

Développement de filtres multi-spectraux dans l'infrarouge à base de structures plasmoniques

^{1,2}Benjamin VIAL, ¹Frédéric ZOLLA, ¹André NICOLET, ¹Mireille COMMANDRÉ, ²Stéphane TISSERAND

1 : INSTITUT FRESNEL, Domaine universitaire de Saint Jérôme, 13397 Marseille cedex 20, France

2 : SILIOS TECHNOLOGIES, ZI Peynier-Rousset, rue Gaston Imbert Prolongée, 13790 Peynier, France

Résumé

La solution classique pour réaliser des filtres en transmission dans l'infrarouge moyen ou lointain (bandes 2 et 3, de 3 à 5 μm et de 8 à 13 μm) repose sur la technologie multicouche et nécessite quelques dizaines de couches diélectriques. Les structures de type plasmonique sont constituées typiquement d'un substrat isolant sur lequel on dépose une couche métallique qui est ensuite microstructurée. Ces dernières pourraient avantageusement remplacer les composants multicouches, permettant ainsi une simplification du procédé de fabrication et une réduction du coût. La modélisation de telles structures est réalisée par la méthode des éléments finis (FEM). Des codes développés à l'Institut Fresnel permettent de calculer le champ électromagnétique diffracté par des réseaux mono ou bi périodiques **de géométrie et de matériaux quelconques, éclairés par une onde plane d'incidence et de polarisation arbitraires**. On obtient ainsi les efficacités de diffraction et donc la réponse spectrale des structures étudiées. Néanmoins, puisque nous recherchons à réaliser des filtres résonnants, l'étude des fréquences propres de la structure semble plus appropriée. La résolution du problème aux valeurs propres par la méthode des éléments finis permet ainsi d'obtenir les fréquences propres complexes de la structure, qui sont aussi des pôles du coefficient de transmission. Afin de valider la méthode de recherche de résonances par la FEM, nous confrontons les résultats obtenus par cette dernière sur un exemple simple (un slab constitué de 3 diélectriques) avec ceux obtenus par une méthode dite de « tétrachotomie », qui permet d'obtenir numériquement les pôles du coefficient de transmission. Nous présentons ensuite les résultats de la recherche de résonances par la FEM pour un réseau de fentes gravées dans du chrome déposé sur un substrat de verre.

Problème de diffraction

Formulation adaptée à la FEM ([1, 2]).

Matériaux z-anisotropes, à gradient d'indice, dispersifs et à pertes :

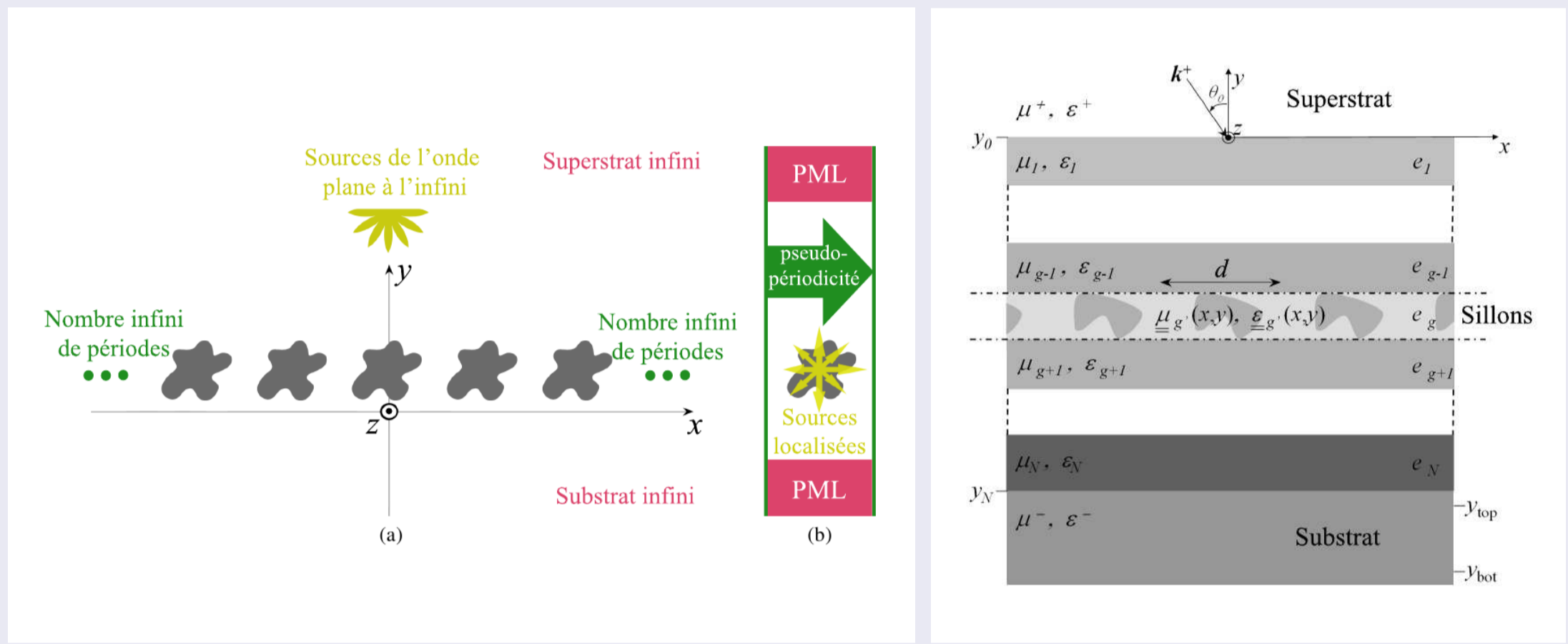
$$\underline{\underline{\delta}}(x, y, \omega) = \begin{pmatrix} \delta_{xx} & \delta_a & 0 \\ \delta_a & \delta_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \delta_{zz} \end{pmatrix}, \text{ et } \underline{\underline{\tilde{\delta}}} = \begin{pmatrix} \delta_{xx} & \delta_a \\ \delta_a & \delta_{yy} \end{pmatrix}, \text{ pour } \delta = \{\epsilon, \mu\}$$

