

QuinteSciences

De l'Optique électromagnétique à l'Interférométrie

Concepts et Illustrations

Michel Lequime et Claude Amra

De l'Optique électromagnétique à l'Interférométrie

Vj k'ŕ ci g'kpvkqpcmf 'igh'dŕc pm

De l'Optique électromagnétique à l'Interférométrie

Concepts et illustrations

Michel Lequime et Claude Amra

Ouvrage écrit avec la participation de Carole Deumié
Professeur et directrice de la formation à Centrale Marseille

Illustration de couverture : à gauche : composant multicouche conçu pour une exaltation optique géante, visualisation des résonances en espace libre par couplage des modes et amplification de la diffusion ; au centre : front d'onde délivré par un système optique à pupille circulaire présentant une aberration sphérique du 3^e ordre (mise au point réalisée au meilleur foyer) ; à droite : interférogramme du front d'onde présenté sur la figure centrale.

Imprimé en France
ISBN : 978-2-7598-1022-2

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2013

Quelques mots sur les auteurs



Michel Lequime est Professeur d'Optique à l'École Centrale Marseille et responsable de l'équipe Couches Minces Optiques de l'Institut Fresnel.

Michel LEQUIME est titulaire d'un diplôme d'Ingénieur de l'Institut d'Optique Graduate School (1974), d'un DEA de Physique atomique et moléculaire (1975) et d'un Doctorat de l'université Paris-Sud (*Processus optiques du 3^e ordre en régime picoseconde*, 1977), ainsi que d'une Habilitation à Diriger des Recherches délivrée par l'université d'Aix-Marseille (*Application de l'interférométrie en lumière blanche à la réalisation de capteurs à fibres optiques à usage industriel*, 1996).

Après avoir débuté sa carrière comme Attaché de recherche au CNRS (Laboratoire d'optique quantique de l'École Polytechnique), il a rejoint en 1979 la société de recherche sous contrat BERTIN & Cie, où il a participé à la création et au

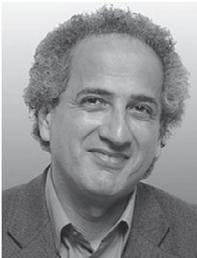
développement d'une activité centrée sur l'optique et l'optoélectronique. Les projets dans lesquels il s'est impliqué ont majoritairement concerné le domaine des capteurs à fibres optiques (centrale de mesure pour réseau de capteurs à codage de modulation spectrale, système dédié à la mesure de la pression et de la température en fond de puits de pétrole) et celui de l'optique spatiale (téléscope de la caméra HMC équipant la sonde européenne Giotto, Balise à fibres optiques de l'expérience de télécommunications optiques intersatellites SILEX).

En 1998, il a quitté BERTIN et participé à la création d'une start-up, *Light Technologies*, qui visait à développer les applications industrielles des diodes électroluminescentes de puissance qui commençaient alors à être commercialement disponibles (source bleue de polymérisation en bouche de composites dentaires, système de contrôle en ligne de la coloration de produits pétroliers).

En 2000, il a été recruté par l'École Nationale Supérieure de Physique de Marseille (aujourd'hui devenue Centrale Marseille) comme Professeur en Optique et en Gestion de projet, et il a ensuite pris, en 2002, la responsabilité de l'équipe RCMO (**R**echerche en **C**ouches **M**inces **O**ptiques) de l'Institut Fresnel.

Les travaux actuels de Michel LEQUIME portent principalement sur la modélisation des propriétés spectrales des cavités planaires multicouches, sur la réalisation de composants de filtrage à forte structuration spatiale, et sur le développement de montages permettant l'enregistrement des propriétés angulaires, spatiales, spectrales et polarimétriques de la lumière diffusée par des surfaces ou des milieux stratifiés.

Il est auteur de plus de 40 publications dans des revues internationales à comité de lecture et de 140 communications dans des conférences nationales et internationales. Il a en outre occupé le poste de Président du Comité Stratégique du pôle OPTITEC de 2006 à 2008 et celui de Secrétaire de la Société Française d'Optique de 2009 à 2013.



