

**INTERACTION DE LA LUMIÈRE
AVEC DES NANOSTRUCTURES :
DU MODÈLE THÉORIQUE
À L'APPLICATION PRATIQUE**



M. OLIVIER MARTIN

C'est un grand honneur que d'avoir reçu l'un des Prix Latsis Universitaires 1999 et de pouvoir exposer ici la recherche que je conduis à l'École Polytechnique Fédérale de Zurich dans l'Institut für Feldtheorie und Höchstfrequenztechnik. Mon activité se concentre sur l'étude théorique et numérique de l'interaction de la lumière avec des structures de très petite taille, de l'ordre du nanomètre (1 [nm] = un milliardième de millimètre).

De tout temps, l'interaction de la lumière avec des objets de taille et de forme arbitraires a suscité un vif intérêt. Témoin en est la vague d'enthousiasme soulevée par l'éclipse totale de cet été! En effet, ce phénomène grandiose n'est autre que l'interception par la lune des rayons émis par la plus grande source lumineuse dont nous disposons: le soleil.

La physique de ce phénomène est connue depuis fort longtemps, comme l'illustre la figure 1 qui reproduit un dessin de Kepler: les rayons émis par le soleil sont bloqués par la lune, créant une zone d'ombre sur la terre. Cette zone d'obscurité est formée d'une région d'ombre totale (éclipse totale) bordée par une région de pénombre correspondant à l'éclipse partielle.

Si nous quittons le soleil et l'infiniment grand pour nous intéresser au microcosme, nous nous apercevons qu'il existe de nombreux phénomènes où l'interaction de la lumière avec des nanostructures joue un rôle primordial. Ces situations sont bien plus complexes que l'éclipse dont nous venons de parler et leur étude nécessite des modèles autrement plus sophistiqués que ceux utilisés par Kepler.

C'est pour étudier de telles configurations que j'ai développé un nouveau formalisme basé sur le concept de tenseur de Green. Cette approche novatrice permet d'obtenir la réponse complète d'une structure de forme arbitraire lorsqu'elle est illuminée par un champ extérieur. Plutôt que d'entrer dans les détails de ce formalisme et d'aligner des équations rébarbatives, je souhaite illustrer son application à trois systèmes différents qui jouent, ou sont amenés à jouer, un rôle important dans notre société hautement technologique.

Le premier exemple est tiré des télécommunications. De nos jours les câbles de cuivre des réseaux téléphoniques sont remplacés par des fibres optiques. Ceci permet d'augmenter de façon importante les performances d'un tel réseau. L'information est alors transmise sous forme

d'impulsions lumineuses dans la fibre optique. Comme source de lumière on utilise des lasers à semiconducteurs, tel celui représenté sur la figure 2. Ces minuscules structures émettent de la lumière dans le visible ou dans l'infrarouge proche. Un tel laser est constitué d'une succession de couches de différents matériaux. Certaines couches ont une épaisseur de plusieurs centaines de nanomètres alors que d'autres ne dépassent pas quelques atomes. La séquence de ces couches et leur composition déterminent les propriétés d'émission du laser. Afin d'optimiser celles-ci, il est indispensable de disposer d'outils permettant de simuler la façon dont les champs électromagnétiques se propagent dans la structure. En effet la réalisation d'une multitude de prototypes différents est par trop coûteuse et hasardeuse. La figure 2(b) montre le résultat d'un tel calcul basé sur la technique du tenseur de Green mentionnée plus haut. On y remarque le confinement et le guidage de la lumière par la structure.

La fabrication d'un tel laser à semiconducteurs nécessite une succession d'étapes: croissance de crystal, attaque chimique, déposition de matériaux, évaporation de métal, etc. Chaque étape doit être réalisée avec une grande précision. On utilise pour cela une technique de gravure que l'on appelle nanolithographie. Cette technique, semblable à une photographie à l'échelle nanoscopique, permet de définir les différentes structures qui formeront le laser. On la retrouve dans la réalisation de tous les circuits intégrés: du processeur d'ordinateur à la montre-bracelet. Cette étape est donc extrêmement importante car elle détermine les dimensions du circuit ainsi réalisé.