TE : $\mathbf{E} = e(x, y)\mathbf{z}$

$u = e, \underline{\underline{\xi}} = \underline{\underline{\tilde{\mu}}}^T / \det(\underline{\underline{\mu}}), \chi = \epsilon_{zz}$

TM : $\mathbf{H} = h(x, y)\mathbf{z}$

$u = h, \underline{\underline{\xi}} = \underline{\underline{\tilde{\epsilon}}}^T / \det(\underline{\underline{\epsilon}}), \chi = \mu_{zz}$



Problèmes d'infini

Schéma et notations de la structure étudiée

- PMLs ([3])
- Problème radiatif à sources localisées dans l'élément diffractif
- Pseudo-périodicité : $u(x, y) = u_p(x, y)e^{i\alpha x}$ où $u_p(x, y) = u_p(x + d, y)$
- Dimension maximale d'une maille $\frac{\lambda_0}{N_M \sqrt{\text{Re}(\epsilon_j)}}, N_M \in \mathbb{N}^*$ paramètre de maille

⇒ Calcul des efficacités de diffraction et pertes

Recherche des modes à pertes

- Problème aux valeurs propres (PVP) :

Propagation selon Ox : $u(x, y) = \psi(y)e^{i\alpha x}$, $\alpha = k_0 \sin(\theta_0)$ fixé
 ⇒ Trouver $\omega_n \in \mathbb{C}$ et ψ tels que :

$$-\chi^{-1} \text{div}(\underline{\underline{\xi}} \nabla u) = \omega_n^2 u$$

Résolution par la FEM.

- Pôles du coefficient de transmission :

$$t_\alpha(\omega) = \sum_{n \in \mathbb{N}} \frac{A_n}{\omega - \omega_n} + g(\omega)$$

$A_n \in \mathbb{C}$, g fonction holomorphe quelconque.

⇒ Méthode numérique robuste : **tétrachotomie** ([4]).