Claude Amra est Directeur de Recherche au CNRS et responsable de l'équipe CONCEPT de l'Institut Fresnel.

Claude AMRA intègre le CNRS en 1986 après une thèse portant sur la diffusion de la lumière par les surfaces des filtres interférentiels multicouches (Laboratoire d'Optique des Surfaces et des Couches Minces, ESA CNRS, École Nationale Supérieure de Physique de Marseille). Ses travaux l'amènent à étendre la modélisation électromagnétique au cas des volumes hétérogènes puis aux microcavités luminescentes,

pour l'optique en espace libre et pour l'optique modale. Parallèlement il se forme à la métrologie optique et adresse les problèmes inverses inhérents à la caractérisation des milieux désordonnés, avant de s'impliquer dans la technologie des couches minces optiques.

Après une Habilitation à Diriger des Recherches soutenue en 1991 à l'université d'Aix-Marseille, il initie ou contribue activement à l'introduction de nouveaux thèmes au LOSCM : endommagement laser et thermique photo-induite, microscopie à force atomique et rugosité multi-échelle, lumière piégée, microcavités, ellipsométrie de speckle, absorbeurs de lumière achromatiques en couches minces, éclaireurs spectraux pour le moyen infra-rouge, multiplexage dense en longueur d'onde, technologies de dépôt par pulvérisation de faisceau d'ions...

En 1996, Claude AMRA se voit confier la direction du Laboratoire d'Optique des Surfaces et des Couches Minces, qu'il reconstruit thématiquement. En 2000, il est co-créateur de l'Institut Fresnel, une nouvelle unité mixte de recherche (CNRS, Aix-Marseille université, Centrale Marseille) qui rassemble sur le campus de Marseille-Nord l'ensemble des Sciences et technologies de l'optique, l'électromagnétisme et l'image. Au cours de ses 2 mandats de direction (2000-2008), l'Institut Fresnel émergera et s'ancrera sur la scène européenne, avec un bâtiment dédié.

En 2009, il est nommé Directeur adjoint scientifique de l'Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes du CNRS, en appui sur la section 8 du Comité National de la Recherche Scientifique (microélectronique, photonique, électromagnétisme, antennes, énergie électrique et nanotechnologies...). Auparavant il aura présidé ou participé à de nombreux comités auprès de l'ANR, l'AERES, le MESR, le CoNRS, le CNU, la région PACA et les pôles de compétitivité..., en parallèle de l'élaboration de nombreux congrès sur la scène internationale.

Les activités de recherche de Claude AMRA concernent aujourd'hui, dans le cadre de l'équipe CONCEPT qu'il anime à l'Institut Fresnel, l'imagerie en milieu complexe, la polarisation et la cohérence en milieu désordonné, le confinement et l'exaltation optique géante, l'analogie optique/thermique, le couplage optique électromagnétique/optique statistique...

Vj k' r ci g' k' v g p v k' p c m (' i g h ' d r e p m

Table des matières

Prologue	1
Partie 1 Optique électromagnétique	7
Chapitre 1 • Concepts de base en optique électromagnétique.....	9
<i>Chapitre conçu par Claude Amra rédigé par Michel Lequime et Claude Amra</i>	
Chapitre 2 • Régime harmonique	29
<i>Chapitre conçu par Claude Amra rédigé par Michel Lequime et Claude Amra</i>	
Chapitre 3 • Paquet d'ondes fréquentiel	51
<i>Chapitre conçu par Claude Amra et Michel Lequime rédigé par Michel Lequime et Claude Amra</i>	
Chapitre 4 • Paquet d'ondes spatial	71
<i>Chapitre conçu par Claude Amra et Michel Lequime rédigé par Michel Lequime et Claude Amra</i>	

