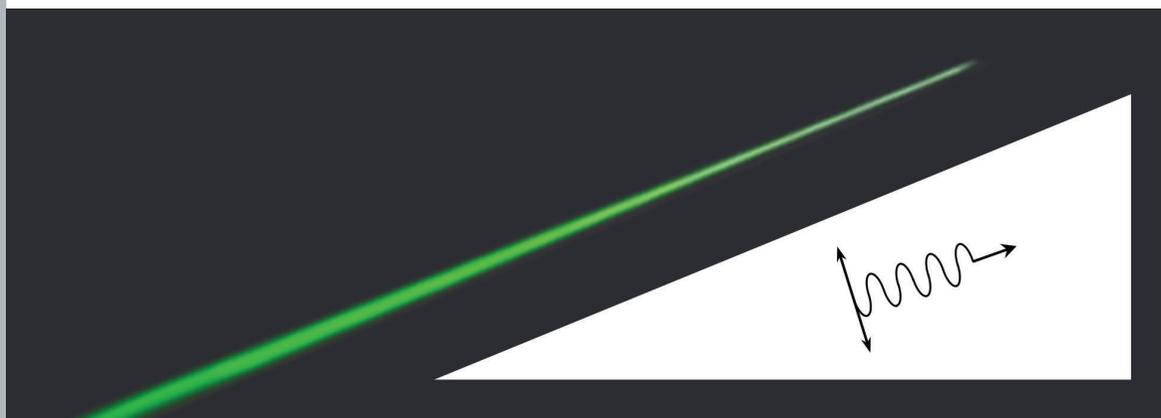


Frédéric Bernardot

Introduction à l'optique électromagnétique



Lavoisier
hermes

Frédéric Bernardot

Introduction à l'optique électromagnétique

Lavoisier
hermes

editions.lavoisier.fr

Pour plus d'informations sur nos publications :



newsletters.lavoisier.fr/9782746247857

Direction éditoriale : Jean-Marc Bocabeille
Composition : Nord Compo, Villeneuve-d'Ascq

© 2018, Lavoisier, Paris
ISBN : 978-2-7462-4785-7

Préface

Dans cet ouvrage, l'auteur fait une excellente synthèse du domaine de la photonique, notamment au niveau de la manipulation des champs lumineux. Les concepts fondamentaux de l'optique électromagnétique, les propriétés optiques des milieux diélectriques et la description des phénomènes optiques à la base de nombreuses applications en science et technologie sont présentés de façon concise, avec un grand souci pédagogique. Les exercices proposés sont bien choisis : ils permettent d'approfondir certains développements théoriques complémentaires ou encore de mettre en lumière certaines applications pratiques des phénomènes décrits dans chacun des chapitres du livre. Les notions d'optique non linéaire et d'optique guidée, dont le traitement est souvent négligé dans les livres d'introduction à l'optique électromagnétique, sont présentées ici avec rigueur sans alourdir pour autant le formalisme mathématique.

La maîtrise des techniques de manipulation de la phase, de l'amplitude et de l'intensité des champs lumineux a largement contribué à l'essor de l'instrumentation en optique et laser. Cet ouvrage est fortement recommandé aux étudiants qui amorcent un projet de recherche en science et génie qui fait appel à cette instrumentation ou encore qui vise le développement de nouveaux matériaux et dispositifs photoniques. Les étudiants y trouveront des réponses à leurs questions sur le principe de fonctionnement de divers dispositifs, tels que l'isolateur de Faraday, les modulateurs acousto-optique et électro-optique, et les cristaux de génération de second harmonique, que l'on retrouve dans les laboratoires scientifiques, en recherche expérimentale. Les notions théoriques de base exposées dans ce livre leur serviront à mieux décrire les propriétés optiques des matériaux et les caractéristiques des dispositifs photoniques d'intérêt pour leur projet de recherche.

Denis Morris

Professeur titulaire, Département de Physique,
Faculté des sciences, Université de Sherbrooke, Canada.

