



COLLECTION TECHNIQUE ET SCIENTIFIQUE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

Emission photonique en espace confiné

Adel Rahmani
Frédérique de Fornel

 Eyrolles

Table des matières

Table des figures	vii
Avant-propos	1
1 Fluorescence : description du phénomène	3
1.1 Introduction	3
1.2 Propriétés de l'émission fluorescente	3
1.2.1 Généralités	3
1.2.2 Notion de source élémentaire	4
1.2.3 Durée moyenne d'émission	7
1.2.3.1 Observation de l'intensité émise en fonction du temps	7
1.2.3.2 Lien avec les sources élémentaires	8
1.2.3.3 Analogie mécanique	8
1.3 Pertes d'énergie par rayonnement	10
1.3.1 Puissance totale rayonnée par une particule chargée	10
1.3.2 Pertes par rayonnement d'un dipôle oscillant	12
1.4 Réponse à une excitation	13
1.5 Amortissement radiatif – Réaction de rayonnement	14
1.5.1 Nature physique de la force de freinage	14
1.5.2 Discussion	15
1.6 En résumé	16
2 Fluorescence en espace confiné : approche classique	17
2.1 Introduction	17
2.2 Distribution angulaire de la lumière émise	17
2.3 Durée de vie	19
2.3.1 Modèle de la chauve-souris	19

Table des matières

4.4.1	Calcul de la susceptibilité linéaire du champ	114
4.4.2	Taux de transition	115
4.4.3	Etude de quelques exemples	119
4.5	Discussion	140
4.5.1	Contribution du champ électrique longitudinal à l'émission spontanée	142
4.5.2	Validité de la méthode	146
4.5.3	Sonde moléculaire de champ proche	148
4.5.4	Formes approchées de la susceptibilité linéaire du champ	152
4.5.4.1	Théorie image	152
4.5.4.2	Approximation statique	154
4.5.4.3	Utilisation d'une forme approchée de la susceptibilité dans la CDM	154
4.5.4.4	Exemple	155
Conclusion		161
A Equations de Maxwell		165
B Susceptibilité élémentaire du spectre d'ondes planes		167
B.1	Modes (\uparrow): $k_z = w_0$	168
B.2	Modes (\downarrow): $k_z = -w_0$	168
C Susceptibilité linéaire du champ à l'intérieur d'une cavité plane		171
D Constantes optiques de l'or et de l'argent		173
D.1	Or	173
D.2	Argent	174
E Effets coopératifs		177
Bibliographie		179

Table des figures

1.1	Dispositif expérimental utilisé par Selényi pour observer les interférences sous grands angles [Selényi 39].	5
1.2	Interprétation de la fluorescence en terme d'un rayonnement dipolaire électrique [Selényi 39].	6
1.3	Lignes du champ électrique pour une charge initialement au repos et accélérée d'une quantité Δv en un temps Δt [Longair 84].	11
2.1	Emission de lumière d'un dipôle près de l'interface entre deux milieux.	18
2.2	Emission de lumière par un dipôle situé près d'une interface : orientation et polarisation.	20
2.3	Diagramme de rayonnement angulaire de la fluorescence émise par des ions Eu^{3+} situés à 6770\AA d'une surface d'or (trait plein : valeurs expérimentales ; tirets : calcul d'interférence). D'après [Drexhage 70].	22
2.4	Principe de la théorie image. L'influence de la surface est remplacée par l'interaction du dipôle avec son dipôle image en espace libre.	25
2.5	Comparaison des résultats donnés par la méthode des interférences (pointillés) et la théorie de Kuhn (ligne continue) avec les valeurs expérimentales de durée de vie mesurées par Drexhage (points). D'après [Kuhn 70].	27
2.6	Transmission d'une onde plane à l'interface entre un milieu matériel et l'air.	28
2.7	Réflexion totale d'une onde plane à l'interface entre un milieu matériel et l'air.	29
2.8	Réflexion totale frustrée.	29
2.9	Mise en évidence de la nature de la lumière émise par une molécule fluorescente située près d'une interface.	31