Chapitre 5 • Composants planaires	87
<i>Chapitre conçu par Claude Amra</i>	
<i>rédigé par Claude Amra et Michel Lequime</i>	
Chapitre 6 • Énergie, causalité et coherence	123
<i>Chapitre conçu par Claude Amra et Michel Lequime</i>	
<i>rédigé par Claude Amra et Michel Lequime</i>	
Chapitre 7 • Approche microscopique	143
<i>Chapitre conçu par Carole Deumié</i>	
<i>rédigé par Michel Lequime et Carole Deumié</i>	
Chapitre 8 • Propagation en milieu anisotrope	153
<i>Chapitre conçu par Michel Lequime et Carole Deumié</i>	
<i>rédigé par et Michel Lequime</i>	
Chapitre 9 • Polarisation de la lumière	163
<i>Chapitre conçu par Michel Lequime</i>	
<i>rédigé par Michel Lequime</i>	
Partie 2 Formation des images	187
Chapitre 10 • Approximation de Fresnel	189
<i>Chapitre conçu par Michel Lequime</i>	
<i>rédigé par Michel Lequime et Claude Amra</i>	
Chapitre 11 • Réponse percussionnelle d'un système optique	205
<i>Chapitre conçu par Michel Lequime</i>	
<i>rédigé par Michel Lequime</i>	
Chapitre 12 • Formation des images	223
<i>Chapitre conçu par Michel Lequime</i>	
<i>rédigé par Michel Lequime</i>	
Chapitre 13 • Influence des aberrations	243
<i>Chapitre conçu par Michel Lequime</i>	
<i>rédigé par Michel Lequime</i>	
Chapitre 14 • Optique adaptative	263
<i>Chapitre conçu par Carole Deumié et Michel Lequime</i>	
<i>rédigé par Michel Lequime</i>	

Partie 3 Interférométrie	275
Chapitre 15 • Photo-détection et bruit	277
<i>Chapitre conçu par Michel Lequime</i> <i>rédigé par Michel Lequime</i>	
Chapitre 16 • Interférométrie et mesure de phase	301
<i>Chapitre conçu par Michel Lequime</i> <i>rédigé par Michel Lequime</i>	
Chapitre 17 • Interféromètres à 2 ondes.....	337
<i>Chapitre conçu par Michel Lequime</i> <i>rédigé par Michel Lequime</i>	
Chapitre 18 • Interféromètres à ondes multiples	369
<i>Chapitre conçu par Michel Lequime</i> <i>rédigé par Michel Lequime</i>	
Chapitre 19 • Interférométrie en lumière blanche	383
<i>Chapitre conçu par Michel Lequime</i> <i>rédigé par Michel Lequime</i>	
Chapitre 20 • Gyroscope à fibre optique	415
<i>Chapitre conçu par Michel Lequime</i> <i>rédigé par Michel Lequime</i>	
Chapitre 21 • Épilogue	441
<i>Chapitre conçu par Michel Lequime</i> <i>rédigé par Michel Lequime</i>	
Partie 4 Annexe	453
Annexe A • Outils mathématiques	455
<i>Annexe conçue par Michel Lequime</i> <i>rédigée par Michel Lequime et Claude Amra</i>	
Bibliographie	483
Index	485

Vj k' r ci g' k' p v k' p c m' ' i g h' d r c p m

Prologue

La rédaction de ce livre trouve son origine dans une réforme du cursus de l'**École Centrale Marseille**, qui, en 2009, a conduit à regrouper **Électromagnétisme et Optique** dans une seule et même unité d'enseignement du tronc commun de première année. Cette fusion thématique nous a en effet posé deux questions majeures auxquelles nous avons alors cherché à apporter des réponses qui soient à la fois cohérentes et ambitieuses :