Validation : slab

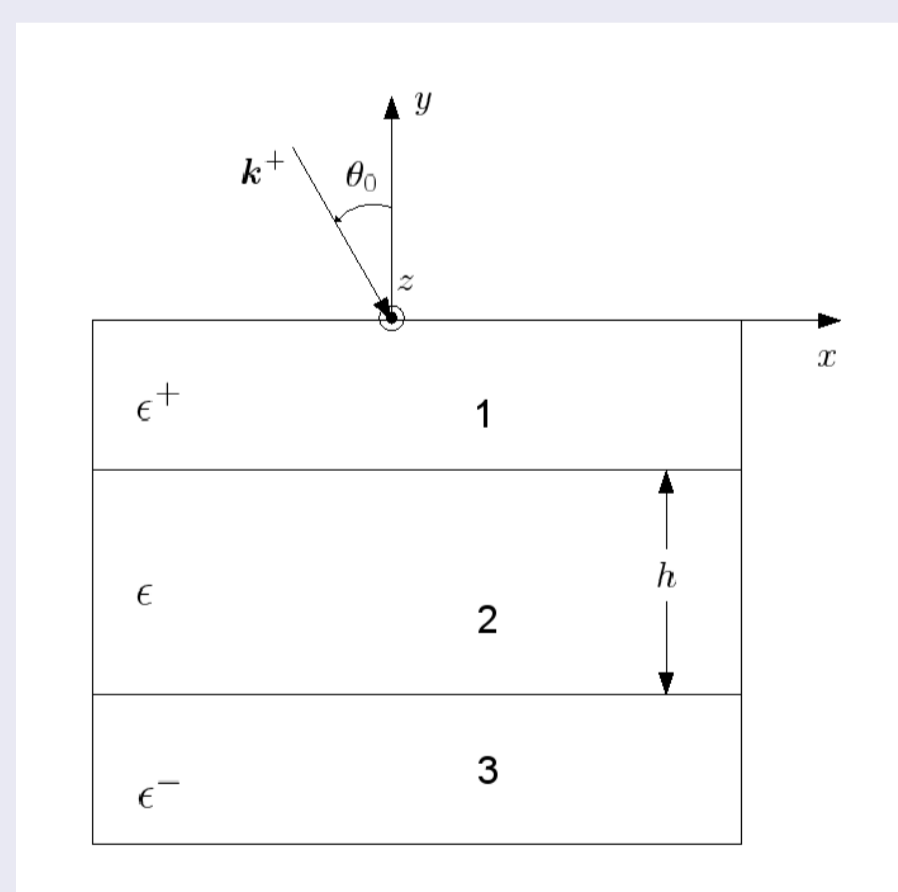


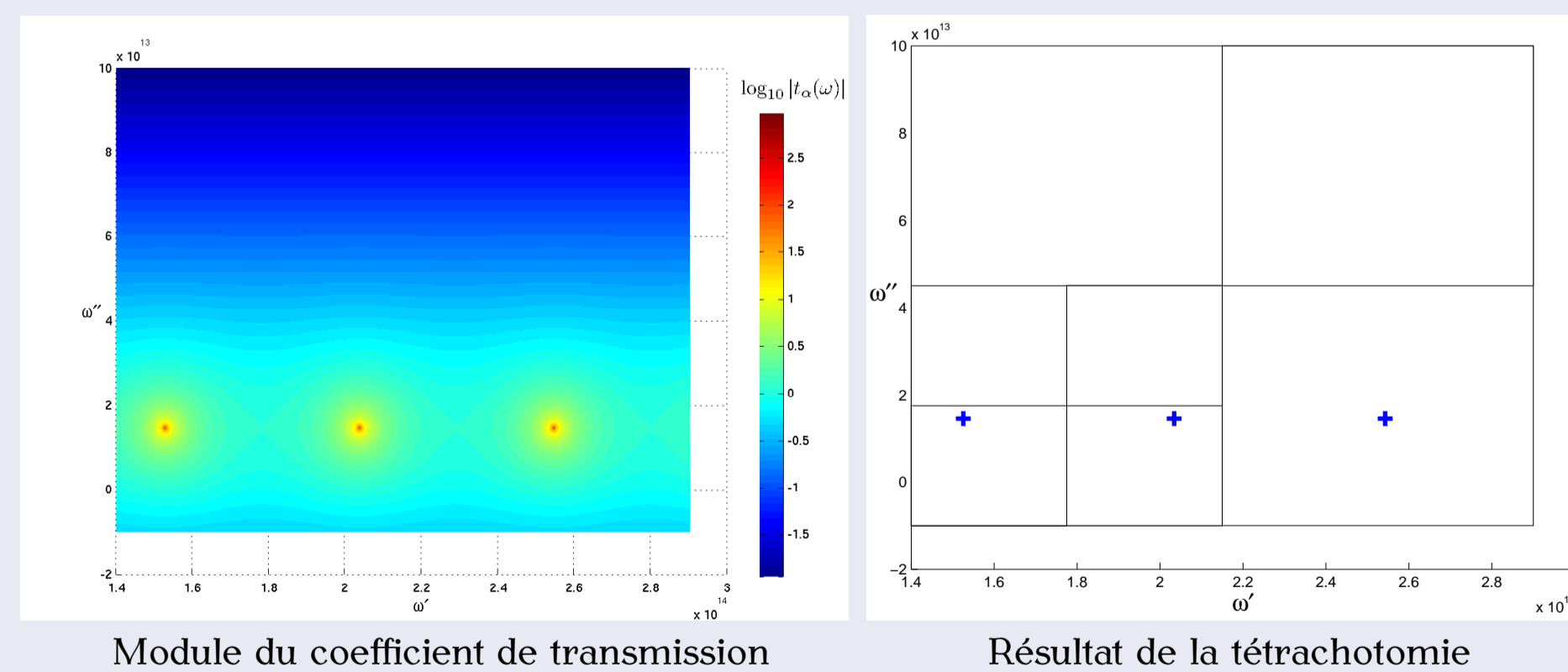
Schéma et notations du slab étudié

Paramètres :
 $\epsilon^+ = 1, \epsilon^- = 7, \epsilon^0 = 1.5,$
 $h = 7 \mu\text{m}, \theta_0 = 0,$
 polarisation TM

	Tétrachotomie	PVP
ω_1	1.52561 + 0.14547i	1.52563 + 0.14547i
ω_2	2.03415 + 0.14547i	2.03415 + 0.14547i
ω_3	2.54269 + 0.14547i	2.54269 + 0.14547i

Pulsations propres ω_n (10^{14} Hz)

