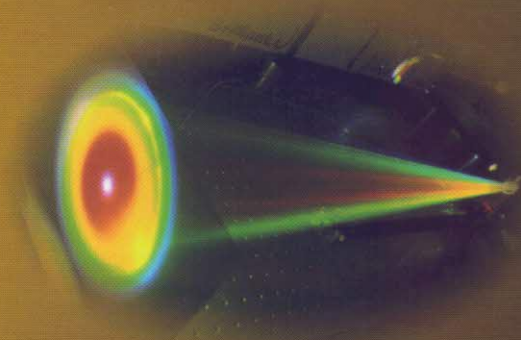


M1-M2

PHYSIQUE-LMD
Universités-Écoles d'ingénieurs



Lasers et optique non linéaire

Christian DELSART

ellipses

TABLE DES MATIÈRES

Bibliographie générale..... xv

Tableaux utiles : lettres grecques, préfixes d'unités, spectre électromagnétique, notations utilisées (xx), abréviations utilisées (xxi), classes de sécurité des lasers (xxii)..... xix

Introduction..... xxiii

Partie 1. Introduction aux lasers et applications 1

1.1 INTRODUCTION 1

X 1.1.1 Historique..... 1

1.1.2 Économie mondiale du laser 3

1.1.3 Qu'est-ce qu'un laser ? 6

1.1.4 Organisation du manuel 7

1.2 PROCESSUS DE CONVERSION D'ÉNERGIE ET EFFET LASER 8

X 1.2.1 Grandeurs énergétiques utilisées 8

1.2.2 Processus de conversion d'énergie 9

1.2.3 Obtention heuristique des équations du laser 11

1.2.4 Régime stationnaire : saturation et seuil 13

1.3 LA LUMIÈRE DANS LES CAVITÉS ("RÉSONATEURS") 15

1.3.1 Modes d'une cavité fermée..... 15

1.3.2 Résonateur ouvert..... 16

1.4 L'ORIGINALITÉ DE LA LUMIÈRE LASER..... 17

1.4.1 Cohérence du premier ordre..... 17

1.4.1.1 Fonctions de cohérence..... 17

1.4.1.2 Cohérence temporelle et monochromaticité..... 19

1.4.1.3 Cohérence spatiale. Effet de granulation ("speckle")..... 21

1.4.2 Propriétés de directivité, "waist" d'un faisceau gaussien 22

1.4.3 Propriétés de focalisation 22

1.4.3.1 Source émissive classique..... 22

1.4.3.2 Laser émettant un faisceau gaussien (cf. partie 2) 23

1.4.4 Luminance spectrale des sources thermiques et des lasers 24

1.4.4.1 Luminance d'une source thermique (corps noir)..... 24

1.4.4.2 Luminance de lasers..... 24

1.4.5 Autres caractéristiques des lasers..... 25

1.4.5.1 Longueur d'onde d'émission des lasers, accordabilité..... 25

1.4.5.2 Propriétés statistiques des sources continues laser et thermique..... 25

1.4.5.3 Largeur spectrale des lasers 27

1.4.5.4 Durée des impulsions et taux de répétition ; caractéristiques extrêmes des lasers..... 27

1.5 PRINCIPAUX LASERS ET LEURS APPLICATIONS..... 28

1.5.1 Principaux lasers à gaz atomiques ou moléculaires, neutres ou ionisés 28

1.5.1.1 Lasers moléculaires, laser à dioxyde de carbone (CO₂)..... 28

1.5.1.2 Lasers à excimères 29

1.5.1.3 Laser à argon ionisé 31

1.5.1.4 Laser hélium-néon..... 32

1.5.1.5 Laser hélium-cadmium 32

1.5.1.6 Laser à vapeur de cuivre 33

1.5.1.7 Laser X à plasmas 34

1.5.2	Principaux lasers solides	34
1.5.2.1	Lasers à ions néodyme dopant un cristal YAG ou un verre amorphe	35
1.5.2.2	Laser à fibre dopée aux terres rares	37
1.5.2.3	Laser titane-saphir	38
1.5.2.4	Laser à rubis	39
1.5.2.5	Laser à centres colorés	39
1.5.3	Lasers semi-conducteurs	40
1.5.3.1	Matériaux semi-conducteurs utilisés	40
1.5.3.2	Structures des lasers semi-conducteurs	41
1.5.3.3	Applications des lasers semi-conducteurs	42
1.5.4	Lasers à colorants organiques	43
1.5.5	Lasers à électrons libres	44

