

# **Cristaux photoniques : assemblage colloïdal (opales artificielles, régulières et inverses)**

**S. Bassène et R. A. Lessard**



**UNIVERSITÉ  
LAVAL**



# Introduction

## Notion de cristal photonique

- Structuration ou assemblage périodique de matériaux, qui soient pour les photons l'équivalent de ce qu'est un cristal semi-conducteur pour les électrons
- Contraste de l'indice de réfraction suffisamment élevé
- Création de bandes interdites photoniques

## Applications pratiques et potentielles:

- confinement de la lumière
- Fibres à cristal photonique
- Antennes
- Filtres
- Lasers a faible courant de seuil
- Diodes électroluminescentes

.....



UNIVERSITÉ  
LAVAL

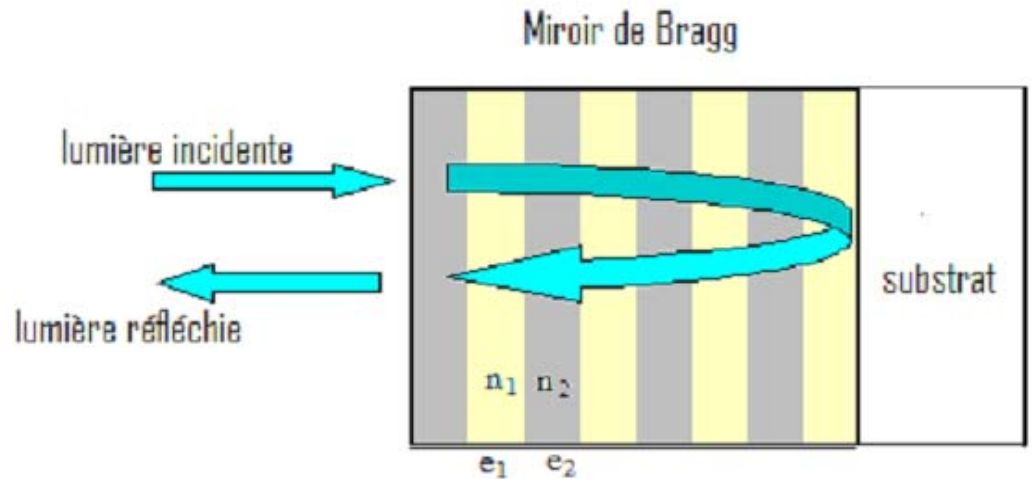


# Théorie des cristaux photoniques

- Similitude entre l'équation de Schrödinger d'un électron dans un potentiel périodique  $V(r)$  (1) et l'équation d'onde d'un champ électromagnétique dans un milieu de permittivité relative  $\varepsilon(r)$  (2)

$$\nabla^2 \Psi(r) = -\frac{2m}{\hbar^2} [E - V(r)] \Psi(r) \quad (1)$$

$$\nabla \times [\nabla \times E(r)] = \frac{\omega^2}{C^2} \varepsilon(r) E(r) \quad (2)$$



Alternance de couches  $\lambda/4$  d'indice de réfraction élevé et faible  
Réflexions multiples entre les interfaces



