

# Simulations sur Internet pour les télécommunications optiques

Yves Moreau, Raphaël Kribich, Paul Coudray

Centre d'Electronique de Montpellier, courrier 84

Université de Montpellier II

34095 Montpellier cedex 5

Tel : (0)467 14 3770 – Fax :(0)467 54 71 34

e-mail : [moreau@cem2.univ-montp2.fr](mailto:moreau@cem2.univ-montp2.fr)

Toile : <http://pythagore.cem2.univ-montp2.fr/~moreau>

**Résumé :** Nous présentons ici une utilisation encore peu fréquente dans le domaine des sciences, de ce que peuvent offrir les outils *internet* : au delà du simple affichage de documents, la présentation active de calculs scientifiques, de modélisations, simulations exécutés en ligne par la simple utilisation de logiciels de navigation dotés de machines virtuelles (tels que les logiciels usuels *Netscape* ou *Internet Explorer*). Les modélisations présentées adaptées à la formation et à la recherche-développement, correspondent à nos réalisations en optique intégrée en technologie organique minérale.

**Mots clés :** Internet, applet, optique intégrée, Java

## 1. Introduction

L'explosion d'Internet et plus généralement des réseaux de télécommunications a entraîné le développement de liaisons utilisant des fibres optiques. Des circuits optiques intégrés ont été imaginés pour résoudre les problèmes tels que l'aiguillage, la division, ou le filtrage des signaux. Notre approche de l'optique guidée utilise une technologie alliant les avantages des polymères et des minéraux : photo-inscription, faible coût d'un côté et stabilité, performance, résistance de l'autre. Des coupleurs, WDM sont développés<sup>1,2,3,4</sup>

L'explosion d'Internet s'est aussi accompagnée d'outils permettant non seulement l'affichage passif de textes, de dessins et/ou de sons, mais aussi d'outils actifs telles que les machines virtuelles capables d'exécuter sur l'ordinateur serveur et/ou l'ordinateur client (utilisateur) de véritables

programmes. Le but initial des concepteurs de ce type d'outils était la réduction des données transmises, remplacées par des données recalculées, dans le cadre d'animations ou le remplissage de formulaire; le cryptage comptait aussi parmi les nouvelles possibilités offertes. Une liste non exhaustive de ces outils comprend les programmes *cgi*, le javascript, et la machine virtuelle java<sup>5</sup>.

Le langage évolué associé Java, complètement orienté objet, qui reprend les avantages du C++ a été développé par la société *Sun* pour diminuer les temps de chargement graphiques sur internet ou permettre le développement de bases de données sur le réseau. Mais il permet aussi le calcul scientifique et en particulier la simulation lancée de façon très simple et imagée pour la formation et la recherche-développement.. L'approche objet convient au développement de calculs scientifiques<sup>6</sup>, où un problème est caractérisé par:

- un ensemble de données initialisées, puis modifiées éventuellement plusieurs fois avec des conséquences spécifiques sur le traitement du calcul,
- un ou des calculs,
- un choix de présentations et/ou exportations des résultats

Le chargement du code compilé Java (« applet ») est la seule information transmise depuis le site (de l'ordre de quelques dizaines de kilo-octets). L'interprétation du code et l'exécution du programme sont effectuées localement de façon transparente sur l'ordinateur de l'utilisateur consultant le site, à l'aide de son navigateur internet (*browser*), Netscape par exemple.

Si les applications à base d'animations et/ou de consultations de bases de données développées sont nombreuses, il existe à notre connaissance peu d'applications Java tournées vers le calcul scientifique. L'intérêt pédagogique est lié à quatre aspects :

- programmes accessibles par Internet, outil attractif, apprécié et utilisé par les nouvelles générations d'étudiants.
- aspect visuel bien développé, lié à la multiplicité des classes d'objets inclus dans l'environnement Java
- intégration directe des explications scientifiques : une applet java est habituellement lancée depuis une page d'hypertexte (« HTML ») tout à fait adaptée aux explications hiérarchisées et renvois vers d'autres rubriques.
- Utilisation gratuite.

D'autres avantages peuvent être aussi mentionnés comme la mise à jour aisée des programmes, et surtout la possibilité d'une exécution sur des machines différentes (PC sous Windows, PC sous Linux, MacIntosh, station SUN etc.)