Partie 2. Cavités optiques et faisceaux laser.....45

2.1	INTRODUCTION AUX RÉSONATEURS OUVERTS	45
2.1.1	Différents types de résonateurs : description et définitions	45
2.1.2	Grandeurs caractérisant les pertes dans une cavité	48
2.1.2.1	Durée de vie des photons dans la cavité τ_c	48
2.1.2.2	Facteur de qualité d'une cavité Q_c	48
2.1.2.3	Coefficient de pertes total d'une cavité α_p	49
2.1.2.4	Relation entre α_p et τ_c	50
2.1.2.5	Pertes par diffraction, nombre de Fresnel d'une cavité	50
2.1.2.6	Pertes par réflexion : incidence de Brewster	50
2.1.3	Modes transverses d'une cavité : modèle de Schawlow et Townes	51
2.2	ANALYSE DES RAYONS PARAXIAUX ; STABILITÉ DES CAVITÉS	52
2.2.1	Cadre de cette étude	52
2.2.2	Cavité laser et structure périodique de lentilles	52
2.2.3	Matrices de transfert ou matrices ABCD : définition	53
2.2.4	Matrices de transfert particulières, exemples	54
2.2.4.1	Propagation libre sur une distance d	54
2.2.4.2	Élément d'indice n et de longueur d	54
2.2.4.3	Dioptré plan séparant deux milieux	54
2.2.4.4	Lentille mince de distance focale f	54
2.2.4.5	Miroir sphérique concave ou convexe de rayon de courbure R	55
2.2.5	Matrices de transfert pour des systèmes centrés composites	55
2.2.5.1	Propagation libre suivie d'une lentille mince	55
2.2.5.2	Matrice de transfert pour le retour inverse de la lumière	55
2.2.5.3	Combinaison de systèmes optiques centrés	56
2.2.5.4	Système centré de deux lentilles minces	56
2.2.5.5	Fibre optique à gradient d'indice	56
2.2.5.6	Systèmes optiques à astigmatisme simple	57
2.2.6	Ondes sphériques et la loi ABCD	58
2.2.7	Stabilité d'une séquence périodique	59
2.2.7.1	Valeurs propres de la matrice de transfert	60
2.2.7.2	Matrices vecteurs propres de la matrice de transfert	60
2.2.7.3	Condition de stabilité d'une cavité en optique géométrique	60
2.2.8	Stabilité des cavités linéaires simples à deux miroirs	61
2.2.8.1	Condition et diagramme de stabilité	61
2.2.8.2	Cavités particulières	62
2.2.8.3	Détermination géométrique de la stabilité à partir des cercles de Deschamps	62
2.2.8.4	Étude de la stabilité par solution graphique	63

2.2.9	Stabilité des cavités linéaires complexes : méthode générale.....	63
2.2.10	Cavités instables.....	64
2.2.10.1	Bases de l'étude des cavités instables.....	64
2.2.10.2	Intérêt et applications des cavités instables.....	65
2.3	FAISCEAUX GAUSSIENS. PROPAGATION. TRANSFORMATION.....	66
2.3.1	Diffraction dans l'approximation de Fresnel.....	66
2.3.2	Onde sphérique gaussienne.....	67
2.3.3	Propagation d'une onde sphérique gaussienne (Huygens-Fresnel).....	68
2.3.4	Rayon de courbure complexe et loi ABCD.....	69
2.3.4.1	Propagation sur une distance d	69
2.3.4.2	Lentille mince de focale f	69
2.3.4.3	Utilisation des matrices de transfert.....	69
2.3.5	Propriétés des faisceaux gaussiens.....	70
2.3.6	Adaptation et focalisation des faisceaux gaussiens.....	71
2.4	MODE FONDAMENTAL GAUSSIEN DES CAVITÉS STABLES.....	73
2.4.1	Utilisation de la loi ABCD.....	73
2.4.2	Cavité simple à deux miroirs : structure du faisceau.....	74
2.4.3	Cavité simple à deux miroirs : fréquence des modes TEM ₀₀	76
2.4.4	Cavité quelconque : structure des faisceaux, fréquences des modes TEM ₀₀	76
2.5	ÉQUATIONS DE HELMHOLTZ ET MODES D'UNE CAVITÉ.....	78
2.5.1	Équation d'onde paraxiale.....	78
2.5.2	Mode fondamental gaussien TEM ₀₀	79
2.5.3	Modes gaussiens rectangulaires d'ordres supérieurs.....	80
2.5.4	Modes Hermite-gaussiens dans une cavité à deux miroirs.....	81
2.5.4.1	Position et dimension du waist.....	81
2.5.4.2	Fréquence du mode.....	81
2.5.4.3	Spectre de fréquences.....	81
2.5.5	Modes gaussiens cylindriques d'ordres supérieurs ("Laguerre-gaussiens").....	82
2.5.6	Propagation des faisceaux multimode.....	84
2.5.6.1	Facteur M^2	84
2.5.6.2	Généralisation à un faisceau astigmatique simple.....	86
X	Partie 3. Interaction matière-rayonnement.....	87
3.1	COEFFICIENTS D'EINSTEIN. SECTIONS EFFICACES.....	87
3.1.1	Populations ; émission spontanée, durées de vie.....	87
3.1.2	Largeur naturelle et élargissement homogène d'une transition.....	89
3.1.3	Absorption et émission stimulée, sections efficaces.....	91
3.1.3.1	Absorption, définitions.....	91
3.1.3.2	Émission stimulée, définitions.....	91
3.1.3.3	Sections efficaces d'absorption et d'émission stimulée.....	92
3.1.3.4	Excitation non monochromatique, excitation en bande large.....	93
3.1.4	Calcul des coefficients d'Einstein, quantification du champ.....	94
3.1.4.1	Émission dipolaire électrique.....	94
3.1.4.2	Absorption.....	95
3.1.4.3	Relations générales entre coefficients d'Einstein.....	96
3.1.4.4	Relations entre coefficients d'Einstein dans le cas d'un rayonnement isotrope.....	97
3.2	COEFFICIENT D'AMPLIFICATION ET SUSCEPTIBILITÉ.....	98
3.2.1	Coefficient d'amplification et différence de population.....	98
3.2.1.1	Différence de population.....	98