Avant-propos

À la mémoire de François Gires (1931-2013)

Ce cours d'optique de niveau Master 1 (c'est-à-dire 4^e année d'université) est à destination du public universitaire ou des écoles d'ingénieurs. Son degré de difficulté se situe entre celui des ouvrages classiques d'électromagnétisme (niveau Licence 2 [L2] ou Licence 3 [L3], soit 2^e ou 3^e année d'université) et celui des livres spécialisés d'optique ou d'ingénierie optique (de niveau Master 2 [M2]). Le présent cours intéressera aussi bien le public de niveau L2-L3, en lui ouvrant un vaste horizon sur les intérêts et les applications en optique de l'électromagnétisme de Maxwell, que le public de M2, en lui fournissant une référence élémentaire sur les fondements physiques des dispositifs passifs ou actifs issus de l'optique électromagnétique. En outre, cet ouvrage prétend en premier lieu combler un vide concernant précisément l'optique anisotrope, guère enseignée en L2-L3 et bien souvent présentée comme allant presque de soi dans les livres de niveau M2.

Le présent ouvrage consiste en une introduction aux propriétés électromagnétiques classiques de la lumière et aux manipulations que l'on peut faire sur elles à l'aide de dispositifs, passifs ou actifs, qui sont traversés par des faisceaux lumineux. De la même manière que le contrôle et l'utilisation des courants d'électrons dans les circuits forment le sujet de l'électronique, les manipulations de la lumière, considérée comme un flot granulaire de photons, constituent le domaine communément appelé photonique.

L'origine première de ce domaine remonte à la découverte, à partir de 1800 environ, que la lumière est un phénomène à la fois ondulatoire et vectoriel. Parmi ses tout premiers développements figurent notamment la compréhension puis l'utilisation de la propagation lumineuse dans les milieux transparents anisotropes. Le formalisme théorique de l'optique électromagnétique est inventé par Maxwell dans les années 1860. Ensuite, l'électro-optique (interaction de la lumière avec un champ électrostatique) s'est développée sur la fin du XIX^e siècle, puis l'acousto-optique (interaction de la lumière avec une onde acoustique) dans les années 1930, et enfin l'optique non linéaire (interaction de faisceaux lumineux entre eux) à compter de 1960.

Aujourd'hui, la photonique est largement utilisée parmi les techniques de laboratoire et dans les applications courantes, par exemple en télécommunications optiques grâce aux fibres optiques développées dans les années 1970. De plus, elle est entrée dans une phase de miniaturisation, dans laquelle sources, détecteurs, guidages et manipulations de la lumière consistent de plus en plus en des dispositifs de tailles micrométriques. Cependant, ce cours ne présentera pas de récents développements fondamentaux ou appliqués, et se limitera au contraire à une première description, se voulant pédagogique, des propriétés électromagnétiques de la lumière et des manipulations les plus simples qu'il est possible de faire sur elles.

Les fondements de l'optique électromagnétique sont rappelés au *chapitre I*, où est traitée en particulier la propagation de la lumière dans un milieu isotrope. Le *chapitre II* est consacré à la polarisation de la lumière ; il en présente posément le formalisme associé, ainsi que deux phénomènes physiques où la polarisation linéaire se manifeste : la diffusion dipolaire et la réflexion-réfraction d'un faisceau sur un dioptre plan.

La propagation d'un faisceau lumineux monochromatique dans un milieu anisotrope est le sujet des deux chapitres suivants. Pour la simplicité, le *chapitre III* se limite d'abord au cas où la propagation de la lumière a lieu suivant une direction principale du milieu cristallin ; sont alors introduites la notion de polarisations propres et les lames optiques, outils très couramment utilisés pour manipuler la polarisation lumineuse des faisceaux. Le *chapitre IV* aborde ensuite la question dans le cas général, quelle que soit la direction de propagation de la lumière dans le milieu anisotrope ; il présente les séparateurs polarisants, dispositifs permettant de séparer spatialement un faisceau lumineux en deux composantes orthogonales de polarisation linéaire.

Le *chapitre V* expose différents moyens de tourner continûment, autour de la direction de propagation, la polarisation linéaire d'un faisceau lumineux. Ce phénomène est spontané dans les milieux optiquement actifs. Il est provoqué par l'application d'un champ magnétostatique dans les milieux doués d'effet Faraday, et il est piloté en outre par l'allumage/extinction d'un champ électrostatique dans certains cristaux liquides.

L'effet électro-optique est introduit au *chapitre VI*. Ce phénomène consiste en la modification des propriétés optiques d'un milieu matériel lorsqu'il est soumis à un champ électrostatique extérieur. Sur ce principe, on fabrique des lames optiques variables, utiles pour moduler la phase, la polarisation ou la puissance d'un faisceau lumineux.