La rapidité d'exécution est maintenant voisine de celle de programmes écrits en

langage C ou C++, essentiellement depuis l'apparition de nouveaux procédés logiciels : compilation du code à la première utilisation lors d'une session (compilation *Just In Time*).

Nous présentons ici des applications dans des domaines différents : traitement du signal, et propagation dans des guides d'ondes optiques, illustrant cet emploi des nouvelles technologies de l'information et de la communication. Ces applications sont actuellement librement accessibles <sup>7</sup>

## 2. Optique intégrée

L'utilisation de l'optique dans les télécommunications (pour le très haut débit), dans la mesure (pour résoudre les problèmes d'action et de réaction avec le milieu extérieur) nécessite la conception de circuits optiques (optique intégrée<sup>8</sup>) si l'on veut éviter les conversions électro optiques et optique – électroniques. Ces circuits ont pour fonction le traitement du signal comme le routage, le filtrage en longueur d'onde (WDM) etc.

Les semiconducteurs III-V et la silice associés à des technologies photolithographiques, la silice sur silicium, déposée réalisés par procédé photolithographique, la silice sur silicium déposée par hydrolyse à la flamme (FHD) ou en phase vapeur (CVD), le niobate de Lithium associé à une diffusion thermique de dopants (Ti), sont les matériaux les plus utilisées actuellement. Des circuits passifs tels que des diviseurs de puissance et coupleurs élaborés par échange ionique dans des verres massifs sont déjà industrialisés.

Une nouvelle voie consiste à combiner le procédé sol-gel et les réseaux polymères. Les avantages de chacun peuvent être conservés, en limitant les inconvénients, en ajustant le pourcentage de chacun dans la composition du matériau final. Ce genre de matériau reçoit une attention particulière en raison de ses propriétés mécaniques, optiques et physiques qui peuvent être ajustées entre celle d'un

polymère et d'un verre d'oxyde. Les procédés à basse température permettent de mélanger des précurseurs organo-minéraux par procédé sol-gel pour développer des nouveaux matériaux présentant deux réseaux imbriqués : une partie minérale réticulée par hydrolyse et polycondensation des groupes alcoxydes, et une partie organique qui peut être localement réticulée par polymérisation des doubles liaisons C=C sous l'action de photons ultraviolets. La partie polymérisée est dotée d'un indice de réfraction plus élevé, ce qui permet l'inscription de chemins optiques confinant la lumière. De plus cette partie polymérisée résiste à l'attaque chimique de solvants, ceci ouvre la voie à la fabrication de dispositifs optiques en relief. La flexibilité du procédé permet de produire une large gamme de structures de guide d'onde de qualité (pertes de l'ordre de 0.1 dB/cm)<sup>9</sup>. A partir de ces guides d'ondes, de multiples circuits optiques peuvent être imaginés. Le faible coût de cette approche, la facilité du dessin de circuits optiques (exposition des couches à travers un masque au rayonnement d'une lampe UV) permet l'introduction de l'optique intégrée dans la formation. Cependant cette technologie par ses qualités est une alternative crédible pour un développement industriel. Une compagnie Canadienne commence à commercialiser les premiers circuits passifs fabriqués à partir de ces matériaux<sup>10</sup>.

### 3. Calcul des modes

La vitesse de propagation les profils des champs électromagnétiques (les modes) sont des données essentielles pour étudier la propagation en fonction des géométries et des paramètres optiques. Ceci conditionne les pertes et fondamentalement le fonctionnement des dispositifs à base de guides d'onde.

Trouver les modes d'une section de guide d'onde et leur constante de propagation  $\beta$  ( $= k n_e$ ) est à la base un problème de valeurs propres :

L'équation d'onde pour un champ F :

$$\{\mathbf{d}^2/\mathbf{d}x^2 + \mathbf{d}^2/\mathbf{d}y^2 + \mathbf{d}^2/\mathbf{d}z^2\} F_{xyz} + k^2 n^2 F_{xyz} = 0$$

devient

$$\{\mathbf{d}^2/\mathbf{d}x^2 + \mathbf{d}^2/\mathbf{d}y^2 + k^2 n^2\} F_{xy} = \mathbf{b}^2 F_{xy}$$

