 75–83, <http://hdl.handle.net/2268/258701> ; présentation à l'U3A, 12-10-2010, <https://hdl.handle.net/2268/302979>

35. *Lucimed s.a.*, 4530 Villers-le-Bouillet, Belgique, www.lucimed.com

36. Yvon Renotte, Dimitri Laboury, Bernard Tilkens et Vincent Moreau, *Au croisement de la Physique et de l'Archéologie: le projet OSIRIS (Optical Systems for Interferometric Relief Investigation and Scanning), Projet de développement d'un système de relevé numérique des documents archéologiques et épigraphiques en trois dimensions par des procédés optoélectroniques*, Science et Culture, 390 (2004), 74-80, <http://hdl.handle.net/2268/259746> et *Europhysics News*, 35 / 6, (2004), 205-207, <http://hdl.handle.net/2268/98602> ; Vincent Moreau, Bernard Tilkens, Dimitri Laboury et Yvon Renotte, *Interferometric fringes projection system for 3D profilometry and relief investigation*, *Optical Metrology* (12 – 16 June 2005), Munich (Germany) : *Optical Methods for Arts and Archaeology*, Proc. SPIE 5857, paper # 5857-0A, (2005), 62-69, <http://hdl.handle.net/2268/153984>

Enhancement of Interferometric Optical Systems 2001-05 *, et PLATON – projet First Europe Liège-Glasgow 2004-08) . L'outil a été utilisé par plusieurs musées et sur plusieurs sites archéologiques (Le Louvre, le British Museum, . . .). Il permet notamment le relevé en 3D de la **Maquette Ruhl** de la ville de Liège (18^e siècle) conservée à la bibliothèque centrale de l'Université de Liège, avant d'entreprendre sa réfection : travail effectué en collaboration avec le **Réseau des Bibliothèques**, le **CEA** et l'**Unité de Géomatique** (Pr Roland Billen, Dept de Géographie - ULiège). Une projection 3D fut présentée dans le cadre de 3D Stereo Media 2009 ³⁷.

L'outil, issu de la conservation du patrimoine, initialement construit et commercialisé par la spin-off **DEIOS s.a.**, fut ultérieurement adapté et exploité dans des domaines totalement différents, *en médecine* (Pr Michel de la Brassine et Dr Olivier Vanhooetghem, **Département de Dermatologie**, CHU – Liège) ³⁸, *en métrologie optique* (projet *ShearoScan : EMS – European Metrology System s.a.*, Milmort) ³⁹ et *en sidérurgie* . . . « admirez le grand écart ! ». La société **CMI s.a.** (Cockerill Maintenance & Ingénierie - Seraing) s'est associée au **HOLOLAB** pour modifier le scanner DEIOS afin de l'implémenter sur des chaînes de production pour surveiller l'usure et l'état de surface des rouleaux de four (mesure de forme) et enducteurs (détection des défauts du revêtement, éventuellement cachés) quasiment en temps réel (*projet MINT, Maintenance INTelligente en sidérurgie 2008-12 **) ⁴⁰. Les fonctions de scanning 3D (moiré optique par projection de franges) et de détection (cisaillement optique) ont été intégrées ultérieurement dans un même boîtier ⁴⁰.

Les instruments évoqués sont décrits dans des notes, articles, thèses, mémoires et brevets spécifiques ^{34 à 40}.

*) projet subventionné par la **DGTRE** (Direction Générale des Technologies, de la Recherche et de l'Energie - Division de la Recherche et de la Coopération Scientifique - Direction de la Recherche), *Ministère de la Région Wallonne*

Dès le début des années '80, le **Laboratoire de Biophysique** (Pr Michel Delmelle), en collaboration avec le Pr Albert Galand (**Département d'Ophthalmologie**, CHU-Liège), ont conçu, mis au point et réalisé de *nouveaux implants intra-oculaires pour le traitement et la correction de la vision après chirurgie de la cataracte*, spécialement adaptés à la fixation capsulaire. Baptisé « *Disc-Lens* », le premier modèle était un implant monobloc en polyméthylmethacrylate de qualité « clinique, absorbant l'UV ». Le disque de 9 mm de diamètre et 0,2 mm d'épaisseur, comporte une optique biconvexe centrale de 7 mm de diamètre [Figure 16]. L'implant a un poids 3 à 4 fois inférieur à celui du cristallin naturel. Gratifié d'excellents résultats cliniques, Il a rapidement rencontré un grand succès tant en Belgique qu'à l'étranger. Dans un premier temps, les activités R&D ont été transférées à la **PME PhysiOL s.a.** ⁴¹ sur le

37. Roland Billen, Pascal Blain, Olivier Donneau, Serge Habraken, Yvon Renotte, Muriel Van Ryumbeke, *Virtual model of the city of Liège in the eighteen century - "Virtual Leodium"*, Proc. 3D Stereo Media 2009 - International 3D Stereo Film and Technology Festival, Liège, Belgium (1-3 Dec. 2009), *presentation* : Yvon Renotte, <http://hdl.handle.net/2268/263275>

38. Olivier Vanhooetghem, Pascal Blain, Vincent Moreau, Fabrice Michel, Michel de la Brassinne, Yvon Renotte, Serge Habraken, *Non invasive 3-D scanning of lower limb wound : an evolution analysis of their parameters*, BIOMEDICA 2009, Liège (1^{er} et 2 avril 2009), poster, <http://hdl.handle.net/2268/263101> ; Olivier Vanhooetghem, Pascal Blain, Michel de la Brassinne, Yvon Renotte, Grégory Martin et Serge Habraken, *An easier measurement of the parameters evolution analysis of lower limb wound: The non invasive 3-D scanning*, EDAV 2009 Berlin - Germany (18th Congress of the European Academy of Dermatology and Venereology) ICC Berlin (7 – 11 October 2009), poster number P1552 / *presentation* : Olivier Vanhooetghem,