Table des figures

2.10	Absorption et émission d'ondes évanescentes par des molécules fluorescentes. D'après [Carniglia <i>et al.</i> 72].	32
2.11	Champ électrique créé par un dipôle en présence d'une surface. Contributions directe et réfléchie.	37
2.12	Cavité plane constituée de trois milieux. Les milieux 1 ($z \leq 0$) et 2 ($z \geq d$) ont pour constantes optiques respectives $\epsilon_1(\omega)$ et $\epsilon_2(\omega)$. Le milieu intermédiaire ($0 \leq z \leq d$) dans lequel se trouve le dipôle est supposé être le vide.	38
2.13	Evolution de la durée de vie d'un dipôle placé à l'intérieur d'une cavité plane délimitée par deux milieux diélectriques sans perte ($\epsilon_1 = \epsilon_2 = 2.25$) distants de $1.5\mu\text{m}$: (—) dipôle normal aux parois, (- - -) dipôle parallèle aux parois. La longueur d'onde d'émission du dipôle est 612nm	45
2.14	Evolution de la durée de vie à l'intérieur d'une cavité plane délimitée par deux milieux diélectriques sans pertes ($\epsilon_1 = 2.25$, $\epsilon_2 = 5$) distants de $1.5\mu\text{m}$. (—) dipôle normal aux parois, (- - -) dipôle parallèle aux parois.	47
2.15	Dipôle au voisinage d'un milieu matériel semi-infini.	48
2.16	Distribution angulaire de la puissance émise pour un dipôle "perpendiculaire" au-dessus d'un milieu d'indice de réfraction 1.5. Le dipôle émet à $\lambda = 612\text{nm}$. La cote du dipôle est $z_0 = 0$ (ligne continue), $\lambda/10$ (tirets), $\lambda/2$ (tiret-point). 49	49
2.17	Distribution angulaire de la puissance émise pour un dipôle "perpendiculaire" au-dessus d'un milieu d'indice de réfraction 1.5. Le dipôle émet à $\lambda = 612\text{nm}$. La cote du dipôle est $z_0 = 0$ (ligne continue), λ (tirets), 5λ (tiret-point).	49
2.18	Distribution angulaire de la puissance émise pour un dipôle "perpendiculaire" situé à la surface ($z_0 = 0$) d'un milieu matériel. Le dipôle émet à $\lambda = 612\text{nm}$. L'indice de réfraction du substrat est $n = 1.5$ (ligne continue), 2 (tirets), 2.5 (tiret-point).	50
2.19	Dipôle dans une cavité délimitée par deux milieux non-absorbants d'indices respectifs $\epsilon_1 = 2.25$ et $\epsilon_2 = 5$. Comparaison entre les pertes d'énergie en champ lointain (inverse de la puissance émise en champ lointain) et la durée de vie ($\lambda = 612\text{nm}$).	52
2.20	Dipôle dans une cavité délimitée par deux milieux non-absorbants d'indice $\epsilon_1 = 2.25$	53

2.21	Evolution de la durée de vie à l'intérieur d'une cavité plane délimitée par deux milieux diélectriques ($\epsilon_1 = 2.25$, $\epsilon_2 = 2.25 + 0.1i$) distants de $1.5\mu\text{m}$. (—) dipôle normal aux parois, (- - -) dipôle parallèle aux parois.	54
2.22	Evolution de la durée de vie en fonction de la distance du dipôle à la surface pour $\lambda = 1200\text{nm}$. Comparaison entre une surface d'argent (—) et un conducteur parfait (- - -).	56
2.23	Evolution de la durée de vie en fonction de la longueur d'onde d'émission ainsi que de la distance du dipôle à une surface d'argent.	57
2.24	Parties réelle (trait continu) et imaginaire de Δ (limite statique du coefficient de Fresnel Δ_p) pour une interface vide/argent.	57
2.25	Courbes de dispersion pour les modes de surface dans le modèle de Drude.	58
2.26	Contribution relative du processus d'excitation de plasmons de surface aux pertes d'énergie d'un dipôle (longueur d'onde d'émission 600nm , (—) dipôle perpendiculaire, (- - -) dipôle parallèle).	60
2.27	Evolution de la durée de vie d'une molécule fluorescente en fonction de sa position dans une cavité argent/vide/or et de sa longueur d'onde d'émission. Le moment dipolaire associé à la molécule est orienté parallèlement aux parois.	61
2.28	Evolution de la durée de vie d'une molécule fluorescente en fonction de sa position dans une cavité argent/vide/or et de sa longueur d'onde d'émission. Le moment dipolaire associé à la molécule est orienté perpendiculairement aux parois.	61
2.29	Taux d'amortissement dans une cavité plane de hauteur d . Le dipôle est à une cote $z = d/2$. Trait continu : argent ; trait pointillé : conducteur parfait.	62
2.30	Taux d'amortissement dans une cavité plane de hauteur d . Le dipôle est à une cote $z = d/4$. Trait continu : argent ; trait pointillé : conducteur parfait.	63
3.1	Le vide en électrodynamique classique.	74
3.2	Diagramme d'énergie de l'atome à deux niveaux.	85
4.1	Diffusion d'une onde électromagnétique plane par un ensemble de N sphères. Représentation schématique du couplage de l'une des sphères avec les $N - 1$ autres.	108