$$\text{si } F_{xyz} = \exp(-i\mathbf{b}z) F_{xy}$$

La correction de polarisation et/ou la mise sous forme vectorielle peuvent être introduites sans changer la démarche. La discrétisation de l'opérateur {...} en chaque point x, y de la section grâce à des formules de différences finies demande un nombre important de points à considérer pour avoir une précision suffisante, étant la nature transcendante (exponentielle ou sinusoïdale) des profils des champs de mode. Nous avons préféré<sup>11</sup> considérer les profils (inconnus) comme des combinaisons linéaires de fonctions de base orthogonales  $F(x,y) = \exp(-i\mathbf{b}z) \sum c_{ij} S_i(x) \times S_j(y)$ <sup>12</sup>. Par simplicité, la base choisie est constituée de fonctions sinusoidales nulles sur les limites du domaine rectangulaire enserrant le ou les guides :  $S_{ij}(x,y) = S_i(x) \times S_j(y) = \sqrt{4/L_x L_y} \sin(i \pi x/L_x) \sin(j \pi y/L_y)$ .

Les conditions aux limites imposées ne demandent un domaine étendu que si les modes considérés sont proches de la coupure, ou s'il s'agit de modes rayonnés<sup>13</sup>.

En substituant F(x,y) (et ses dérivées) dans l'équation d'onde pour tous les couples ij.

$$E(\dots c_{ij} \dots, x, y) = \sum c_{ij} [-n_e^2 - \pi^2/k^2 (i^2/L_x^2 + j^2/L_y^2) + n^2(x,y)] S_{ij}(x,y) = 0$$

L'équation  $E(\dots)=0$  en  $c_{ij}$  sera vérifiée pour tout couple (x,y) du domaine, si :

$\iint E(\dots c_{ij} \dots, x, y) x W(x, y) dx dy = 0$  pour toute fonction poids  $W(x,y)$ ; elle est approximativement vérifiée si la double intégrale est nulle pour l'ensemble des fonctions de base  $S_{ij}(x,y)$  choisi pour fonction de poids  $W(x,y)$  (Méthode de Galerkin<sup>14</sup>). On obtient ainsi un système dont il faut calculer les valeurs propres de N (nombre de

couples ij) équations algébriques dont celle de rang ij' s'écrit :

$$\sum_{ij} A_{ij',ij} c_{ij} = n_e^2 c_{ij'}$$

avec  $A_{ij',ij} = \iint \{ (n^2(x,y) - n_0^2) S_{ij}(x,y) S_{ij'}(x,y) dx dy$   
 $+ [si \text{ élément diagonal}]$   
 $- \pi(i^2/L_x^2 + j^2/L_y^2) + n_0^2 \times$   
*surface\_du\_sous\_domaine*

Si  $n_0$  est l'indice du domaine entourant le guide ou les guides, les coefficients  $A_{ij',ij}$  ne demandent l'évaluation de l'intégrale que sur les sous-domaines d'indice  $n(x,y)$  différents. L'intégration peut être effectuée par voie analytique sur des sous-domaines rectangulaires. De façon à pouvoir prendre en compte de géométries particulières, nous avons introduit une intégration précise applicable à toute forme polygonale, décomposable en quadrilatères quelconques. Une interpolation bilinéaire, associée à une intégration dans un rectangle de référence (-1,1)-(-1,-1).

La démarche logicielle *objet* caractérise notre approche, ceci présente plusieurs conséquences:

Les interfaces conviviales standards permettent la description à la souris, l'utilisation de boutons, menus etc. sans que la charge en programmation ne soit trop lourde.

Le programme est structuré en blocs qui peuvent être programmés et modifiés indépendamment : la section de guidage est décrite à l'aide de rectangles, et de quadrilatères quelconques dont les sommets sont introduits à l'aide de la souris ou de panneaux de dialogues. Il serait facile d'introduire d'autres formes de description comme l'ellipse en fournissant une méthode d'intégration des produits de fonctions de base sur l'ellipse. Des formes à variation d'indices de réfraction peuvent également être rajoutées.



Figure 1: Profil d'un mode guidé (guide de section trapézoïdale)

#### 4. Simulation de la propagation

Le comportement de la lumière dans un circuit d'optique intégrée est souvent difficile à analyser. Un programme imagé simule la propagation dans un circuit optique (B.P.M.), où les zones d'indice de réfraction légèrement plus élevé constituent des chemins qui guident la lumière.

Le programme propose à l'initialisation quelques circuits : guides parallèles peu éloignés constituant un « coupleur » où selon la longueur d'onde, la lumière passe de l'un à l'autre (figure 2).