- la première était relative à l'identification d'une démarche qui assurerait une transition aussi fluide que possible entre le formalisme de l'optique électromagnétique et celui de la formation des images. Cet élément de passage, à savoir la notion de **paquet d'ondes spatial**, a mis quelques mois à émerger avec clarté, mais une fois en place, elle a aussitôt induit la structuration recherchée et notamment permis de traiter la propagation en espace libre comme un filtrage dans l'espace des fréquences spatiales, et de mettre en évidence les similitudes d'approche qui existent entre composantes spatiales et fréquentielles du champ électromagnétique. Elle a aussi conduit à donner une place particulière à la **transformation de Fourier**, celle-ci apparaissant, à juste titre, comme l'outil mathématique qui fonde toute cette démarche ;
- la seconde a concerné le choix du contenu, car l'insertion dans un volume horaire spécifié (celui d'une unité d'enseignement de tronc commun) impose évidemment des choix, et donc des renoncements. C'est là que le souci d'une certaine

ambition nous a guidés, en décorrélant dans cette stratégie de choix la nature des coupes et la complexité des notions. Le résultat pourra être jugé difficile d'approche par certains, mais il nous semble en adéquation avec la formation de base d'un ingénieur à profil généraliste, pour lequel la **présentation des concepts** et l'**illustration de leur usage** sont plus importantes que la description détaillée des applications qui en découlent.

Il nous restait encore à définir comment obtenir, pour ce cours autant que pour l'ouvrage auquel nous souhaitons qu'il donne naissance, une unité d'écriture et de notations : ceci semblait délicat à atteindre puisque les intervenants étaient multiples et de formations initiales différentes. La solution que nous avons adoptée est somme toute assez simple : elle a consisté à ce que l'un d'entre nous (en l'occurrence, Michel Lequime) assiste, à l'instar d'un élève-ingénieur, aux cours dispensés par les deux autres enseignants et rédige, à partir de ses notes, une première version d'un texte qui, après relecture, correction, ajout et réorganisation, a servi de base à treize des quinze premiers chapitres de cet ouvrage, ainsi qu'à l'annexe consacrée aux outils mathématiques.

Une fois la structure de ce cours de tronc commun en place et, dans une certaine mesure, validée par le retour des élèves et par la perception pratique de sa cohérence qui a résulté de sa répétition magistrale, nous avons décidé d'aborder, avec le même crible de choix, la structuration finale de l'unité d'enseignement qui en est le prolongement dans le parcours de troisième année consacré à l'Optique et à la Photonique.

Ce dernier cours, initialement dénommé SIGNAUX OPTIQUES et dispensé par Michel Lequime, avait à l'origine pour objectifs de montrer comment il était possible de mesurer, puis d'utiliser les différentes grandeurs caractéristiques d'une onde optique que sont son amplitude, sa longueur d'onde, sa phase ou son état de polarisation. Un accent particulier a rapidement été mis sur ces deux dernières notions, compte tenu de leur importance conceptuelle et des nombreuses applications auxquelles elles donnent accès.

Plus de trois années ont été nécessaires pour parvenir à la version de cet ouvrage que nous avons la *faiblesse* de considérer comme consistante et dans le droit fil de nos objectifs initiaux. Rédiger un tel ouvrage aura été également riche d'enseignements, à la fois sur notre capacité, en tant que professeurs, à nous atteler à une tâche collective de définition du contenu d'un cours et de rédaction des supports qui lui sont associés, mais aussi en tant que chercheurs, tant il est vrai que le souci d'identifier un mode de présentation d'un concept le plus limpide possible aide à en percevoir les fondements, la structure et les implications.

La **table des matières** de cet ouvrage est restreinte à l'énoncé des seuls titres des chapitres qui le composent, de manière à ce que le lecteur en perçoive très rapidement la structure globale et puisse aussitôt basculer dans la lecture d'un chapitre particulier qu'il aura sélectionné en fonction de ses centres d'intérêt. Chaque chapitre débute à l'inverse par un **sommaire** qui permet d'appréhender dans le détail le périmètre scientifique qui est le sien.

Ce livre débute (**chapitre 1**) par une présentation détaillée des notions de base en OPTIQUE ÉLECTROMAGNÉTIQUE et montre comment il est possible de retrouver, à partir des équations de Maxwell indépendantes du temps, l'ensemble des lois physiques qui régissent l'électrostatique et la magnéto­statique, d'abord dans le vide, puis en présence de matière. Ceci permet d'introduire de manière consistante l'électromagnétisme en prenant en compte l'*inertie* de cette matière, c'est-à-dire le temps qu'elle met à *percevoir* les variations temporelles des sources.