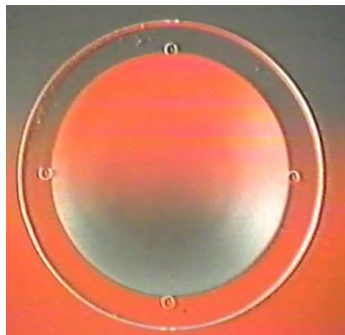
39. **Vanessa Rosso**, *Conception et réalisation d'un dispositif interférométrique de shearographie. Application en milieu diffusant*, thèse présentée pour l'obtention du titre de Docteur en Sciences, Université de Liège (10 décembre 2007) ; **Fabrice Michel**, *Métrologie optique : développements pour la shearographie et extrapolation à la projection de franges* ; thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences, Université de Liège (12 septembre 2011)

40. **Pascal Blain**, *Éléments optiques biréfringents pour interféromètre à chemins optiques quasi-communs* ; thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences, Université de Liège (17 mars 2014) ; **Pascal Blain**, Yvon Renotte et Serge Habraken (HOLOLAB – ULiège), Pascal Warroux (CMI Group - Seraing), *Low coherence interferometric system for phase stepping shearography combined with 3D profilometry*, Brevet d'invention EP US CN JP PT US8873068B2 (dépôt : novembre 05-12-2011 – accepté 04-12-2012 – publié 28-10-2014), <http://hdl.handle.net/2268/263246>

41. **PhysiOL s.a.**, <https://www.polemecatech.be/fr/member/physiol/>

Parc Scientifique du Sart Tilman – Liège, elle-même incluse dans une société plus large *BVI – PhysiOL s.a.*®, conceptrice et distributrice d’instruments chirurgicaux pour l’ophtalmologie⁴². Des lentilles intra-oculaires (*LIO*) avec une/des zone(s) diffractive(s) ont également été mises au point en même temps que de nouveaux matériaux été testés⁴³.

Figure 16 – Implants intra-oculaires



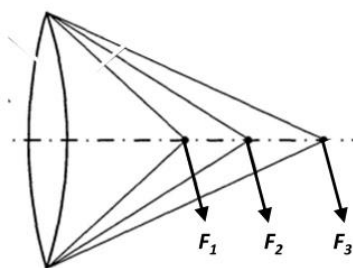
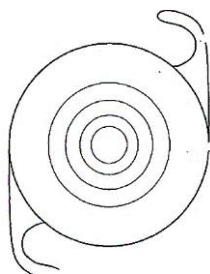
Disc-Lens - LIO PhysiOL s.a.



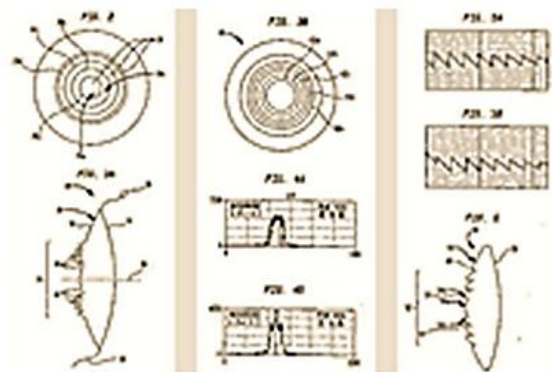
Aphaque et placement de l'implant



Premium Monofocal – IOL BVI



Lentille intra-oculaire (diffractive) multifocale PhysiOL® un foyer pour la vision lointaine, un pour la vision intermédiaire, un pour la vision rapprochée : schéma de principe⁴³



Lentille intra-oculaire (diffractive) multifocale⁴³ Alcon Research LLC®

Merci à Jean Surdej, Serge Habraken, Pierre Slangen, Vincent Moreau, Olivier Absil, Jérôme Loïcq, Cédric Lenaerts, Dimitri Mawet, Fabian Languy, Christian Delacroix, Pierre Piron, Pascal Blain, Bernard Sabushimike, Georges Horugavye, Michael Gillon, Emmanuel Jehin, Yaël Nazé, Stéphane Dorbolo et Dimitri Laboury pour leurs soutiens et encouragements.

Toutes mes excuses à celles et ceux que j’oublie.

In memoriam : à notre collègue Jean-Pierre Swings (1943-2023) qui a constamment encouragé et soutenu mon action à l’encontre des abus de qualification des pseudos et faux hologrammes.

42. *BVI – PhysiOL s.a.*, Beaver® (couteaux et lames), Visitec® (canules), Malosa® (instruments à usage unique), Vitreco® (produits chirurgicaux vitréorétiniens) et PhysiOL® (LIO haut de gamme), <https://www.bvimedical.com/who-we-are/>

43. Yvette A. J. Houbrechts, Christophe R. M. A. Pagnouille, Damien Gatinel, *Lentille intraoculaire multifocale comportant plusieurs profils diffractifs*, PhysiOL s.a. (2012) ; <https://patents.google.com/patent/BE1019161A5/fr> Michael Simpson, *Lentille intraoculaire apodisée avec une région diffractive frustrée*, Alcon Research LLC (2013) ; [https://patents.google.com/patent/EP2286765B1/fr?q=\(G02B5%2f1876\)](https://patents.google.com/patent/EP2286765B1/fr?q=(G02B5%2f1876))