3.2.1.2	Coefficient d'amplification, coefficient d'absorption, gain	99
3.2.2	Susceptibilité complexe et dispersion	101
3.2.2.1	Relation entre dispersion et amplification.....	101
3.2.2.2	Cas du milieu à élargissement homogène lorentzien	102
3.3	PHÉNOMÈNE DE SATURATION EN RÉGIME STATIONNAIRE	103
3.3.1	Calcul de la différence de population.....	103
3.3.2	Saturation de la différence de population ; intensité de saturation	104
3.3.3	Variation de l'intensité de l'onde se propageant dans le milieu.....	105
3.3.4	Paramètre de saturation ; variation spectrale de la différence de population.....	106
3.3.5	Variation spectrale des coefficients d'amplification saturée et non saturée.....	107
3.4	MILIEUX À ÉLARGISSEMENT INHOMOGÈNE.....	108
3.4.1	Définition d'un milieu à élargissement homogène.....	108
3.4.2	Profil gaussien, effet Doppler ; ions dopant une matrice cristalline	109
3.4.2.1	Élargissement par effet Doppler dans les gaz	109
3.4.2.2	Ions actifs dopant une matrice cristalline ou amorphe.....	110
3.4.3	Coefficient d'amplification non saturée	111
3.4.4	Creusement spectral ("hole burning spectral").....	112
3.4.5	Coefficient d'amplification saturée	114
X	Partie 4. Oscillation laser	117
4.1	ÉQUATION D'ÉVOLUTION DE LA DIFFÉRENCE DE POPULATION DANS UN MILIEU AMPLIFICATEUR	117
4.1.1	Approximation des équations de débit ; cas général.....	117
4.1.2	Système à trois niveaux.....	118
4.1.3	Système à quatre niveaux.....	119
4.1.4	Équation standard : première équation de Statz et DeMars	119
4.1.5	Mécanismes de pompage du milieu amplificateur.....	120
4.2	ÉQUATION D'ÉVOLUTION DE L'INTENSITÉ DANS UNE CAVITÉ LASER	122
4.2.1	Hypothèses de départ et approximations.....	122
4.2.2	Équation d'évolution de l'intensité dans une cavité amplificatrice	122
4.2.3	Régime stationnaire : seuil d'oscillation laser	123
4.2.4	Milieu à élargissement homogène : différence de population au seuil	123
4.2.5	Équation d'évolution de l'intensité pour un milieu à élargissement homogène	124
4.3	RÉSOLUTION DES ÉQUATIONS DE STATZ ET DEMARS.....	124
4.3.1	Cas général ; cas particuliers.....	124
4.3.2	Validité pour les différents régimes impulsionsnels du laser	125
4.4	ÉQUATIONS DU LASER EN RÉGIME STATIONNAIRE	126
4.4.1	Conditions de gain pour l'oscillation laser en élargissement homogène.....	126
4.4.1.1	Laser en anneau à gain fort	126
4.4.1.2	Laser linéaire à gain fort ; analyse de Rigrod	127
4.4.2	Pompage et puissance pour les systèmes à trois et quatre niveaux	128
4.4.2.1	Lasers à système fermé à trois niveaux.....	128
4.4.2.2	Lasers à système fermé à quatre niveaux ; comparaison des deux systèmes.....	129
4.4.3	Saturation du gain et intensité dans la cavité en régime stationnaire.....	130
4.5	MODÈLE DE LA CAVITÉ ACTIVE (THÉORIE SEMI-CLASSIQUE)	132
4.5.1	Champ électrique dans le milieu amplificateur.....	132
4.5.2	Conditions du régime stationnaire pour un laser à cavité linéaire	132

4.5.3	Conditions du régime stationnaire pour un laser à cavité en anneau	134
4.5.4	Modes des cavités passive et active. "Frequency pulling"	135