Le **chapitre 2** est certainement l'un des plus importants de ce livre, d'abord parce qu'il illustre, pour la première fois dans le corps de cet ouvrage, l'impact de l'emploi de la transformation de Fourier sur la résolution du système d'équations différentielles couplées que constituent les équations de Maxwell, mais aussi parce qu'il explicite le fonctionnement pratique de la **séquence duale de décomposition spectrale et de reconstruction**, ici **temporelle**, d'un champ vectoriel. C'est également dans ce chapitre que se trouvent définis nombre des concepts qui seront ensuite utilisés tout au long de ce livre, et que nous décrivons en outre l'apport de la notion de distribution à la formulation de ces mêmes équations de Maxwell.

Le **chapitre 3** établit tout d'abord les conséquences pratiques du lien existant entre dépendances temporelle et fréquentielle d'un même champ et, notamment, l'existence d'une limite basse au **produit largeur de raie \times durée d'impulsion** que l'on identifie souvent, de manière quelque peu abusive, avec les relations d'incertitude d'Heisenberg. Puis il introduit, en toute généralité, le concept de **vitesse de groupe**, avant d'illustrer de façon pratique les conséquences de la **dispersion spectrale** des propriétés d'un milieu matériel sur le profil temporel d'une impulsion qui s'y propage.

Une fois défini ce premier cadre fréquentiel, il nous était alors possible de transposer cette approche *spectrale* à la résolution du problème posé par la dépendance *spatiale* des équations de Maxwell. C'est dans le **chapitre 4** que vont apparaître les notions de pulsations spatiales et de **paquet d'ondes spatial**, puis celles de composantes propagatives et de composantes **évanescentes** du champ. Et c'est là aussi que le mécanisme de conjugaison au sens de Fourier va faire apparaître la limite intrinsèque qu'impose à la résolution optique le filtrage de ces ondes évanescentes. Enfin, le calcul, en configuration 3D, du flux transporté par un paquet d'ondes planes nous donnera les bases théoriques nécessaires à une définition raisonnée de grandeurs photométriques aussi fondamentales que l'éclairage ou l'intensité.

Le **chapitre 5** illustre l'apport de cette approche par paquet d'ondes spatial à l'étude des propriétés optiques de composants planaires tels que les **filtres optiques interférentiels** et les **réseaux de diffraction**. Il permet d'introduire à cette occasion la notion centrale d'indice effectif, puis celle d'admittance complexe, qui la généralise au cas des ondes stationnaires. Il permet également de montrer la puissance de ce formalisme vis-à-vis de l'analyse des phénomènes de réflexion totale, puis de propagation guidée.

Notre présentation de l'Optique électromagnétique n'aurait pas été complète si nous avions passé sous silence des notions aussi importantes que celles de **bilan d'énergie en régime spatio-temporel** ou encore de **causalité**, dont la prise en compte conduit aux

fort justement célèbres relations de Kramers-Kronig. C'est donc l'objet du **chapitre 6** que de proposer une description détaillée de ces différentes notions, même s'il a aussi pour vocation d'aborder la notion de **signal analytique** ou encore de **cohérence** et de montrer dans ce dernier cas comment le caractère quadratique et intégrateur de la détection optique a des conséquences fondamentales sur l'existence ou la visibilité des phénomènes d'**interférences** entre deux champs électromagnétiques.

Ces 6 premiers chapitres s'inscrivaient à l'évidence dans une approche macroscopique des phénomènes. À l'inverse, le **chapitre 7** montre comment il est possible de retrouver la relation entre polarisation de la matière et champ appliqué à partir d'une **description microscopique** de ces mêmes sujets. Les conséquences pratiques d'une telle approche sont en particulier illustrées dans le cas des matériaux diélectriques, pour lesquels la polarisabilité est majoritairement d'origine électronique.