UNIVERSITÉ  
LAVAL



# Miroir de Braag à plusieurs dimensions

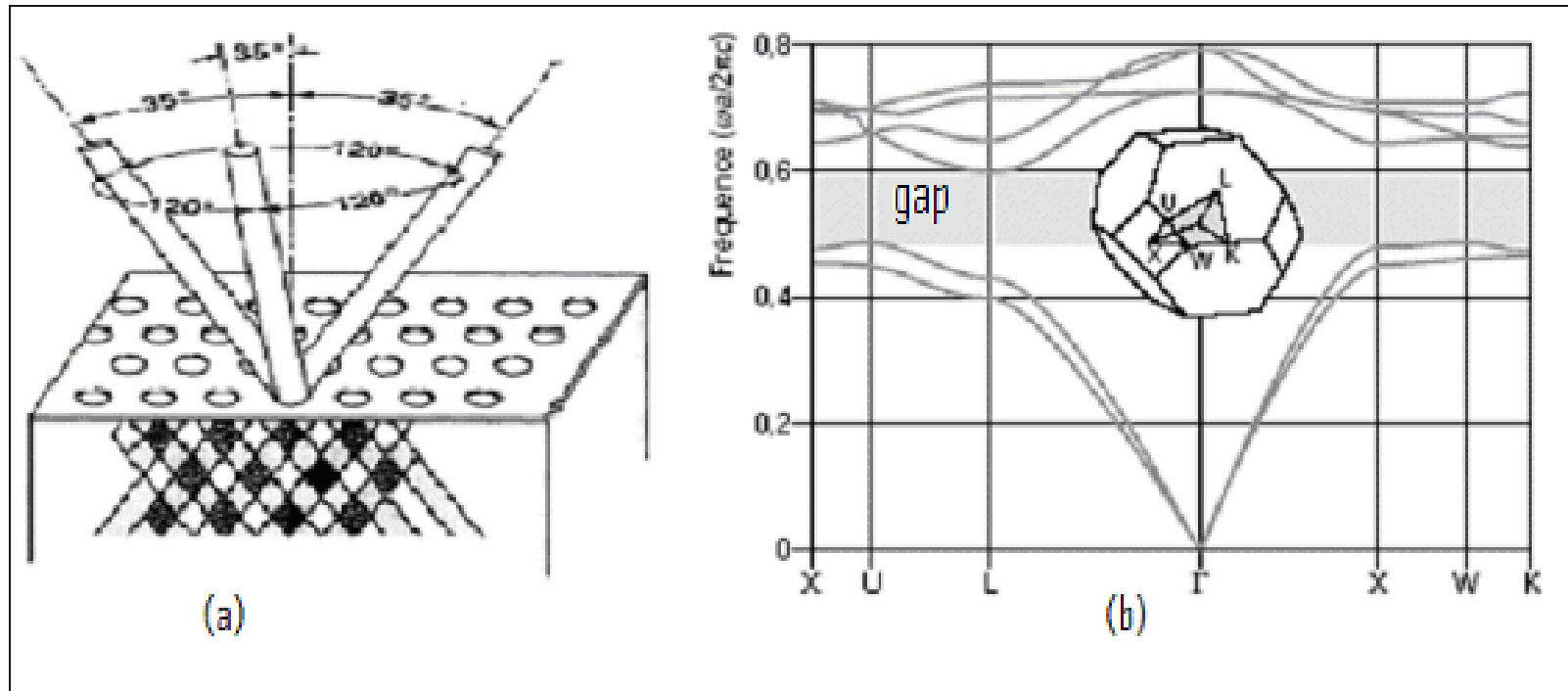
$$\nabla \times [\nabla \times E(r)] = \frac{\omega^2}{C^2} \varepsilon_r(r) E(r)$$

$$(k + G) \times [(k + G) \times E(G)] + \frac{\omega^2}{c^2} \sum_{G'} \varepsilon_r(G - G') E(G') = 0$$

$$AX = \frac{\omega^2}{C^2} BX$$

- **Méthodes de simulation numériques et diagramme des bandes**
  - **Méthode des ondes planes**
  - **Méthode des matrices de transfert**
  - **Méthode FDTD (Finite difference in time domain)**
  - .....