L'industrie des semiconducteurs utilise aujourd'hui une lithographie dite du quart de micron. Cela signifie que les éléments qui forment par exemple le processeur d'un ordinateur ont une taille d'un quart de micron ou de 250 [nm]. Il est évident que plus on arrive à graver des éléments de petite taille, plus on peut accroître la miniaturisation d'un circuit et réaliser des processeurs de plus en plus performants sur une surface donnée. Il y a donc un effort gigantesque dans toute l'industrie des semiconducteurs pour tenter de réduire cette taille critique de 250 [nm].

Dans le cadre d'un projet de recherche avec IBM, nous développons une technologie différente, telle qu'illustrée sur la figure 3. Notre approche est basée sur un masque en polymère dont la surface est struc-

turée avec le profil que l'on souhaite graver sur le circuit. Ce masque est pressé sur le substrat et éclairé par dessus. La lumière est ainsi guidée à travers la structure du masque pour venir impressionner une surface sensible placée sur le circuit.

La réalisation pratique du masque a évidemment une grande influence sur le résultat final. Ainsi de petites aspérités sur sa surface peuvent avoir un effet désastreux sur la qualité de la lithographie. Ici aussi les simulations numériques permettent d'étudier et d'optimiser l'interaction de la lumière avec le masque, comme l'illustre la figure 3(b). Cette figure montre le flux d'énergie lumineuse alors qu'il traverse le masque et vient imprégner le circuit. Les performances de cette nouvelle technique de lithographie sont démontrées sur la figure 3(c). On y remarque une structure périodique avec des dimensions de l'ordre de 100 [nm]. Ceci représente un bond considérable par rapport à la technologie actuelle qui ne permet que d'atteindre 250 [nm].

Comme dernier exemple, je souhaite évoquer une application qui ouvre des pistes intéressantes en biophysique et qui utilise de petites particules de métal. Lorsque l'on se promène dans une cathédrale, on est frappé par l'éclat des couleurs des vitraux anciens. Ces morceaux de verre ont des siècles et pourtant leur éclat perdure. L'intensité de ces couleurs provient de minuscules particules de métal, souvent de l'or ou de l'argent, que les maîtres verriers introduisaient dans la pâte de verre. En effet, lorsqu'on illumine une telle particule elle émet à certaines longueurs d'ondes bien précises de la lumière de façon extrêmement puissante. Ce phénomène, que l'on appelle résonance plasmon, est très sélectif et dépend de la taille et du matériau de la particule. En changeant sa forme, on peut changer la longueur d'onde à laquelle elle résonne, c'est à dire la couleur qu'aura la particule. Seul un modèle numérique permet de prédire quelle couleur aura telle ou telle forme. La figure 4 montre la répartition du champ électromagnétique autour de particules de forme triangulaire et carrée. L'intensité de la lumière émise par la particule atteint 10'000 fois l'intensité utilisée pour éclairer la particule. Ainsi une telle particule apparaît-elle de façon extrêmement brillante et avec une couleur caractéristique qui dépend de sa forme.

Evidemment, on peut penser utiliser cette approche pour réaliser des vitraux encore plus beaux et colorés. En fait il y a une autre application

qui est mise au point en ce moment aux USA. Un groupe de l'université de Californie avec lequel je collabore a réussi à attacher des protéines sur ces petites particules de métal. L'autre extrémité de ces protéines peut aller se fixer sélectivement sur une séquence particulière d'une molécule d'ADN. Comme la particule de métal donne un signal lumineux très puissant, on peut ensuite facilement déterminer à l'oeil si telle ou telle séquence d'ADN est présente dans le système que l'on étudie. Il est aussi possible d'attacher des particules de formes différentes (c'est à dire des particules qui émettent des couleurs différentes) à diverses séquences d'ADN. On obtient ainsi une représentation colorée visible à l'oeil nu des différentes séquences qui composent une molécule particulière d'ADN.

Ces quelques exemples illustrent le rôle central joué par l'interaction de la lumière avec des nanostructures dans des domaines aussi variés que les télécommunications optiques, l'industrie des semiconducteurs et même la biophysique. La complexité des phénomènes en jeu ne peut être comprise que par des simulations numériques. Celles-ci sont indispensables, non seulement pour développer et perfectionner des processus connus, mais aussi pour mettre en évidence des phénomènes nouveaux.