Partie 5. Régimes de fonctionnement des lasers..... 137

5.1 FONCTIONNEMENT CONTINU D'UN LASER EN MILIEU

À ÉLARGISSEMENT HOMOGENÈ	137	
5.1.1	Fonctionnement monomode	137
5.1.2	Puissance et couplage optimal de sortie	139
5.1.2.1	Intensité de sortie d'un laser à faibles pertes	139
5.1.2.2	Couplage optimal de sortie d'un laser à faibles pertes et à fortes pertes.....	140
5.1.2.3	Évolution de la puissance au voisinage du seuil	142
5.1.3	Creusement spatial en cavité linéaire ("hole burning spatial")	143
5.1.3.1	Interférences et saturation	143
5.1.3.2	Bilan en énergie. Puissance de sortie	144
5.1.4	Fonctionnement multimode en cavité linéaire	145
5.1.5	Largeur spectrale d'un laser monomode continu.....	146
5.1.5.1	Rétrécissement spectral des modes en régime stationnaire.....	146
5.1.5.2	Sources de bruit dans un laser	147
5.1.5.3	Bruit de phase dans une cavité laser	147
5.1.5.4	Spectre du champ laser. Formule de Schawlow-Townes. Cas des lasers à gaz	148
5.1.5.5	Cas des diodes lasers. Formule de Schawlow-Townes modifiée.....	149

5.2 FONCTIONNEMENT CONTINU D'UN LASER EN MILIEU

À ÉLARGISSEMENT INHOMOGENÈ	151	
5.2.1	Application des conditions d'oscillation ; fonctionnement multimode	151
5.2.2	Puissance de sortie pour un mode donné	152
5.2.3	Compétition de modes : insuffisance du modèle des équations de débit.....	152
5.2.4	Cas spécifique des lasers à gaz.....	156
5.2.4.1	Creusement spectral dans une cavité linéaire (hole burning spectral)	153
5.2.4.2	Lamb dip dans les lasers à gaz	154
5.2.4.3	Lamb dip inverse.....	154
5.2.5	Creusement spatial dans les milieux à élargissement inhomogène.....	155

5.3 SÉLECTION D'UN MODE (CAS HOMOGENÈ ET INHOMOGENÈ)

5.3.1	Différentes techniques pour rendre un laser monomode.....	155
5.3.2	Stabilisation en fréquence d'un laser	158

5.4 FONCTIONNEMENT RELAXÉ..... 159

5.4.1	Régimes transitoires. Perturbations du régime stationnaire.....	159
5.4.2	Description en régime monomode. Oscillations de relaxation	159
5.4.3	Modèle perturbatif, oscillations sinusoïdales amorties	161
5.4.4	Fonctionnement relaxé en régime multimode.....	162
5.4.5	Suppression du régime relaxé	162

5.5 FONCTIONNEMENT DÉCLENCHÉ ("Q-SWITCHING")

5.5.1	Principe de la technique de déclenchement	163
5.5.2	Méthodes de déclenchement	164
5.5.2.1	Déclenchement actif par un miroir ou un prisme tournant.....	164
5.5.2.2	Déclenchement actif par un modulateur électro-optique ("MEO").....	164
5.5.2.3	Déclenchement actif par un modulateur acousto-optique ("MAO").....	165
5.5.2.4	Déclenchement passif par un absorbant saturable.....	166
5.5.2.5	Déclenchement passif par un film absorbant mince.....	166
5.5.3	Théorie du déclenchement actif	167

5.5.3.1	Phase de pompage.....	167
5.5.3.2	Démarrage de l'impulsion.....	167
5.5.3.3	Crête de l'impulsion.....	167
5.5.3.4	Extinction et profil temporel des impulsions	169
5.5.4	Synchronisation par injection.....	170
5.6	 FONCTIONNEMENT EN MODES BLOQUÉS ("MODE LOCKING").....	171
5.6.1	Principe de la technique de verrouillage de modes en phase	171
5.6.1.1	Bases de l'étude du fonctionnement en modes bloqués	171
5.6.1.2	Propriétés temporelle et spectrale des impulsions	172
5.6.1.3	Propriétés des impulsions et transformation de Fourier.....	173
5.6.2	Méthodes de blocage de modes.....	174
5.6.2.1	Blocage de modes actif par modulation d'amplitude (AM)	174
5.6.2.2	Blocage de modes actif par modulation de fréquence (FM)	175
5.6.2.3	Blocage de modes passif.....	175
5.6.3	Exemples de lasers à modes bloqués	176
5.6.4	Traitement et application des impulsions ultra brèves femtoseconde.....	177
5.6.4.1	Amplification à dérive de fréquences ("chirped pulse amplification, CPA")	177
5.6.4.2	Façonnage d'impulsions laser femtosecondes et contrôle cohérent	178
5.6.4.3	Peigne de fréquences.....	179