Même si l'état de polarisation de l'onde lumineuse a un impact important sur les propriétés optiques des milieux stratifiés, il n'influence que fort peu la démarche qui fonde leur étude : ce n'est évidemment plus le cas lorsque l'on s'intéresse aux **milieux anisotropes**, qui constituent l'objet du **chapitre 8** et où seront introduites les notions clés d'état propre de propagation du champ, d'ellipsoïde des indices et de lames *bi réfringentes* (la césure anormale étant introduite ici pour rappeler l'étymologie d'un mot que la fréquence de son usage a tendance à obscurcir).

Le dernier chapitre de cette première partie consacrée à l'OPTIQUE ÉLECTROMAGNÉTIQUE (**chapitre 9**) traite des états de polarisation d'une onde lumineuse, des différentes représentations (Jones, Stokes, Poincaré) qui permettent d'en décrire la nature et des moyens que l'on peut mobiliser pour en assurer une manipulation contrôlée. Il montre ensuite comment se transpose, dans le cas de ce champ vectoriel particulier, le concept de cohérence introduit au chapitre 6 et aborde enfin la notion centrale de **degré de polarisation**.

Le **chapitre 10** ouvre la partie de cet ouvrage qui traite de la FORMATION DES IMAGES. Il est consacré à une présentation de l'**approximation de Fresnel**, dont on montre qu'elle est l'expression du paquet d'ondes spatial restreint aux composantes propagatives du champ dont la fréquence spatiale reste inférieure à une certaine borne. Cette approche permet d'introduire de manière extrêmement naturelle les notions de fonction de transfert et de propagateur au sens de Fresnel, dont une illustration de l'usage est ensuite donnée au travers de l'explication des deux phénomènes *a priori* assez intrigants que sont le *point brillant de Poisson* et l'*effet Talbot*.

Jusqu'ici, les phénomènes de propagation que nous avons traités se produisaient dans des milieux homogènes séparés par des interfaces planes. Le **chapitre 11** s'inscrit, dans une certaine mesure, en rupture avec cette approche puisqu'il utilise le cas de la lentille mince pour définir la fonction de transmission de la **lentille parfaite**, puis sa **réponse percussionnelle** pour différentes formes de pupille. C'est là qu'apparaît pour la première fois le concept de plan d'observation qui généralise celui, très restrictif, de plan image. Cette analyse se prolonge par le concept de filtrage de Fourier et de montage $4f$ dont on montre l'analogie formelle qu'il présente avec celui de télécentrisme.

Les deux chapitres qui font suite traitent en fait du même sujet, à savoir la **formation des images**. Le **chapitre 12** l'aborde dans le cas d'un système parfait et les simplifications que cette hypothèse autorise rendent, à notre sens, plus claire la présentation des conséquences d'une notion, la cohérence de l'éclairage, qui reste malgré tout suffisamment complexe pour que l'on se soit ici limité aux deux situations extrêmes correspondant au cas cohérent et au cas incohérent.

Nous montrons ensuite au **chapitre 13** l'**influence des aberrations** sur les notions de réponse percussionnelle et de fonction de transfert d'un système optique, en débutant cette présentation par le cas d'une aberration *extrinsèque*, à savoir le défaut de mise au point. Ceci nous conduit tout naturellement à définir de manière générale l'écart aberrant, à justifier l'emploi du critère de Maréchal et, enfin, à présenter la base particulière de calcul de la variance de cet écart aberrant que constituent, dans le cas d'un instrument à pupille circulaire, les polynômes de Zernike.

Le **chapitre 14** constitue un prolongement tout naturel du précédent, puisqu'il est consacré à l'**optique adaptative** et donc, aux corrections des *aberrations* dynamiques que génère la turbulence atmosphérique. Ce chapitre accorde une attention toute particulière au Shack-Hartmann, non seulement parce que la modélisation de ce système constitue une très bonne illustration de l'utilisation de l'approximation de Fresnel, mais aussi parce que cet exemple montre que la mesure d'une information de phase n'est pas forcément l'apanage d'un procédé interférométrique.