L'effet acousto-optique est le sujet du *chapitre VII*. Un faisceau lumineux dans un milieu matériel peut interagir avec une onde acoustique qui y est présente, via les modifications du milieu que cette onde de déformation provoque. Le faisceau lumineux se retrouve alors défléchi en sortie, et sa fréquence optique modifiée, de façon contrôlable.

Lorsqu'ils sont suffisamment intenses, deux faisceaux lumineux peuvent interagir entre eux dans un milieu (ou un seul faisceau peut interagir avec lui-même) : on entre ici dans le cadre des phénomènes optiques non linéaires, abordés au *chapitre VIII*. Pour la simplicité, n'y est essentiellement traité que le phénomène de génération de second harmonique : sous certaines conditions, un faisceau lumineux de pulsation

optique ω donne naissance, dans un milieu, à un faisceau de pulsation double 2ω ; par exemple, un faisceau lumineux rouge peut créer un faisceau bleu.

Les deux derniers chapitres portent sur le guidage des ondes lumineuses. D'abord, le *chapitre IX* se restreint à l'étude de structures guidantes planes, métallique puis diélectrique; ce chapitre présente la notion de modes propres de propagation guidée, ainsi que la relation de dispersion imposée par les conditions aux limites. Ensuite, l'ultime *chapitre X* est une initiation aux fibres optiques, guides diélectriques cylindriques qui sont utilisés très largement dans les télécommunications; en particulier, y sont déduites, dans la limite de guidage faible, les relations de dispersion et les structures des modes de propagation guidée dans une fibre à saut d'indice de réfraction.

Comme annoncé, cet ouvrage n'est évidemment pas une présentation exhaustive du domaine de la photonique (notamment, les sources et les détecteurs ne sont même pas effleurés); d'ailleurs, il existe sur ce domaine des traités complets spécialisés, qui n'abordent parfois qu'un seul des thèmes présentés dans le plan ci-dessus. Le but recherché du présent cours est de donner un premier aperçu de quelques points clés concernant les manipulations des propriétés de la lumière, tout en veillant à une présentation à la fois élémentaire et rigoureuse des phénomènes: plutôt que d'aborder beaucoup de sujets d'intérêt actuel de façon superficielle, le choix a été fait d'en traiter peu mais en détail, tout en tâchant que le formalisme n'obscurcisse pas la physique des phénomènes étudiés. Dans chacun des dix chapitres qui viennent d'être présentés, l'exposé est systématiquement fait au niveau le plus simple possible, la lumière et la matière étant traitées classiquement. Les développements plus difficiles sont mis en seconde analyse, voire reportés en exercices – et seulement si le niveau choisi de l'ouvrage le permet.

L'ensemble du contenu de ce livre peut servir de base à un enseignement annuel, comportant une vingtaine de séances de cours environ. Pour information, dans le cadre de l'enseignement semestriel en une dizaine de séances d'enseignement magistral qui a servi à l'élaboration de l'ouvrage, l'attention a été portée sur les parties suivantes: I-A (sans les conditions aux limites), I-B-1, I-C-1 et 2; II-A-1 et 2, II-C (sans II-C-5); III-A et III-B; IV-B et IV-C-1; V-A (sans V-A-3), V-B-1 et V-C (sans V-C-2-b); VI-A (sans VI-A-3 ni VI-A-4-b) et VI-B (sans l'effet Kerr ni VI-B-4-c ni VI-B-5); VII-A (sans VII-A-4 ni VII-A-5) et VII-B (onde acoustique longitudinale seulement); VIII-A (sans VIII-A-4), VIII-B-1 et 3; IX-A (sans IX-A-4), IX-B-1 et 2; X-A (descriptif, sans calcul) et X-B. Cette sélection de sujets a été surtout orientée par le programme d'activité des travaux pratiques (portant sur la polarisation de la lumière, l'effet électro-optique, l'effet acousto-optique, la génération de second harmonique et les fibres optiques).