Partie 6. Équations de Bloch et Bloch-Maxwell, application aux lasers..... 181

6.1	 ÉQUATIONS DE BLOCH POUR UN ATOME À DEUX NIVEAUX	181
6.1.1	Interaction avec un champ cohérent quasi-résonnant : fréquence de Rabi	181
6.1.2	Modèle utilisant la matrice densité	183
6.1.2.1	Matrice densité, équations d'évolution.....	183
6.1.2.2	Cohérences lentement variables, équations d'évolution.....	184
6.1.3	Formalisme de Bloch, équations et vecteur de Bloch	185
6.1.4	Équations de Bloch optiques pour un atome à deux niveaux.....	187
6.2	 ÉQUATIONS DE BLOCH OPTIQUES D'UN SYSTÈME À 4 NIVEAUX.....	189
6.2.1	Équations d'évolution de la matrice densité.....	189
6.2.2	Réponse stationnaire du système à l'onde laser.....	190
6.2.2.1	Réponse en l'absence d'onde laser.....	190
6.2.2.2	Réponse en présence de l'onde laser	190
6.2.2.3	Phénomène de saturation	190
6.2.2.4	Susceptibilité complexe et vecteur de Bloch	191
6.2.3	Lien avec les coefficients d'Einstein	192
6.3	 ÉQUATIONS DE BLOCH-MAXWELL DU LASER.....	193
6.3.1	Équation d'évolution de la polarisation.....	193
6.3.2	Équation d'évolution de la différence de population.....	193
6.3.3	Équation d'évolution du champ électrique	193
6.3.4	Interprétation des équations de Bloch-Maxwell	194
6.3.5	Régime stationnaire.....	195
6.3.6	Régime transitoire, classification des lasers.....	195

Partie 7. Introduction à l'optique non linéaire..... 197

7.1	 INTRODUCTION À L'ÉTUDE DE L'OPTIQUE NON LINÉAIRE.....	197
7.1.1	Généralités.....	197

7.1.2	Description des principaux processus non linéaires du second ordre	199
7.1.2.1	Génération du deuxième harmonique (doublage de fréquence, "SHG")	199
7.1.2.2	Génération des fréquences somme ("SFG") et différence ("DFG")	200
7.1.2.3	Génération et oscillation paramétrique optique (OPO)	201
7.1.2.4	Notation conventionnelle pour la susceptibilité $\chi^{(2)}$	202
7.1.2.5	Génération d'harmoniques élevées avec des cristaux non linéaires du 2 nd ordre	202
7.1.3	Description des principaux processus non linéaires du troisième ordre	203
7.1.3.1	Polarisation non linéaire du troisième ordre	203
7.1.3.2	Notation conventionnelle pour la susceptibilité $\chi^{(3)}$	203
7.1.3.3	Génération du troisième harmonique	203
7.1.3.4	Diffusions Raman et Brillouin stimulées, absorption à deux photons	205
7.1.3.5	Absorption saturable et bistabilité optique	207
7.2	POLARISATION ET SUSCEPTIBILITÉS NON LINÉAIRES	208
7.2.1	Nature tensorielle de la susceptibilité linéaire	208
7.2.2	Susceptibilité non linéaire du second ordre	208
7.2.2.1	Génération du second harmonique et classes cristallines	208
7.2.2.2	Génération du second harmonique et matrice contractée de la susceptibilité	210
7.2.2.3	Mélange de fréquences (frequency mixing, SFG, DFG, OPO)	213
7.2.2.4	Coefficient effectif d pour une configuration géométrique donnée	214
7.2.3	Susceptibilités non linéaires d'ordre supérieur	214
7.2.3.1	Cas général	214
7.2.3.2	Génération du troisième harmonique (THG)	215
7.3	PROPAGATION DANS UN MILIEU NON LINÉAIRE ;	
	RELATIONS DE MANLEY-ROWE	216
7.3.1	Équation de propagation pour des ondes planes colinéaires	216
7.3.2	Équations de propagation pour le mélange à trois ondes	216
7.3.3	Flux d'énergie et amplitudes réduites	217
7.3.4	Relations de Manley-Rowe pour les flux d'énergie	218
7.4	ACCORD DE PHASE EN OPTIQUE NON LINÉAIRE	219
7.4.1	Accord de phase et longueur de cohérence	219
7.4.2	Mélange à trois ondes colinéaires et non colinéaires	220
7.4.3	Généralisation au mélange à quatre ondes	220
7.5	NON LINÉARITÉ DU SECOND ORDRE : OBTENTION DE	
	L'ACCORD DE PHASE DANS LES MILIEUX BIRÉFRINGENTS	221
7.5.1	Effet du désaccord de phase pour le doublage de fréquence	221
7.5.1.1	Ondes planes et rendement de conversion faible	221
7.5.1.2	Rendement à l'accord de phase et pour une conversion importante	222
7.5.1.3	Doublage de fréquence par un faisceau gaussien focalisé	223
7.5.2	Rappels utiles sur les milieux optiques biréfringents ; cristaux uniaxes	224
7.5.3	Accord de phase dans un cristal uniaxe pour le doublage de fréquence	226
7.5.3.1	Accord de phase de type I dans un cristal uniaxe négatif	226
7.5.3.2	Généralisation de l'accord de phase dans un cristal uniaxe	228
7.5.4	Cristaux à quasi-accord de phase	230
7.5.5	Doublage de fréquence dans une cavité résonnante passive ou active	231
7.5.6	Généralisation au mélange de fréquences	233
7.6	AMPLIFICATION ET OSCILLATION PARAMÉTRIQUES	235
7.6.1	Description des méthodes et hypothèses d'études	235
7.6.2	Gain de l'amplification paramétrique	237
7.6.3	Oscillateur paramétrique doublement résonnant ("DROPO")	238
7.6.3.1	Équations des amplitudes des ondes signal et complémentaire	238