Le **chapitre 15** fonctionne comme un pivot entre la partie traitant de la FORMATION DES IMAGES et celle consacrée à l'INTERFÉROMÉTRIE. En effet, il détaille les conséquences pratiques de la quantification de l'énergie lumineuse sur le **mécanisme de détection** et montre comment ce contributeur **quantique** vient s'ajouter à celui qui résulte de l'agitation **thermique** des électrons dans une résistance. Les notions de bruit, et donc de rapport signal à bruit qui en résulte, constituent en effet des guides objectifs du dimensionnement d'un système optique qui viennent compléter celui, d'une autre nature, que nous avait fourni la connaissance de sa qualité image.

Le premier chapitre consacré à la partie purement interférométrique de cet ouvrage est le **chapitre 16**. Comme son titre l'indique (**Interférométrie et mesure de phase**), il traite à la fois de concepts très généraux associés à la détection interférométrique (essentiellement les conséquences du principe de *conservation de l'énergie* et la notion de *gain cohérent*) et de la mise en œuvre pratique de méthodes modernes de mesure de phase. Rappelons ici que le développement de ces méthodes résulte d'une interaction tout à fait positive entre optique fondamentale et techniques radar que le domaine des capteurs à fibre optique a portée à son apogée à la fin des années 1980.

Dans le **chapitre 17**, nous décrivons, parfois en détail (*interféromètre stellaire de Michelson, interféromètre à référence ponctuelle*), le fonctionnement et les propriétés d'une dizaine d'**interféromètres à 2 ondes**, en nous appuyant d'une part sur l'ensemble des notions générales introduites au chapitre précédent, mais aussi sur la modélisation fine des phénomènes de propagation que permet la mise en œuvre de l'approximation de Fresnel.

Le **chapitre 18** constitue un prolongement naturel du précédent, dont il généralise l'approche et les concepts au cas du plus emblématique des **interféromètres à ondes multiples**, à savoir le Fabry-Perot. Cette présentation offre l'occasion de comparer de manière très instructive les approches harmonique et temporelle d'un même phénomène et propose une formulation alternative de la fonction d'Airy qui est d'un usage particulièrement pratique lorsque l'on utilise un tel dispositif en interférométrie de *corrélation*.

Dans le **chapitre 19**, nous posons les bases théoriques de l'**interférométrie en lumière blanche**, qui a rendu possible le développement de techniques majeures comme la tomographie optique de cohérence (OCT, *optical coherence tomography*) ou la remise au goût du jour d'une notion aussi classique que celle des franges de superposition. Une attention particulière est apportée dans ce chapitre à la notion de *visibilité* de ces phénomènes d'interférence et à l'approche duale qu'il convient d'utiliser, dans ce cas polychromatique, en associant constamment variation d'éclairement et modulation de spectre.

Et pour finir (**chapitre 20**), et illustrer comment un développement industriel bien mené peut venir à bout d'obstacles tout autant conceptuels que pratiques, nous avons choisi comme thème applicatif final un problème réellement *extrême*, à savoir le **gyroscope à fibre optique**. En effet, dans ce cas, aucun des critères de faisabilité théorique ne semblait devoir être *a priori* rempli, que ce soit en termes de sensibilité, de linéarité ou de résistance aux biais et aux sources de bruit, et le succès de cette entreprise est en grande partie due à la mise en œuvre conjointe d'une technique particulièrement innovante de mesure de phase (la *rampe de phase numérique*) et de l'interférométrie en lumière blanche.

Après une conclusion en forme d'**Épilogue**, qui met notamment en perspective le concept si troublant d'*interférométrie d'intensité* (effet Hanbury Brown & Twiss), le corps de cet ouvrage est complété par une **Annexe** consacrée à une présentation synthétique des principaux outils mathématiques utilisés tout au long des chapitres qui le constituent et par une liste de **références bibliographiques** restreintes à des seuls titres de livres.

Il est également doté d'un index assez détaillé, afin que le lecteur puisse en faire une utilisation extrêmement ciblée sur telle ou telle question en relation avec son objet.