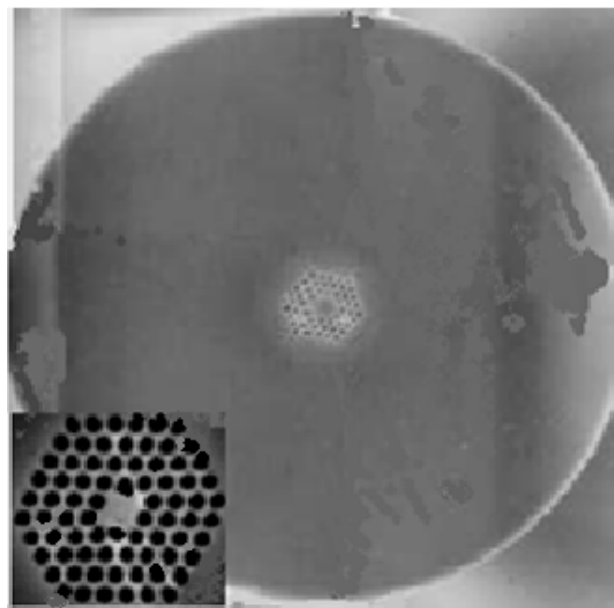
# Cristal photonique et diagramme de bandes



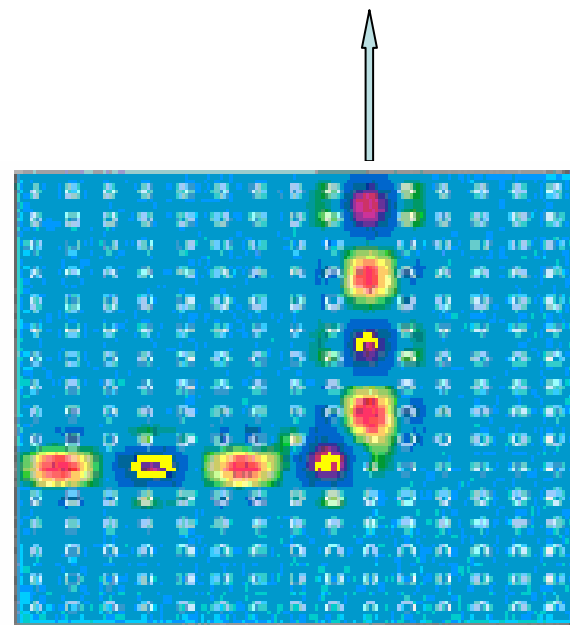
**Cristal photonique 3D (« Yablonoite ») (a) obtenu par perçage d'un matériau diélectrique de permittivité  $\epsilon = 13$  et en (b) son diagramme de bande correspondant avec au centre la zone de Brillouin du réseau cfc.**

**YABLONOVITCH (E.), GMITTER (T.J.) et LEUNG (K.M.).. Phys. Rev. Lett. 67, p. 2295 (1991).**

# Exemples de cristaux photoniques avec défauts de structures introduits



*Fibre optique microstructurée*



*Guidage et virage de la lumière dans un cristal photonique*

# Les techniques de fabrication des cristaux photoniques

La structuration périodique doit être de l'ordre de la longueur d'onde

- Micro-fabrication
- Holographie
- Assemblage colloïdal

*Pour chaque technique, des difficultés et des limites subsistent, selon que l'on souhaite obtenir un cristal 1D, 2D ou 3D avec ou sans défauts de structure à introduire.*

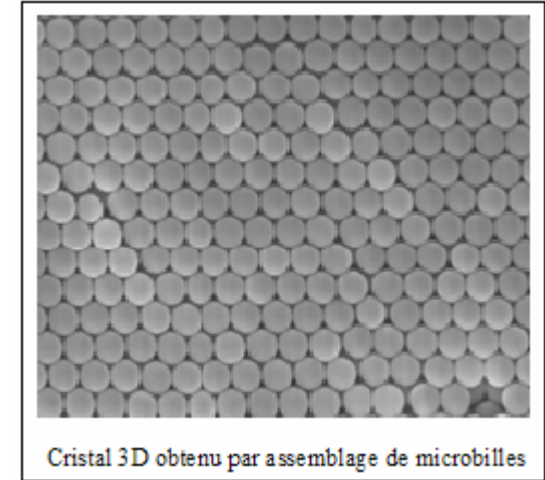
# Assemblage colloïdal

## avantages

- Procédé simple, peu coûteux et très flexible
- Cristaux 3D avec plusieurs périodes
- Réalisation de BIP dans le visible et l'IR
- Tester plusieurs matériaux par les techniques d'infiltration