7.6.3.2	Gain et intensité du faisceau pompe au seuil de l'oscillation paramétrique	239
7.6.3.3	Puissance de sortie et saturation de la pompe	239
7.6.4	Oscillateur paramétrique simplement résonnant ("SROPO")	241
7.6.5	Accord de phase et réglage spectral dans les oscillateurs paramétriques	242
7.6.5.1	Condition d'accord de phase colinéaire dans un cristal uniaxe	242
7.6.5.2	Quasi-accord de phase	242
7.6.5.3	Variation des fréquences signal et complémentaire de l'oscillation paramétrique.....	242
7.6.5.4	Influence des modes de la cavité et largeurs spectrales dans les OPO.....	244
7.7	CONJUGAISON DE PHASE OPTIQUE NON LINÉAIRE	245
7.7.1	Définition de la conjugaison de phase ("Optical Phase Conjugation").....	245
7.7.2	Principe de la conjugaison de phase par mélange dégénéré à quatre ondes	247
7.7.3	Résultats théoriques dans les conditions expérimentales usuelles.....	249
7.7.4	Résonateurs optiques avec des miroirs à conjugaison de phase	252
7.7.5	Loi ABCD et résonateurs à conjugaison de phase optique	253
7.7.6	Quelques applications pratiques de la conjugaison de phase optique.....	255
7.8	SOLITONS OPTIQUES	258
7.8.1	Les solitons en physique	258
7.8.2	Les solitons en optique.....	259
7.8.2.1	Solitons temporels.....	259
7.8.2.2	Solitons spatiaux	262
7.8.3	Les solitons optiques temporels	263
7.8.3.1	Dispersion d'un paquet d'ondes au cours de la propagation.....	263
7.8.3.2	Compensation de la dispersion linéaire par l'effet Kerr non linéaire : solitons.....	264
7.8.4	Les solitons temporels dans les fibres optiques	267
7.8.4.1	Propagation du soliton fondamental dans une fibre non absorbante.....	267
7.8.4.2	Propagation du soliton fondamental dans une fibre légèrement absorbante	268
7.8.4.3	Compensation des pertes par des amplificateurs à fibres.....	269
7.8.5	Création des impulsions solitons et méthodes expérimentales	271
7.9	COMPLÉMENTS SUR LES SUSCEPTIBILITÉS NON LINÉAIRES DANS LE MODÈLE CLASSIQUE DE L'OSCILLATEUR ANHARMONIQUE	273
7.9.1	Milieux non centrosymétriques ; susceptibilité non linéaire du 2 ^{ème} ordre.....	273
7.9.1.1	Équation de l'oscillateur anharmonique	273
7.9.1.2	Solution perturbative	274
7.9.1.3	Règle de Miller pour les susceptibilités du second ordre.....	275
7.9.2	Milieux centrosymétriques ; susceptibilité non linéaire du 3 ^{ème} ordre.....	275
7.9.3	Calcul quantique des susceptibilités.....	276
Partie 8. Textes et corrigés d'exercices		277
8.1	TEXTES D'EXERCICES SUR LA PARTIE 1.....	277
8.1.1	Modes du champ électromagnétique dans les résonateurs fermés et ouverts	277
8.1.2	Lampe spectrale, lasers à colorant continu et impulsionnel.....	278
8.1.3	Impulsion laser : distribution spectrale et degré de cohérence complexe.....	278
8.1.4	Mesure de la distance Terre-Lune avec un laser à impulsions brèves	279
8.2	TEXTES D'EXERCICES SUR LA PARTIE 2.....	279
8.2.1	Pertes dans une cavité optique	279
8.2.2	Cavité laser symétrique à 4 miroirs.....	280
8.2.3	Cavité à deux miroirs, concave et convexe.....	280
8.2.4	Cavité instable à deux miroirs convexes de même rayon	280
8.2.5	Énergie dans un faisceau gaussien	281