Évidemment, le présent ouvrage d'enseignement n'est pas le résultat du travail d'un seul individu. En tout premier lieu, hommage doit être rendu aux pionniers qui ont fait naître l'enseignement d'« Optique moderne » en Maîtrise à l'université Paris-7, en 1984, puis à ceux qui l'ont fait vivre toutes les années 1990: d'abord François Gires, Jacqueline Gouzerh, Lucile de Billy et Roger Villanove, puis ensuite Cécile

Malgrange, Jacqueline Petiau, Françoise Lefaucheux, Jean-Gabriel Cuby, Raphaël VISOCEKAS et Gérard Rebmann, ont créé *ex nihilo* l'enseignement en question, en faisant notamment surgir du néant les expériences de travaux pratiques qui y sont associées, et en veillant à leur intérêt pédagogique, à leur évolution et à leur entretien. Je suis très reconnaissant à F. Gires et à G. Rebmann de m'avoir fait connaître en détail ces expériences, et plus particulièrement au second de m'avoir transmis l'intégralité de ses notes de cours quand il s'est désengagé. Lorsque j'ai commencé à enseigner dans ce domaine, au début des années 2000, j'ai pu également utiliser les notes de R. VISOCEKAS et de Thomas Coudreau sur l'optique guidée ; qu'ils en soient remerciés. J'ai d'abord eu le très grand plaisir d'enseigner, dans l'enthousiasme, en association avec Emmanuel Fort et Ros-Kiri Ing ; nos très nombreuses discussions sur notre pratique pédagogique nous ont conduit à modifier, marginalement le titre de l'enseignement (devenu « Introduction à la photonique »), plus essentiellement son programme, ses textes de travaux dirigés et de travaux pratiques, dans le cadre d'une semestrialisation nouvellement généralisée des enseignements et de l'arrivée en quatrième année d'étudiants possédant une connaissance non consolidée de l'électromagnétisme. Je voudrais remercier également les personnes qui ont participé à cet enseignement par la suite : Giuseppe Leo, Vincent Berger, Sabine Laurent, Yvan Maksimovic, Pierre Lecaruyer, Francesca Carosella, Sara Ducci, Filippo Ghiglieno, Lucie Gérard, Maria Amanti, Christophe Voisin et Fabrice Raineri. Cet enseignement a eu de forts liens, particulièrement pour les expériences, avec la formation de M2 « Lasers, Matières, Milieux Biologiques », ce qui a très notablement contribué à le modeler ; j'en remercie Agnès Maître et Alexandra Fragola, les deux responsables qui se sont succédées au moment de cette collaboration. Je remercie particulièrement Claude Chèze pour ses encouragements durant la rédaction de l'ouvrage. Le Pr Denis Morris, de l'université de Sherbrooke, a accepté de bien vouloir rédiger la préface de l'ouvrage ; qu'il soit remercié pour l'attention qu'il a accordée à ce livre d'enseignement. Mes tout derniers remerciements – mais non les moindres – vont à ceux, étudiants et collègues, qui ont émis des corrections de toute nature sur les premières versions de cet ouvrage, et notamment à Cécile Malgrange dont la relecture extrêmement attentive de l'intégralité des chapitres, dans leur version quasi finale, a permis que l'ouvrage gagne notablement en qualité de présentation. Il va naturellement sans dire que l'auteur porte l'entière responsabilité des imperfections et erreurs qui persistent dans la version publiée.

Paris, février 2017

Table des matières

Préface	III
Avant-propos.....	V

Chapitre 1

Optique électromagnétique.....	1
--------------------------------	---

1. Fondements de l'électromagnétisme	2
<hr/>	
1.1. Électromagnétisme dans l'espace libre (le vide).....	3
1.2. Électromagnétisme dans un milieu matériel.....	4
2. Milieux diélectriques	6
<hr/>	
2.1. Milieux diélectriques linéaires, homogènes et isotropes.....	6
2.2. Milieux non isotropes ou non homogènes ou non linéaires.....	7
3. Ondes électromagnétiques monochromatiques	8
<hr/>	
3.1. Ondes monochromatiques dans un milieu linéaire.....	8
3.2. Ondes planes progressives monochromatiques en milieu linéaire et homogène	9
3.3. Paquet d'ondes – Vitesse de groupe.....	11

4. Dispersion et absorption	12
4.1. Fonction de réponse d'un milieu diélectrique	12
4.2. Susceptibilité électrique complexe	14
4.3. Vitesse de groupe et indice de groupe	15
4.4. Modèle classique de résonance optique : modèle de Lorentz	16
Exercices	19