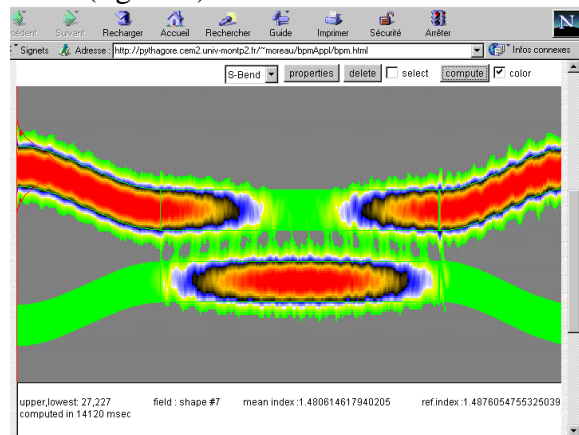


Figure 2 : Simulation de la propagation d'un faisceau lumineux (B.P.M.) dans un coupleur optique.

L'utilisateur peut aussi dessiner à la souris son propre circuit en imposant la géométrie et l'indice. Un bouton « calcul » lance la résolution d'un système d'équations représentant en chaque point l'équation

différentielle de propagation (Helmholtz), avec visualisation à chaque instant de l'avancée de la lumière dans le circuit. La simulation permet de voir directement l'influence de tel ou tel paramètre (largeur du guide, courbures, écartement...) sur la qualité de la propagation.

Une variante propose aussi la possibilité, unique, d'une simulation dans un dispositif à plusieurs niveaux<sup>15</sup> correspondant à des réalisations en technologie organique-inorganique.

## 5. Autres calculs en optique intégrée.

Outre ces programmes (calcul des modes optiques dans un guide à section quelconque, simulations de propagation en 2D et 3D), sont aussi proposés en utilisation gratuite sur notre site Web, un calcul des indices effectifs et des interférences multimodales pour la conception de circuits optiques filtres de longueurs d'onde (WDM)<sup>16</sup>, enfin un calcul (en complexes) de la reflectance d'un réseau de type Bragg en fonction de la longueur d'onde, du nombre de périodes etc..(figure 3).

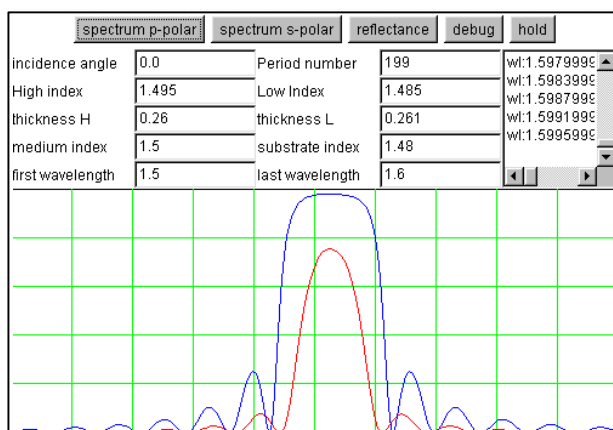


Figure 3 : Reflectance d'un réseau à modulation d'indices, en fonction de la longueur d'onde, pour deux écarts d'indices différents.

## 6. Autres applications sur Internet

Dans un domaine plus général, nous proposons l'analyse d'images pixels par pixels sur une ou plusieurs lignes indiquées à la souris sur l'image.

Les ondelettes sont un outil remarquable pour la compression de données, un exemple toujours cité est le stockage avec peu de coefficients des empreintes digitales dans la base de données du F.B.I.

Notre programme propose à l'utilisateur qui consulte le site, l'expérimentation de ce type de filtrage : l'utilisateur peut choisir de tracer quelques fonctions connues (gauss, triangle) définies par des paramètres ajustables, ou de dessiner une fonction quelconque à l'aide de la souris, ou encore d'importer (par copier-coller) une série de nombres considérée comme une fonction définie point par point. Des menus et boutons, permettent d'agir sur la série, d'en extraire les coefficients de Daubechies, de n'en retenir que les plus importants et de reconstituer la fonction.

D'autres développements sont à prévoir à la fois dans un but pédagogique et dans un but pratique d'utilisation en recherche et développement. Le financement pourrait être assuré par de la publicité apparaissant pendant l'exécution des programmes.