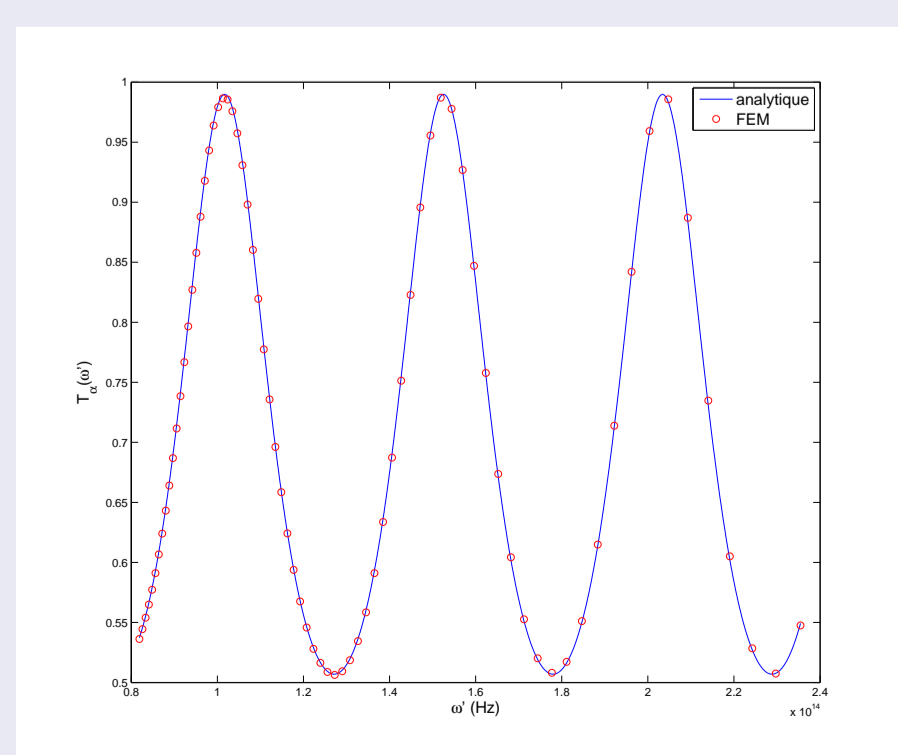
$$\omega = \omega' + i\omega''$$



Module du coefficient de transmission

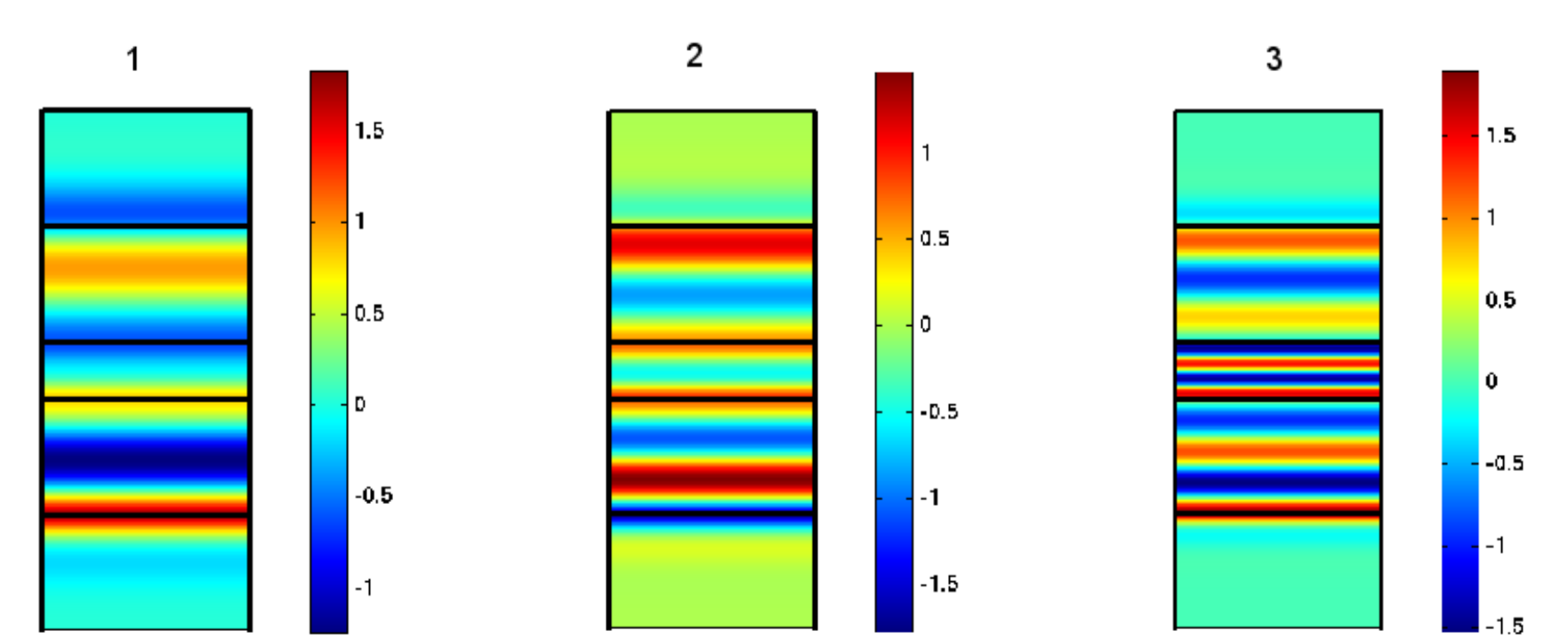
Résultat de la tétrachotomie

Coefficient de transmission $t_\alpha(\omega)$ connu analytiquement.