## inconvénients

- Faible contraste d'indice de réfraction
- Défauts d'empilement



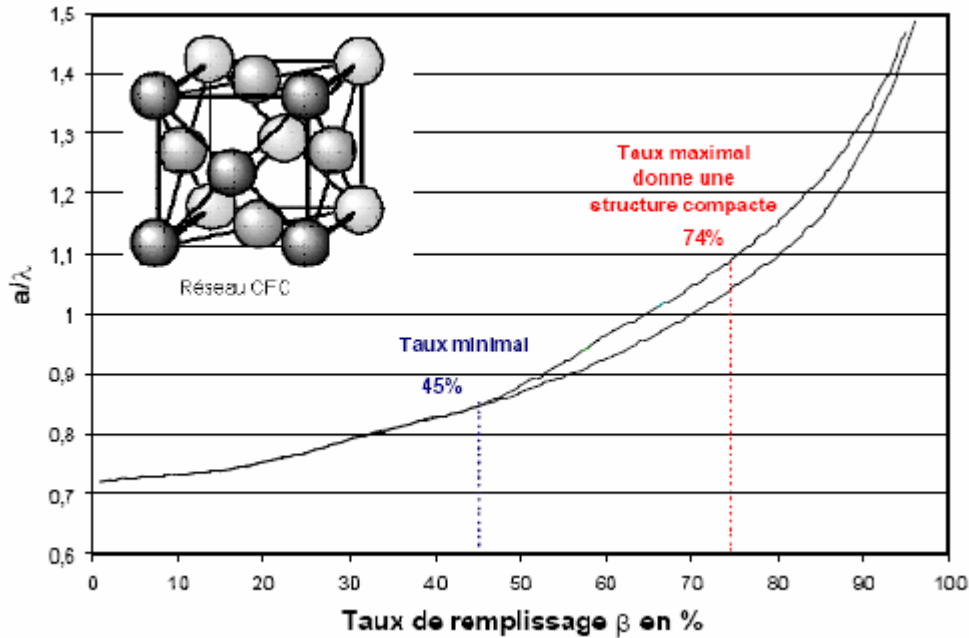


# Opales artificielles

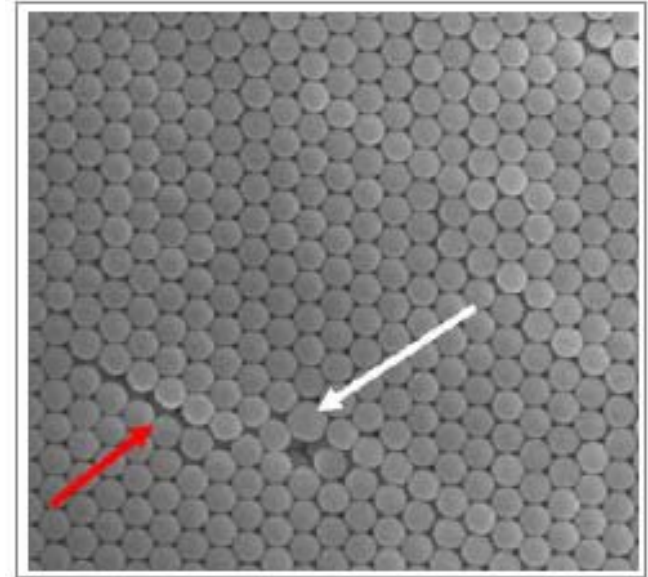
## Paramètres fondamentaux pour l'obtention de BIP

- Structure du réseau
- Taille des billes et monodispersité
- Contraste de l'indice de réfraction