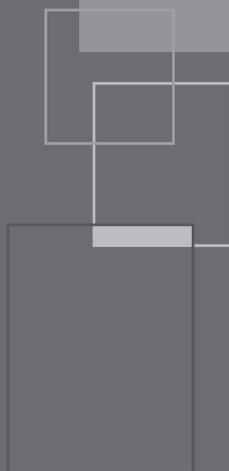
Pour revenir au point de départ de toute cette démarche, à savoir la création d'un cours de tronc commun de première année de l'École centrale Marseille associant Électromagnétisme et Optique, notons que les chapitres en lien direct avec ce cours portent les numéros 1 à 5, 7 et 8, puis 10 à 15. Ceux traitant des notions abordées dans le module Signaux optiques de troisième année correspondent aux numéros 9, puis 16 à 20, le chapitre 6 ayant été introduit au cours de la rédaction finale pour assurer la cohérence de l'ensemble ainsi constitué.

Michel Lequime et Claude Amra
Marseille, 30 avril 2013

Partie

1

Optique
électromagnétique





Impacts écologiques des Technologies de l'Information et de la Communication Les faces cachées de l'immatérialité

Groupe EcoInfo

Ce premier livre en langue française, qui traite tous les impacts environnementaux causés par l'usage des technologies de l'information et de la communication (TIC), vient à point nommé combler un déficit éditorial qui existe aussi, dans une moindre mesure, en langue anglaise. Tous les enjeux environnementaux y sont abordés, de même que chaque étape de la vie de ces technologies, de leur réalisation à leur fin de vie, qui soutiennent

le développement d'économies soi-disant « dématérialisées ». Il puise pour cela dans des informations chiffrées publiées essentiellement dans des revues académiques, et n'omet pas d'offrir une présentation critique des différents outils de mesure des impacts écologiques des TIC afin d'en comprendre les limites et la portée parfois limitée de leurs résultats.

• 2012 • 978-2-7598-0761-1 • 224 pages • 21 €



Le tableau périodique Son histoire et sa signification

Eric Scerri - Traduit de l'anglais

Cet ouvrage est composé de trois parties. La première correspond à un examen soigneux des contributions empiriques d'ordre conceptuel et expérimental qui ont conduit des premières triades de Dobereiner aux travaux de six chimistes dont Mendeléeï, crédités de la découverte de la périodicité chimique et de la fixation définitive de sa représentation. La seconde partie traite des facteurs qui ont successivement modifié la signification initiale du système périodique sous l'effet des découvertes telles que le numéro atomique, ... La dernière partie est consacrée à

l'examen des apports de la mécanique quantique et de leur incidence sur le modèle électronique.

Ce livre est l'exposé critique d'une aventure scientifique exemplaire qui se poursuit encore de nos jours. Il constitue aussi une synthèse profonde des progrès réalisés dans le domaine de l'atomistique. Cet ouvrage de référence, s'adresse aux enseignants en chimie et physique et plus généralement à tout scientifique curieux du sujet.

• 2011 • 978-2-7598-0482-5 • 380 pages • 60 €

Dans la même thématique chez EDP Sciences

Lasers - Par Bernard Cagnac et Jean-Pierre Faroux
Collection Savoirs Actuels

• 2002 • 2-86883-528-7 • 528 pages • 54 €

Le laser - Par Fabien Bretenaker et Nicolas Treps
Collection Une Introduction à ...

• 2010 • 978-2-7598-0517-4 • 180 pages • 20 €

L'observation en astrophysique - Par François Lebrun, Pierre Léna, François Mignard,
Laurent Mugnier, Didier Pelat et Daniel Rouan
Collection Savoirs Actuels

• 2008 • 978-2-86883-877-3 • 758 pages • 65 €

Optoélectronique terahertz - Par Jean-Louis Coutaz
Hors Collection

• 2008 • 978-2-86883-975-6 • 360 pages • 46 €

Spectroscopie de résonance paramagnétique électronique - Par Patrick Bertrand
Collection Grenoble Sciences

• 2010 • 978-2-7598-0554-9 • 380 pages • 81 €