Chapitre 2

Polarisation de la lumière

1. États de polarisation d'une onde plane progressive monochromatique	22
1.1. Lumière polarisée linéairement	23
1.2. Lumière polarisée circulairement	24
1.3. Lumière polarisée elliptiquement	25
1.4. Remarques	26
2. Diffusion de la lumière	27
2.1. Position du problème	27
2.2. Potentiels vecteur et scalaire	28
2.3. Structure du rayonnement dipolaire	29
2.4. Diffusion d'un faisceau lumineux	30
3. Réflexion et réfraction	32
3.1. Lois de Snell-Descartes	32
3.2. Coefficients de Fresnel	34
3.3. Réflexion en polarisation s	35
3.4. Réflexion en polarisation p	37
3.5. Réflexion et réfraction de la puissance lumineuse incidente	38
Exercices	41

Chapitre 3

Milieux anisotropes I : lames optiques 43

1. Axes et indices de réfraction principaux	44
1.1. Tenseur diélectrique	44
1.2. Milieux isotropes ou uniaxes ou biaxes.....	46
2. Propagation suivant un axe principal	48
2.1. Modes propres de propagation	48
2.2. Lames optiques.....	49
3. Manipulations classiques de la polarisation	51
3.1. Polarisation linéaire.....	51
3.2. Lames optiques particulières.....	52
3.3. Mise en œuvre d'une lame optique.....	55
Exercices.....	58
Annexe	61

Chapitre 4

Milieux anisotropes II : séparateurs polarisants 62

1. Faisceau monochromatique en milieu anisotrope	63
1.1. Ellipsoïde des indices.....	63
1.2. Imperméabilité électrique.....	64
1.3. Modes propres de propagation	64
1.4. Direction des faisceaux lumineux	67
2. Cas des milieux anisotropes uniaxes	69
2.1. Modes propres de propagation	69
2.2. Double réfraction.....	72

3. Séparateurs polarisants	74
3.1. Déplaceur polarisant.....	74
3.2. Séparateurs d'états de polarisation.....	75
3.3. Séparateurs polarisants à réflexion totale	77
Exercices.....	80
Annexe	82

Chapitre 5

Rotateurs de polarisation..... 83

1. Activité optique	84
1.1. Définition – Aspects historiques.....	84
1.2. Modes propres de propagation	85
1.3. Un modèle macroscopique de milieu optiquement actif.....	86
2. Effet Faraday	89
2.1. Présentation.....	89
2.2. Modèle classique de l'effet Faraday	91
3. Rotateur à cristal liquide	93
3.1. Notions sur les cristaux liquides.....	93
3.2. Propagation lumineuse dans un nématique torsadé.....	94
3.3. Application : écrans à cristaux liquides	97
Exercices.....	98
Annexe	100

Chapitre 6

Électro-optique..... 102

1. Principes de l'électro-optique	102
1.1. Effet Pockels.....	103
1.2. Effet Kerr.....	104
1.3. Contrôle de la phase optique d'un faisceau (par effet Pockels)	104
1.4. Contrôle de la biréfringence d'une lame optique (par effet Pockels).....	106
2. Électro-optique dans les milieux anisotropes	109
2.1. Ellipsoïde des indices en présence de E_s	109
2.2. Propriétés de symétrie intrinsèque de $[r]$ et $[s]$	110
2.3. Effet des symétries structurales du milieu.....	111
2.4. Électro-optique dans quelques configurations simples	114
2.5. Électro-optique dans quelques autres configurations.....	116
2.6. Remarques.....	118
Exercices.....	120

Chapitre 7

Acousto-optique..... 122

1. Principes de l'acousto-optique	123
1.1. Onde acoustique plane dans un milieu de structure isotrope.....	123
1.2. Effet élasto-optique (ou photo-élastique).....	124
1.3. Réflexion de Bragg	124
1.4. Réflexion continue sur l'onde acoustique sinusoïdale	126
1.5. Rendement de la réflexion de Bragg	129
1.6. Interprétations de la réflexion de Bragg	130
2. Acousto-optique dans les milieux anisotropes	132
2.1. Onde acoustique plane dans un milieu anisotrope.....	132