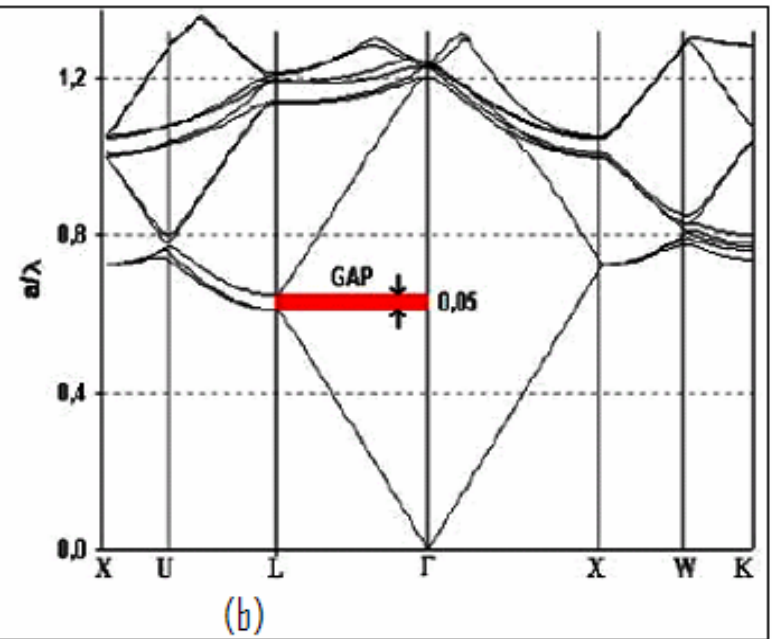
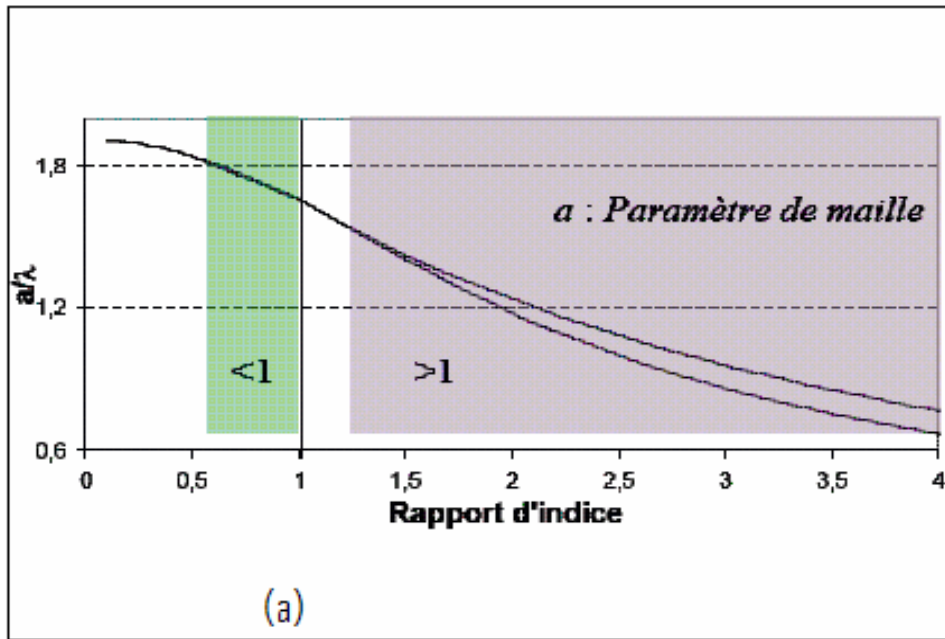
# Influence des différents paramètres



*Choix du réseau : largeur du gap en fonction du taux de remplissage (exemple alvéoles de TiO<sub>2</sub>)*