## Conclusion

Les exemples donnés, actuellement accessibles librement sur Internet, illustrent les possibilités nouvelles de la programmation en langage Java dans un domaine jusque là relativement peu exploité. Nous proposons aussi d'autres applications en optique guidée (calcul des modes optiques dans une fibre ...), et de nouveaux développements sont à prévoir : simulation de l'équation de Poisson en deux dimensions où la courbure locale du

potentiel est proportionnelle à la charge locale par exemple, déplacement de charges dans une jonction conductrice ...

Les avantages de cette nouvelle approche attractive de la formation sont nombreux:: résolution effective des équations dans leurs formes originales et non simplifications drastiques imposées par des lenteurs de calcul, aspect visuel des phénomènes, interaction directe par le biais d'outils généralement maîtrisés par les jeunes générations, peu de perte de temps consacrée à l'apprentissage de l'utilisation d'un logiciel (interfaces modernes et standards), accessibilité universelle (tout types de matériel et réseau mondial ).

## Références

- <sup>1</sup> P. Coudray, Y. Moreau, P. Etienne, J. Porque, " New developments in integrated optics using the sol-gel process", invited paper, International Conference SPIE, Critical Review 68, " Sol-gel and Polymer Photonics Devices ", SanDiego, USA, July 1997
- <sup>2</sup> P. Coudray, P. Etienne, Y. Moreau, "Integrated optics based on organo-mineral materials", E-MRS Spring Meeting, Materials, Process and Technology for Optical Interconnect, invited paper, Strasbourg, France, Juin 1999
- <sup>3</sup> P. Etienne, P. Coudray, J. Porque, Y. Moreau, "Er/Yb doped organic-inorganic coating for optical amplification application", invited paper, International Conference SPIE, "Organic-Inorganic Hybrid Materials for Photonics II", Denver, USA, July 1999
- <sup>4</sup> Y. Moreau, P. Coudray, K. Kribich, P. Etienne, " Index difference evaluation using optical circuits in organic-mineral material", invited paper, 5th Optical fiber Measurement Conference, pp.87-91, Nantes (France), September 22-24, 1999
- <sup>5</sup> <http://www.javasoft.com>
- <sup>6</sup> Y. Moreau, F.Pélançon, A. Michez, "Object oriented design in applied Physics", Proc. Intern. AMSE Conference, Vol. 1, pp. 19-23, New Orleans (USA), nov 9-11, 1994.
- <sup>7</sup> <http://pythagore.cem2.univ-montp2.fr/~moreau/> *try our on line computations*
- <sup>8</sup> H.Nishihara, M.Haruna,, T. Suhara, "Optical integrated circuits", R.R.Donnelly & sons, USA, 1989
- <sup>9</sup> P. Coudray, Y. Moreau, P.Etienne, « Circuits optiques intégrés à base de matériaux organiques-inorganiques », Journées d'études du club EEA, Limoges (France), 14-15 octobre 1999.
- <sup>10</sup> Lumenon inc., <http://www.lumenon.com>
- <sup>11</sup> Y. Moreau, J.Porque, P. Coudray, P.Etienne, "Etude modale de guides à section quelconque", *Proc. JNOG 98*, pp.67-69, Marly le Roi (France), Oct. 1998
- <sup>12</sup> D.Marcuse, "Solution of the vector wave equation for general dielectric waveguides by the Galerkin Method", I.E.E.E. Journal of Quantum Electronics, vol. 28, n°2, February 1992.
- <sup>13</sup> S. Farahvash, S. Safavi-Naeni, M. Tabiani, "Finding the radiation from dielectric waveguide step junction using eigenmode expansion -bounded approach", *Opt.Eng.* 36(10), 2897-2903 (October 1997).
- <sup>14</sup> P. Tong, J. Rossettos, Finite Element Method, MIT Press, Cambridge, Mass. 1978
- <sup>15</sup> Y. Moreau, J. Porque, P. Coudray, P. Etienne, K. Kribich, "New simulation tools for complex multilevel optical circuits", *International Conference SPIE, "Optical design and analysis software"*, Denver, USA, July 1999
- <sup>16</sup> Y. Moreau, K.Kribich, J. Porque ,P. Coudray, P. Etienne « Un outil internet pour la conception de circuits a interferences multimodales », *JNOG 99*, Limoges (France), 6-8 Dec. 1999.