Table des figures

4.2	Illustration des mécanismes d'interaction directs et réfléchis pour un système de 2 sphères dipolaires situées au voisinage d'un substrat.	109
4.3	Décomposition d'un objet en un ensemble de dipôles.	111
4.4	Diffusion d'une onde évanescente.	112
4.5	$ \mathbf{E} ^2$ calculé à la cote $z = 80\text{nm}$. La structure est éclairée en réflexion totale (angle 45° , $\lambda_0 = 488\text{nm}$, module du champ électrique de l'onde incidente égal à 1).	113
4.6	Illustration des trois types d'interactions entre une particule fluorescente et une particule polarisable, au voisinage d'un substrat.	117
4.7	Configuration type : une molécule fluorescente est située à une distance z_0 au-dessus d'un substrat plan sur lequel se trouve un objet parallélépipédique (plot) de hauteur H et de dimension latérale L	119
4.8	Vue de dessus des structures étudiées.	120
4.9	Evolution du taux d'émission spontanée (longueur d'onde d'émission 612nm) pour une molécule fluorescente située à 90nm au-dessus de trois plots diélectriques ($\epsilon = 2.25$) de hauteur $H = 50\text{nm}$ et de largeurs respectives $L = 100, 200$ et 250nm . Le substrat est un diélectrique non-absorbant ($\epsilon = 2.25$).	121
4.10	Vue de dessus des structures étudiées.	122
4.11	Evolution du taux d'émission spontanée (longueur d'onde d'émission 612nm) pour une molécule fluorescente située à 90nm au-dessus de deux plots diélectriques de hauteur $H = 50\text{nm}$ et de largeur $L = 250\text{nm}$. Le plot de gauche est non-absorbant ($\epsilon = 2.25$) alors que le plot de droite est absorbant ($\epsilon = 2.25 + i0.1$). Le substrat est un diélectrique non-absorbant ($\epsilon = 2.25$).	123
4.12	Variation du taux d'émission spontanée ($\lambda = 612\text{nm}$), pour un dipôle situé à la cote z_0 au-dessus d'une surface d'or, en fonction de l'épaisseur d'une couche diélectrique de constante optique ϵ . (—) dipôle $\parallel z$; (- - -) dipôle $\perp z$	124
4.13	Evolution du taux d'émission spontanée (longueur d'onde d'émission 612nm) pour une molécule fluorescente située à 90nm au-dessus de deux plots diélectriques de hauteur $H = 50\text{nm}$ et de largeur $L = 250\text{nm}$. Le plot de gauche est non-absorbant ($\epsilon = 2.25$) alors que le plot de droite est absorbant ($\epsilon = 2.25 + i0.1$). Le substrat est en or.	125

4.14	Evolution du taux d'émission spontanée (longueur d'onde d'émission 520nm) pour une molécule fluorescente située à 90nm au-dessus de deux plots diélectriques non-absorbants de hauteur $H = 50\text{nm}$ et de largeur $L = 250\text{nm}$. Plot de gauche $\epsilon = 2.25$; plot de droite $\epsilon = 5$. Le substrat est en or.	127
4.15	Variation du taux d'émission spontanée ($\lambda = 520$), pour un dipôle situé à la cote z_0 au-dessus d'une surface d'or, en fonction de l'épaisseur d'une couche diélectrique de constante optique ϵ . (—) dipôle $\parallel z$; (- - -) dipôle $\perp z$. 128	
4.16	Variation du taux d'émission spontanée , pour un dipôle situé à la cote z_0 au-dessus d'un substrat diélectrique, en fonction de l'épaisseur d'une couche diélectrique ($\epsilon = 5$). (—) dipôle $\parallel z$; (- - -) dipôle $\perp z$	129
4.17	Variation du taux d'émission spontanée , pour un dipôle situé à la cote z_0 au-dessus d'un substrat en argent, en fonction de l'épaisseur d'une couche diélectrique de constante optique ϵ . (—) dipôle $\parallel z$; (- - -) dipôle $\perp z$	130
4.18	Evolution du taux d'émission spontanée (longueur d'onde d'émission 335nm) pour une molécule fluorescente située à 90nm au-dessus de deux plots diélectriques non-absorbants de hauteur $H = 50\text{nm}$ et de largeur $L = 250\text{nm}$. Plot de gauche $\epsilon = 2.25$; plot de droite $\epsilon = 5$. Le substrat est en argent.	131
4.19	Vue de dessus de la structure étudiée.	132
4.20	Evolution du taux d'émission spontanée (longueur d'onde d'émission 335nm) pour une molécule fluorescente située à 90nm au-dessus d'un plot en argent de hauteur $H = 50\text{nm}$ et de largeur $L = 250\text{nm}$, déposé sur un substrat d'argent.	133
4.21	Evolution du taux d'émission spontanée (longueur d'onde d'émission 520nm) pour une molécule fluorescente située à 90nm au-dessus d'un plot en argent de hauteur $H = 50\text{nm}$ et de largeur $L = 250\text{nm}$, déposé sur un substrat d'or. 135	
4.22	Evolution du taux d'émission spontanée (longueur d'onde d'émission 520nm) pour une molécule fluorescente située à 90nm au-dessus d'un plot en or de hauteur $H = 50\text{nm}$ et de largeur $L = 250\text{nm}$, déposé sur un substrat d'argent.	137
4.23	Evolution du taux d'émission spontanée (longueur d'onde d'émission 520nm) pour une molécule fluorescente située à 90nm au-dessus d'un plot en or de hauteur $H = 50\text{nm}$ et de largeur $L = 250\text{nm}$, déposé sur un substrat d'or. 139	