*Rupture dans le réseau cristallin dû à la polydispersité*



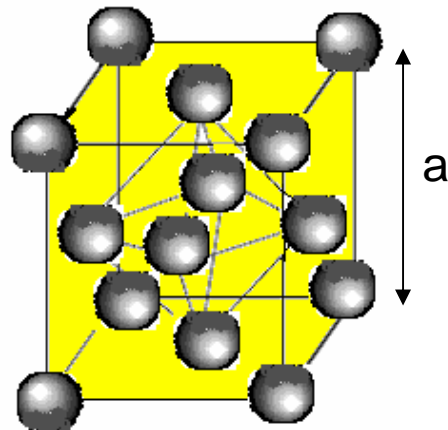
**(a) Ouverture de BIP en fonction du rapport d'indice (b) bande interdite photonique incomplète d'un cristal colloïdal formé de sphères de polystyrène entourées d'air**

# Fabrication des cristaux colloïdaux par épitaxie: *méthode de M. Diop et coll.*

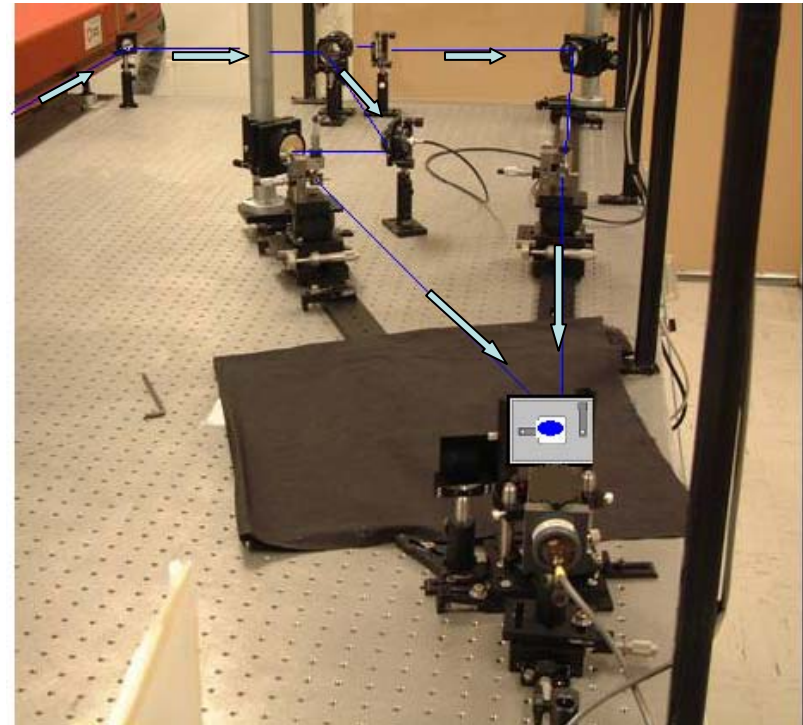
*La croissance des cristaux se fait sur un substrat dont la surface a été pré-structurée*