Coefficient de transmission en énergie

⇒ Résultats en accord



Modes propres : $\Re t(h)$ (A/m)

Réseau de fentes

Dans le cas général : pas de solution analytique

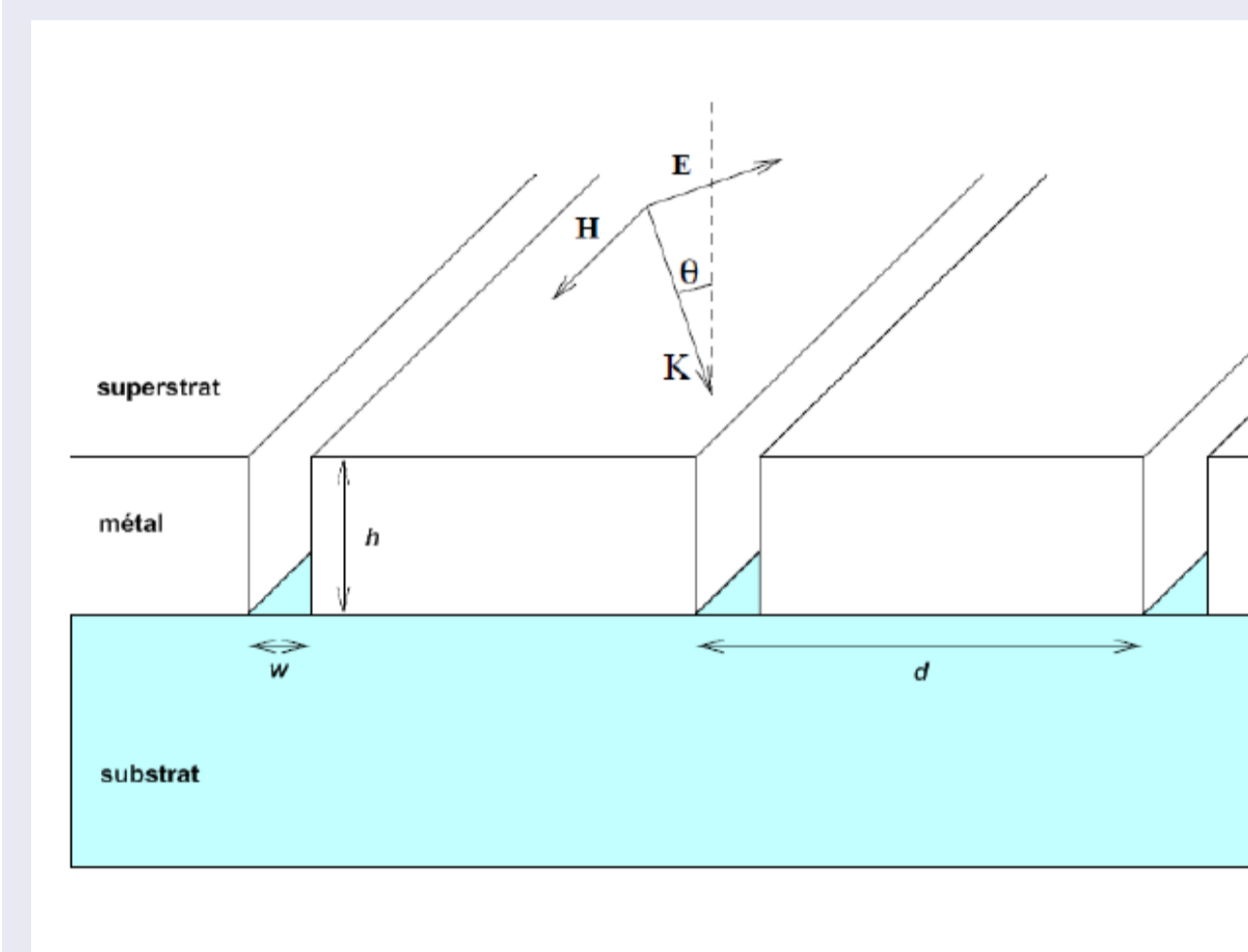
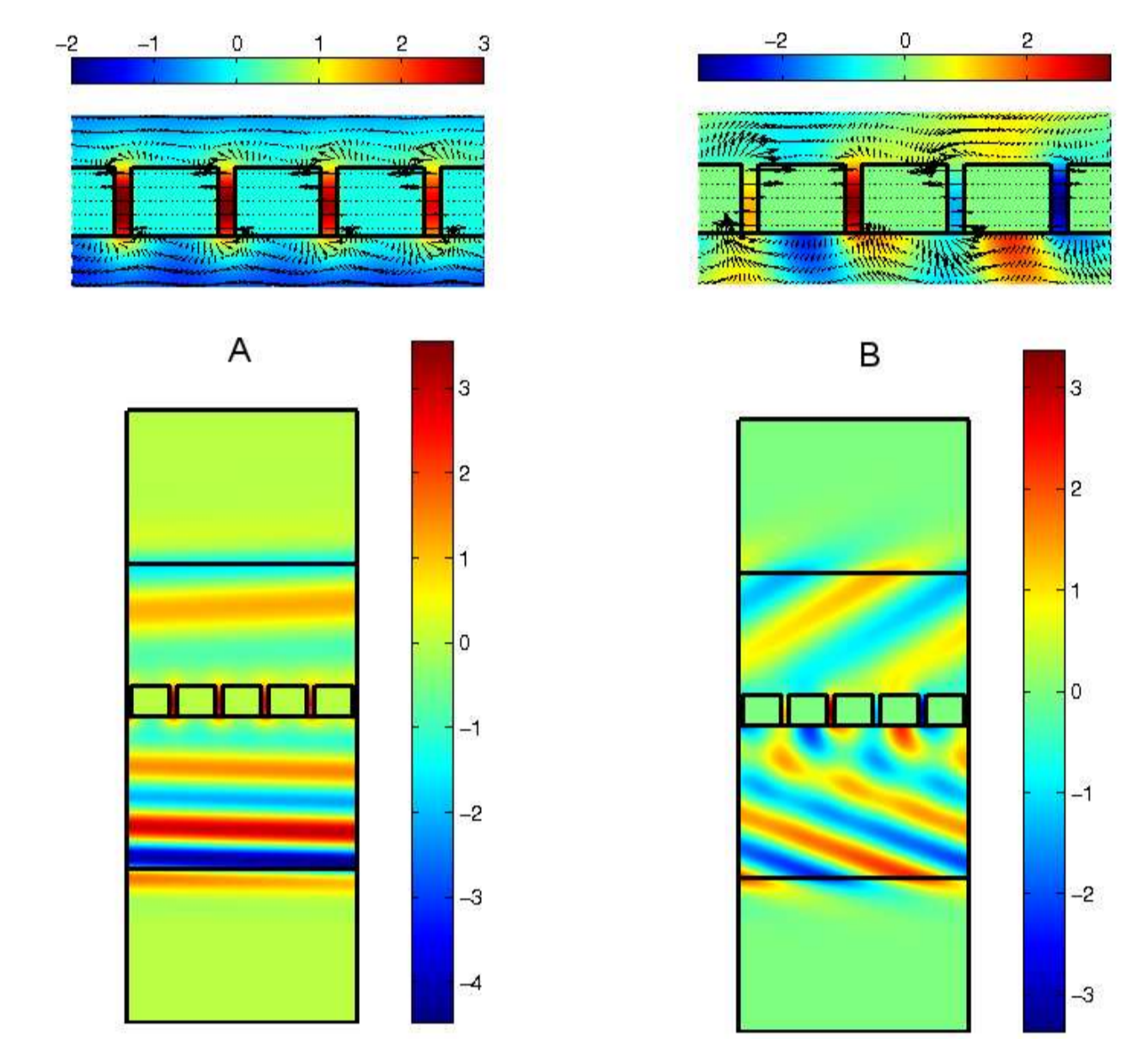