8.2.6	Mesure de la divergence d'un faisceau gaussien.....	281
8.2.7	Formules de conjugaison et de grandissement pour un faisceau gaussien.....	282
8.2.8	Cavité d'un laser hélium-néon.....	282
8.2.9	Modes TEM ₀₀ et TEM ₇₀ d'une cavité symétrique à deux miroirs.....	282
8.2.10	Modes TEM ₀₀ d'une cavité en anneau symétrique à trois miroirs.....	283
8.3	TEXTES D'EXERCICES SUR LA PARTIE 3.....	283
8.3.1	Atome sous rayonnement thermique.....	283
8.3.2	Émission induite dans une vapeur atomique.....	284
8.3.3	Atome en interaction avec un rayonnement.....	284
8.3.4	Émission et absorption dans un cristal de rubis. Phénomène de saturation.....	285
8.3.5	Inversion de population dans un système à trois niveaux.....	286
8.3.6	Mesure du gain pour un laser hélium-xénon.....	286
8.3.7	Système à 4 niveaux.....	287
8.3.8	Élargissements homogène et inhomogène.....	288
8.3.9	Creusement spectral (hole burning spectral) dans une vapeur de sodium.....	288
8.3.10	Amplificateur de gaz CO ₂	289
8.3.11	Saturation dans un cristal Nd:YLF (Nd:LiYF ₄).....	290
8.4	TEXTES D'EXERCICES SUR LA PARTIE 4.....	291
8.4.1	Équations du laser et fonctionnement continu.....	291
8.4.2	Établissement du régime stationnaire d'un laser monomode.....	292
8.4.3	Laser en onde progressive et en onde quasi stationnaire ; creusement spatial.....	293
8.4.4	Lasers continus à gain élevé.....	294
8.4.5	Laser continu hélium-néon.....	295
8.5	TEXTES D'EXERCICES SUR LA PARTIE 5.....	296
8.5.1	Fonctionnement multimode d'un laser hélium-cadmium.....	296
8.5.2	Laser en fonctionnement déclenché actif ("Q-switch actif").....	296
8.5.3	Laser en fonctionnement relaxé.....	297
8.5.4	Laser en fonctionnement déclenché passif ("Q-switch passif").....	298
8.6	TEXTES D'EXERCICES SUR LA PARTIE 6.....	299
8.6.1	Équations de Bloch optiques pour un atome à deux niveaux de Rydberg.....	299
8.7	TEXTES D'EXERCICES SUR LA PARTIE 7.....	299
8.7.1	Coefficient non linéaire effectif du second ordre.....	299
8.7.2	Doublage de fréquence dans un cristal de tellure.....	300
8.7.3	Triplage de fréquence dans un gaz.....	301
8.7.4	Sommation de fréquences (SFG).....	302
8.7.5	Génération d'une radiation IR par différence de fréquences (DFG).....	303
8.7.6	Oscillateur paramétrique doublement résonnant.....	304
8.8	CORRIGÉS SUCCINCTS DES EXERCICES.....	306
8.8.1	Corrigés des exercices sur la partie 1.....	306
8.8.1.1	Modes dans les résonateurs fermés et ouverts.....	306
8.8.1.2	Lampe spectrale, lasers à colorant continu et impulsif.....	306
8.8.1.3	Impulsion laser : distribution spectrale, degré de cohérence complexe.....	306
8.8.1.4	Mesure de la distance Terre-Lune avec un laser à impulsions brèves.....	307
8.8.2	Corrigés des exercices sur la partie 2.....	307
8.8.2.1	Pertes dans une cavité optique.....	307
8.8.2.2	Cavité laser symétrique à 4 miroirs.....	308
8.8.2.3	Cavité à deux miroirs, concave et convexe.....	308
8.8.2.4	Cavité instable à deux miroirs convexes de même rayon.....	309

8.8.2.5	Énergie dans un faisceau gaussien	309
8.8.2.6	Mesure de la divergence d'un faisceau gaussien	310
8.8.2.7	Formules de conjugaison et de grandissement d'un faisceau gaussien	310
8.8.2.8	Cavité d'un laser hélium-néon	311
8.8.2.9	Modes TEM ₀₀ et TEM ₇₀ d'une cavité symétrique à deux miroirs	311
8.8.2.10	Modes TEM ₀₀ d'une cavité en anneau symétrique à trois miroirs	312
8.8.3	Corrigés des exercices sur la partie 3	313
8.8.3.1	Atome sous rayonnement thermique	313
8.8.3.2	Émission induite dans une vapeur atomique	313
8.8.3.3	Atome en interaction avec un rayonnement	314
8.8.3.4	Émission et absorption dans un cristal de rubis. Phénomène de saturation	315
8.8.3.5	Inversion de population dans un système à trois niveaux	316
8.8.3.6	Mesure du gain pour un laser hélium-xénon	317
8.8.3.7	Système à 4 niveaux	317
8.8.3.8	Élargissements homogène et inhomogène	318
8.8.3.9	Creusement spectral dans une vapeur de sodium	319
8.8.3.10	Amplificateur de gaz CO ₂	320
8.8.3.11	Saturation dans un cristal Nd:YLF (Nd:LiYF ₄)	321
8.8.4	Corrigés des exercices sur la partie 4	322
8.8.4.1	Équations du laser et fonctionnement continu	322
8.8.4.2	Établissement du régime stationnaire d'un laser monomode	322
8.8.4.3	Laser en onde progressive et en onde quasi stationnaire : creusement spatial	323
8.8.4.4	Lasers continus à gain élevé	324
8.8.4.5	Laser continu hélium-néon	325
8.8.5	Corrigés des exercices sur la partie 5	326
8.8.5.1	Fonctionnement multimode d'un laser hélium-cadmium	326
8.8.5.2	Laser en fonctionnement déclenché actif	327
8.8.5.3	Laser en fonctionnement relaxé	328
8.8.5.4	Laser en fonctionnement déclenché passif	328
8.8.6	Corrigés des exercices sur la partie 6	330
8.8.6.1	Équations de Bloch optiques pour un atome à deux niveaux de Rydberg	330
8.8.7	Corrigés des exercices sur la partie 7	331
8.8.7.1	Coefficient non linéaire effectif du second ordre	331
8.8.7.2	Doublage de fréquence dans un cristal de tellure	332
8.8.7.3	Triplage de fréquence dans un gaz	333
8.8.7.4	Sommation de fréquences	333
8.8.7.5	Génération d'une radiation IR par différence de fréquences	334
8.8.7.6	Oscillateur paramétrique doublement résonnant	335