2.2. Effet élasto-optique	132
2.3. Exemples d'effets acousto-optiques	134
2.4. Réflexion de Bragg dans quelques configurations.....	138
Exercices.....	141
Annexe	143

Chapitre 8

Optique non linéaire

1. Principes de l'optique non linéaire	148
<hr/>	
1.1. Non-linéarité de la densité de polarisation.....	148
1.2. Équation d'onde non linéaire.....	149
1.3. Génération de second harmonique	151
1.4. Remarques.....	153
2. Accord de phase pour la génération de second harmonique	154
<hr/>	
2.1. Importance de l'accord de phase.....	154
2.2. Quasi-accord de phase.....	155
2.3. Accord de phase (de type I) dans un milieu anisotrope uniaxe	157
2.4. Accord de phase de type II.....	160
2.5. Remarques.....	162
3. Théorie de modes couplés	163
<hr/>	
3.1. Génération de second harmonique de type I	163
3.2. Génération de second harmonique de type II	166
Exercices.....	169
Annexe	172

Chapitre 9

Optique guidée 175

1. Guidage métallique plan	176
<hr/>	
1.1. Introduction.....	176
1.2. Modes guidés TE.....	177
1.3. Remarques.....	180
1.4. Modes guidés TM.....	181
2. Guidage diélectrique plan	182
<hr/>	
2.1. Introduction.....	182
2.2. Modes guidés TE.....	184
2.3. Modes guidés TM.....	188
3. Exemples de dispositifs de l'optique guidée	190
<hr/>	
3.1. Couplage entre deux guides diélectriques.....	191
3.2. Dispositifs électro-optiques.....	193
Exercices.....	196
Annexe.....	199

Chapitre 10

Fibres optiques..... 202

1. Rayons lumineux dans les fibres multimodes ($\lambda_0 \ll a$)	204
<hr/>	
1.1. Fibre optique à saut d'indice.....	204
1.2. Fibre optique à gradient d'indice.....	206
2. Modes guidés dans une fibre à saut d'indice	207
<hr/>	
2.1. Structures spatiales des modes guidés.....	207
2.2. Paramètre de fibre.....	210

2.3. Modes guidés LP	210
3. Dispersion dans les fibres optiques	216
<hr/>	
3.1. Fibre multimode : dispersion modale	216
3.2. Fibre monomode : dispersion chromatique	217
3.3. Fortes intensités optiques : dispersion non linéaire	219
Exercices	221
Annexe	224
Solutions des exercices	226
Bibliographie	248
Index	250

Cet ouvrage est une introduction aux propriétés électromagnétiques classiques de la lumière et aux manipulations que l'on peut faire sur elles à l'aide de dispositifs, passifs ou actifs, qui sont traversés par des faisceaux lumineux. Après quelques rappels détaillés sur l'optique électromagnétique classique et la polarisation de la lumière, l'optique anisotrope est présentée progressivement, d'abord dans ses manifestations et utilisations les plus simples (lames optiques), puis dans ses propriétés plus difficiles (séparateurs polarisants et rotateurs de polarisation). La seconde moitié de l'ouvrage aborde des manipulations actives de faisceaux lumineux (par effets électro-optiques ou acousto-optiques), puis l'optique non linéaire, et enfin l'optique guidée et les fibres optiques. Le but de ce cours est de donner un premier aperçu de quelques points clés concernant les manipulations des propriétés de la lumière, tout en veillant à une présentation à la fois élémentaire et rigoureuse des phénomènes. L'exposé est fait systématiquement au niveau le plus élémentaire possible, la lumière et la matière étant traitées classiquement ; les développements plus difficiles sont mis en seconde analyse, voire reportés en exercices.

Ce cours d'optique de niveau Master 1 est à destination du public universitaire ou des écoles d'ingénieurs. Il intéressera aussi bien le public de niveau L2-L3, en lui ouvrant un vaste horizon sur les intérêts et les applications en optique de l'électromagnétisme de Maxwell, que le public de M2, en lui fournissant une référence élémentaire sur les fondements physiques des dispositifs passifs ou actifs issus de l'optique électromagnétique.

Frédéric Bernardot *est enseignant-chercheur en physique, maître de conférences à l'université Paris 7 (Denis-Diderot). Il travaille à l'Institut des NanoSciences de Paris, unité de l'université Paris 6 (Pierre-et-Marie-Curie) et du CNRS.*