Schéma du réseau de fentes étudié

Paramètres :
 $\epsilon^+ = 1, \epsilon^- = 2.25$, métal : Cr $\epsilon_C(\omega)$ ([5])
 $d = 6 \mu\text{m}, h = 4 \mu\text{m}, w = 1 \mu\text{m}$,
 polarisation TM



Modes propres : $\Re t(h)$ (A/m). A : $\alpha = 0.1\pi/d$ et B : $\alpha = 0.5\pi/d$

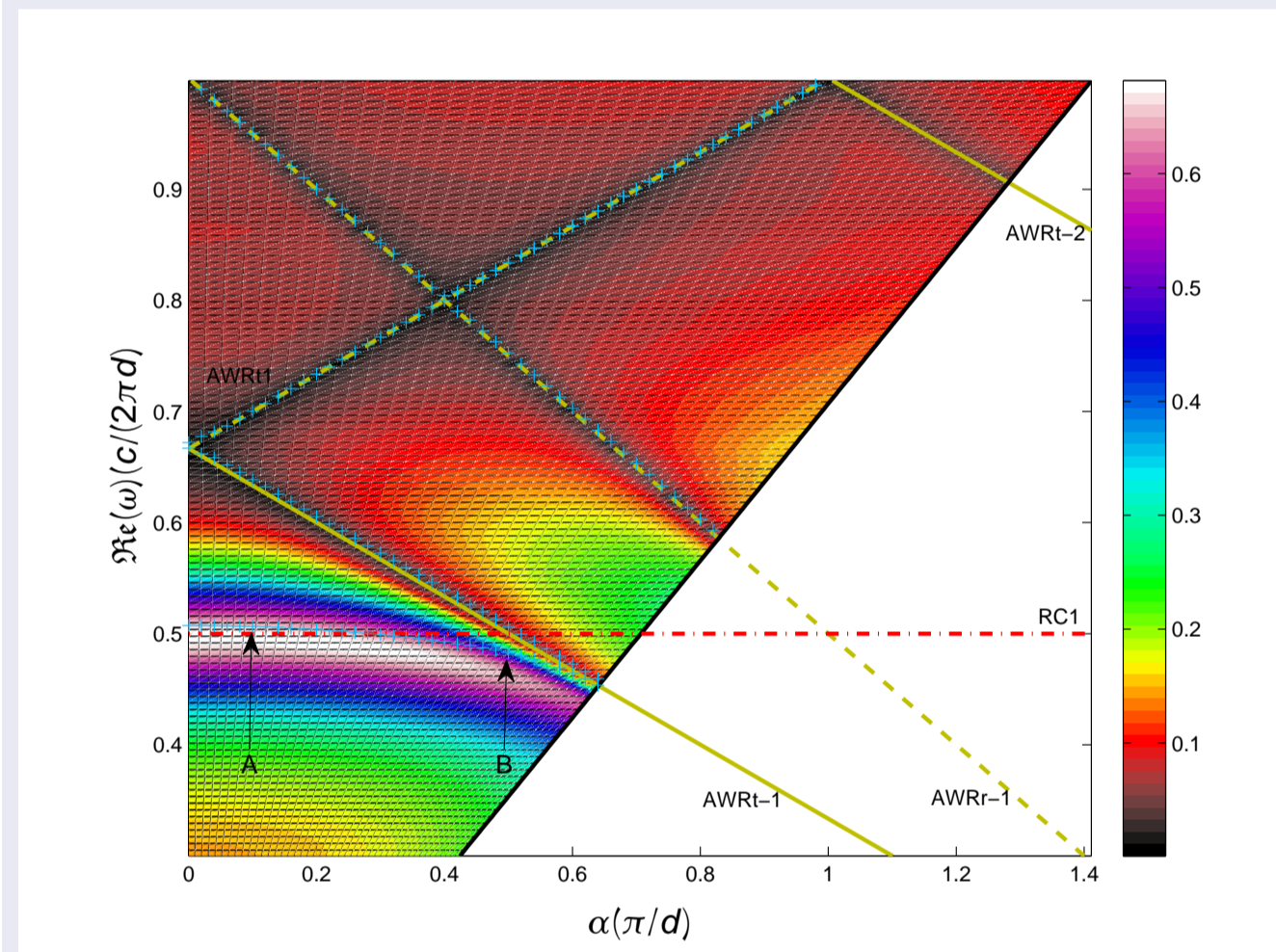
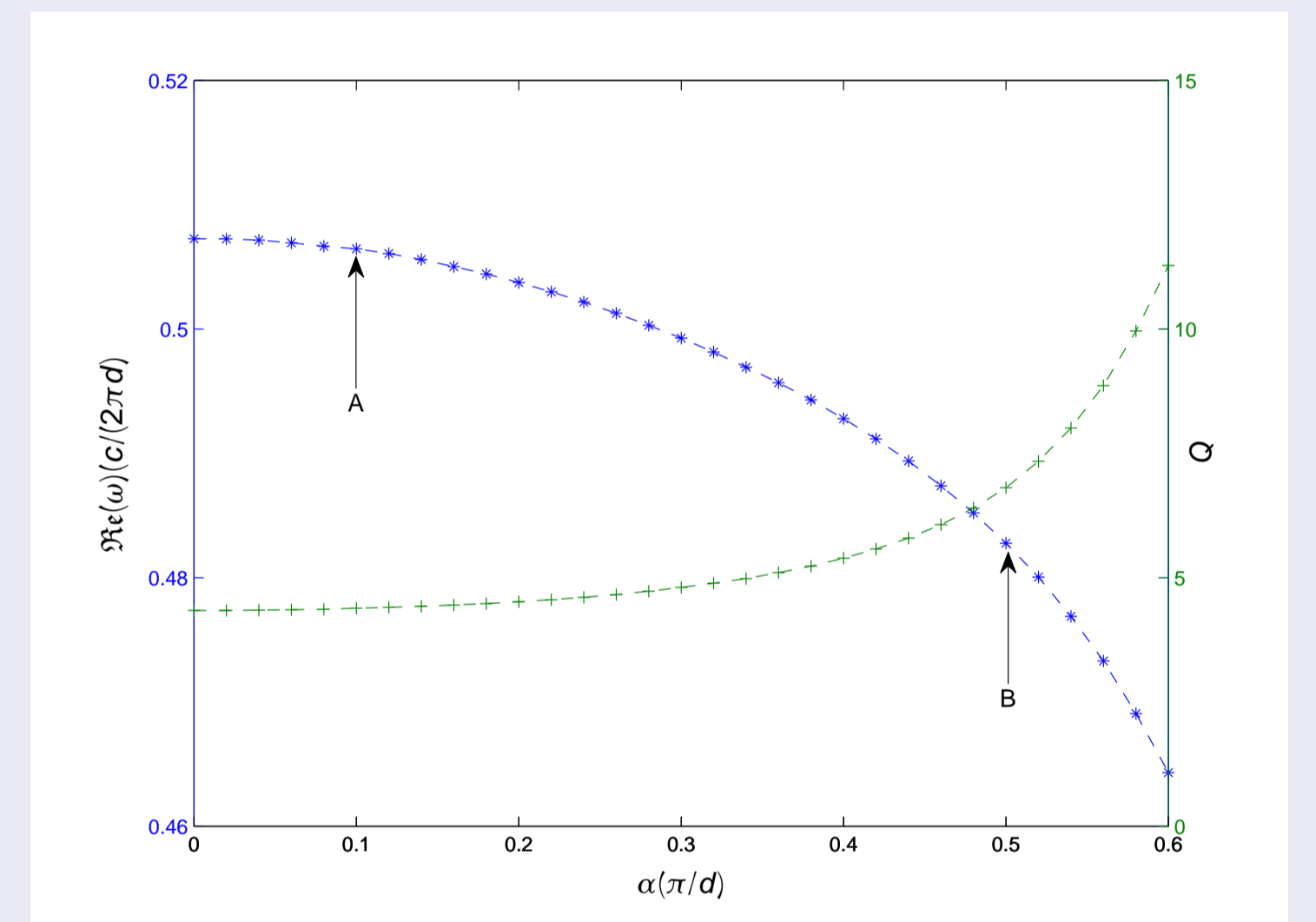