Partie 9. Textes et corrigés de problèmes 337

9.1	TEXTES DE PROBLÈMES EN OPTIQUE DES LASERS	337
9.1.1	Laser chimique oxygène-iode à télescope intra-cavité	337
9.1.2	Laser à fibre optique monomode amplificatrice	338
9.1.3	Laser Nd:YAG monomode pompé par un laser diode	340
9.1.4	Laser Nd:YVO ₄ continu en anneau	341
9.1.5	Diode laser à cavité externe (réseau en configuration Littrow)	343
9.2	TEXTES DE PROBLÈMES EN PHYSIQUE DES LASERS	345
9.2.1	Fonctionnement d'un laser diode GaAs/AlGaAs	345
9.2.2	Laser Yb:YAG "tout solide" ($\lambda = 1030$ nm)	348
9.2.3	Laser à argon ionisé à étalon Fabry-Perot interne	351
9.2.4	Laser à dioxyde de carbone	353
9.2.5	Laser linéaire impulsif à vapeur de cuivre	354

9.2.6	Fonctionnement continu d'un laser à cristal de $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$	356
9.2.7	Variation temporelle d'une impulsion dans un laser déclenché	358
9.2.8	Fonctionnements d'un laser saphir-titane ($\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$)	359
9.2.9	Laser à injection	362
9.2.10	Déclenchement répétitif d'un laser	365
9.2.11	Gyromètre laser hélium-néon à 633 nm	366
9.2.12	Amplification d'une impulsion lumineuse très brève	369
9.2.13	Suppression des oscillations de relaxation dans un laser $\text{Cr}:\text{Tm}:\text{YAG}$	370
9.3	TEXTES DE PROBLÈMES EN OPTIQUE NON LINÉAIRE	373
9.3.1	Production du 5 ^{ème} harmonique d'un laser $\text{Nd}:\text{YAG}$ dans un cristal de KDP	373
9.3.2	Doublage de fréquence (SHG) dans un cristal de ZnGeP_2	375
9.3.3	Oscillateur paramétrique LiNbO_3 simplement résonnant (SROPO).....	378
9.3.4	"Up-conversion" dans un cristal organique.....	382
9.4	CORRIGÉS DES PROBLÈMES EN OPTIQUE DES LASERS.....	384
9.4.1	Corrigé du problème 9.1.1	384
9.4.2	Corrigé du problème 9.1.2	384
9.4.3	Corrigé du problème 9.1.3	385
9.4.4	Corrigé du problème 9.1.4	387
9.4.5	Corrigé du problème 9.1.5	388
9.5	CORRIGÉS DES PROBLÈMES EN PHYSIQUE DES LASERS	389
9.5.1	Corrigé du problème 9.2.1	389
9.5.2	Corrigé du problème 9.2.2	390
9.5.3	Corrigé du problème 9.2.3	391
9.5.4	Corrigé du problème 9.2.4	393
9.5.5	Corrigé du problème 9.2.5	394
9.5.6	Corrigé du problème 9.2.6	395
9.5.7	Corrigé du problème 9.2.7	396
9.5.8	Corrigé du problème 9.2.8	396
9.5.9	Corrigé du problème 9.2.9	398
9.5.10	Corrigé du problème 9.2.10	399
9.5.11	Corrigé du problème 9.2.11	400
9.5.12	Corrigé du problème 9.2.12	401
9.5.13	Corrigé du problème 9.2.13	402
9.6	CORRIGÉS DES PROBLÈMES EN OPTIQUE NON LINÉAIRE.....	404
9.6.1	Corrigé du problème 9.3.1	404
9.6.2	Corrigé du problème 9.3.2	406
9.6.3	Corrigé du problème 9.3.3	407
9.6.4	Corrigé du problème 9.3.4	409
	Index des parties 1-7	411
	Liste des figures	417
	Liste des tableaux	427