Table des figures

4.24	Représentation d'un dipôle situé à 90nm d'un substrat sur lequel est déposé un objet de 50nm de haut et 250nm de large.	140
4.25	Evolution du taux d'émission spontanée (longueur d'onde d'émission 520nm) pour une molécule fluorescente située à 90nm au-dessus d'un plot diélectrique ($\epsilon = 2.25$) de hauteur $H = 50\text{nm}$ et de largeur $L = 500\text{nm}$, déposé sur un substrat d'or.	141
4.26	Contribution longitudinale au taux d'émission spontanée (longueur d'onde d'émission 520nm) pour une molécule fluorescente située à 90nm au-dessus d'un plot en or de hauteur $H = 50\text{nm}$ et de largeur $L = 250\text{nm}$, déposé sur un substrat d'or.	145
4.27	Taux de transition au-dessus d'un plot métallique (hauteur 50nm, largeur 100nm) posé sur un substrat d'or. Longueur d'onde 520nm. Orientation du dipôle: x (haut); y (milieu); z (bas). Colonne de gauche: plot en or; colonne de droite plot en argent. Nombre d'éléments de discrétisation: (\dots) $N=32 \iff d = 25\text{nm}$; ($-\cdot$) $N=256 \iff d = 12.5\text{nm}$; ($-$) $N=500 \iff d = 10\text{nm}$	147
4.28	Modèle de discrétisation pour la CDM. Chaque point représente un élément polarisable.	149
4.29	Disposition schématique de la sonde moléculaire et des objets dans la cavité.	149
4.30	Variation du taux de transition d'une molécule fluorescente au-dessus d'une structure ne présentant pas de symétrie particulière. Longueur d'onde d'émission: 488nm, cote de balayage $z_0=80\text{nm}$, hauteur de la jonction: 80.5nm.	150
4.31	Variation du taux de transition d'une molécule fluorescente au-dessus d'un échantillon. Longueur d'onde d'émission: 488nm, cote de balayage $z_0=20\text{nm}$, hauteur de la jonction: 20.5nm.	151
4.32	Variation du taux d'émission spontanée (longueur d'onde d'émission 612nm) en fonction de la distance de la particule fluorescente à un substrat diélectrique ($\epsilon = 2.25$). ($-$) susceptibilité exacte; ($- -$) susceptibilité image.	153

4.33	Variation du taux d'émission spontanée (longueur d'onde d'émission 612nm) en fonction de la position de la particule fluorescente au-dessus d'un plot diélectrique de 50nm de haut sur 250nm de large ($N=200$), déposé sur un substrat du même matériau ($\epsilon = 2.25$). (—) susceptibilité exacte; (- - -) susceptibilité image; (-· -) susceptibilité statique. La distance de la particule fluorescente au substrat est de 90nm.	156
4.34	Variation du taux d'émission spontanée (longueur d'onde d'émission 612nm) en fonction de la position de la particule fluorescente au-dessus d'un plot diélectrique de 50nm de haut sur 250nm de large ($N=900$), déposé sur un substrat du même matériau ($\epsilon = 2.25$). (—) susceptibilité exacte; (- - -) susceptibilité image; (-· -) susceptibilité statique. La distance de la particule fluorescente au substrat est de 70nm.	157
4.35	Variation du taux d'émission spontanée (longueur d'onde d'émission 612nm) en fonction de la position de la particule fluorescente au-dessus d'un plot diélectrique de 50nm de haut sur 500nm de large ($N=800$), déposé sur un substrat du même matériau ($\epsilon = 2.25$). La distance de la particule fluorescente au substrat est de 90nm.	158
4.36	Variation du taux d'émission spontanée (longueur d'onde d'émission 520nm) en fonction de la position de la particule fluorescente au-dessus d'un plot diélectrique de 50nm de haut sur 500nm de large ($N=800$), déposé sur un substrat d'or. La distance de la particule fluorescente au substrat est de 90nm.	159
D.1	Partie réelle de la constante diélectrique de l'or.	173
D.2	Partie imaginaire de la constante diélectrique de l'or.	174
D.3	Partie réelle de la constante diélectrique de l'argent.	174
D.4	Partie imaginaire de la constante diélectrique de l'argent.	175
E.1	Couplage entre 2 dipôles.	177