Diagramme de dispersion

cartographie : transmission dans l'ordre 0 $T_0(\alpha, \omega)$
 + : fréquences propres $\Re(\omega(\alpha))$
 — : anomalies de Wood Rayleigh en transmission (traits pleins) et en réflexion (pointillés)
 --- : résonance de cavité



Fréquences propres et facteur de qualité

- Anomalies de Wood Rayleigh ([6, 7]) : apparition/disparition de l'ordre de diffraction n transmis ($j = t$) ou réfléchi ($j = r$).

$$\omega_{nj}^\pm = \pm \frac{c}{\sqrt{\epsilon_j}} \left(\alpha + \frac{2\pi n}{d} \right)$$

- Résonance de cavité : $\omega_m^{cav} = m \frac{\pi c}{d}$, pour $m \in \mathbb{N}^*$.

- Facteur de qualité : $Q = \frac{\Re(\omega)}{2\Im(\omega)}$

La complexité de la géométrie ne rallonge pas le temps de calcul.

Perspectives

- Modèle vectoriel
Étude des modes propres de matrices d'ouvertures dans des couches de matériau à pertes.
- Fabrication
Dépôt de chrome sur substrat de silicium et gravure RIE.
- Caractérisation
Spectrophotomètre IR, spectres en transmissions.
- Problème inverse
Caractéristiques de résonance fixées $\Rightarrow \omega_n \Rightarrow$ paramètres opto-géométriques.

Références

- [1] G. Demésy, *Modélisation électromagnétique tri-dimensionnelle de réseaux complexes. Application au filtrage spectral dans les imageurs CMOS*. PhD thesis, Université Paul Cézanne - Aix-Marseille III, 2009.
- [2] G. Demésy, F. Zolla, A. Nicolet, M. Commandré, and C. Fossati, "The finite element method as applied to the diffraction by an anisotropic grating," *Opt. Express*, vol. 15, pp. 18089–18102, Dec 2007.
- [3] J.-P. Berenger, "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves," *Journal of Computational Physics*, vol. 114, no. 2, pp. 185–200, 1994.
- [4] Y. Ould Agha, *Transformations géométriques réelles et complexes : application à la recherche de modes à pertes dans des fibres optiques microstructurées*. PhD thesis, Université Paul Cézanne - Aix-Marseille III, 2007.
- [5] E. D. Palik, *Handbook of optical constants of solids*. Academic Press, 1991.
- [6] R. Wood, "On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum," *Proceedings of the Physical Society of London*, no. 18, pp. 269–275, 1902.
- [7] L. Rayleigh, "Note on the remarkable case of diffraction spectra described by prof. wood," *Philos. Mag.*, no. 14, pp. 60–65, 1907.