1- Dépôt d'une couche de photorésine sur un substrat par spin coating

2 Écriture des réseaux 2D par holographie

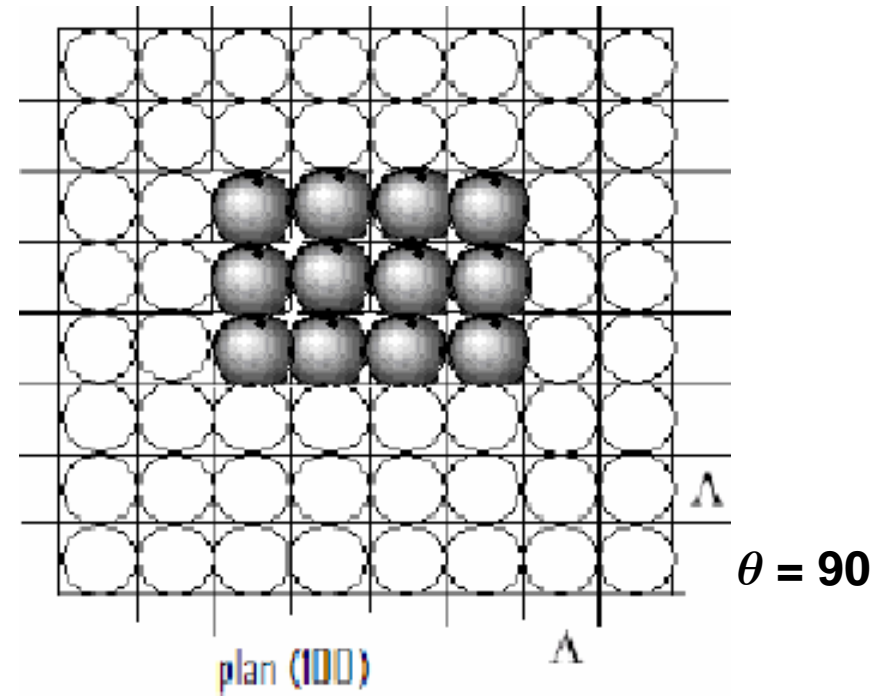
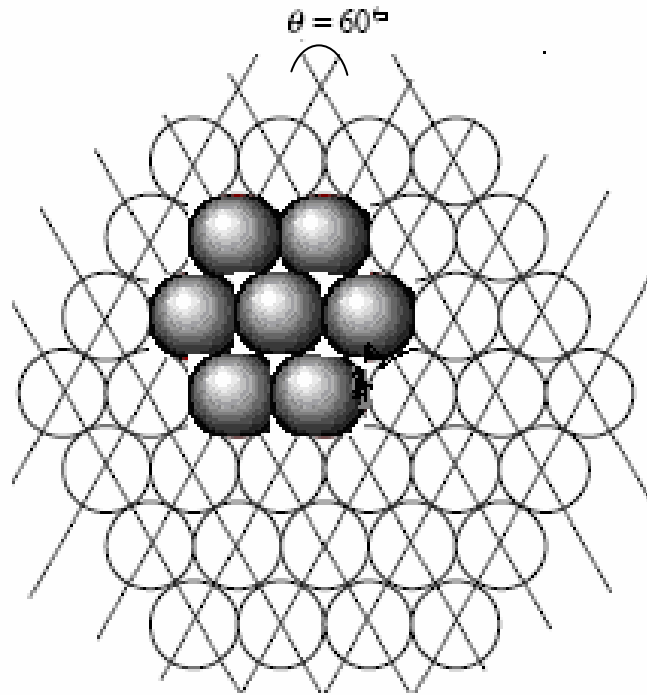


**Réseau CFC**

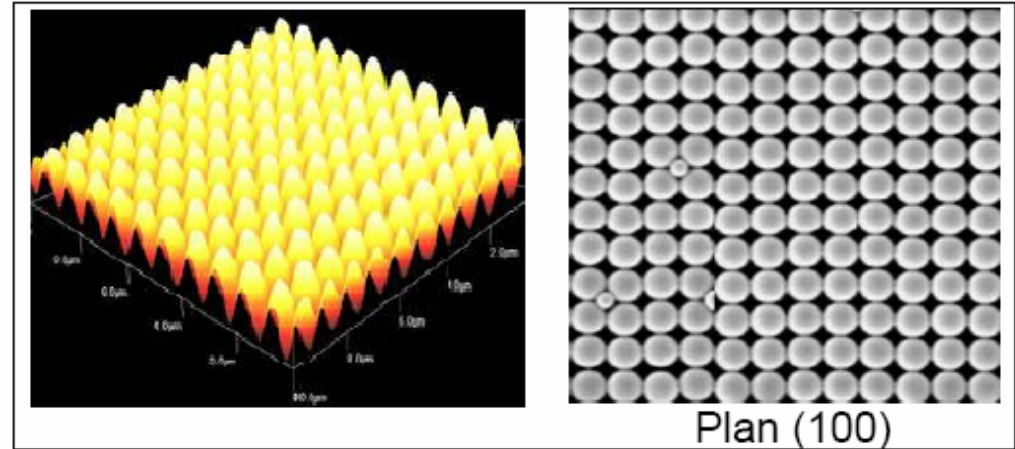
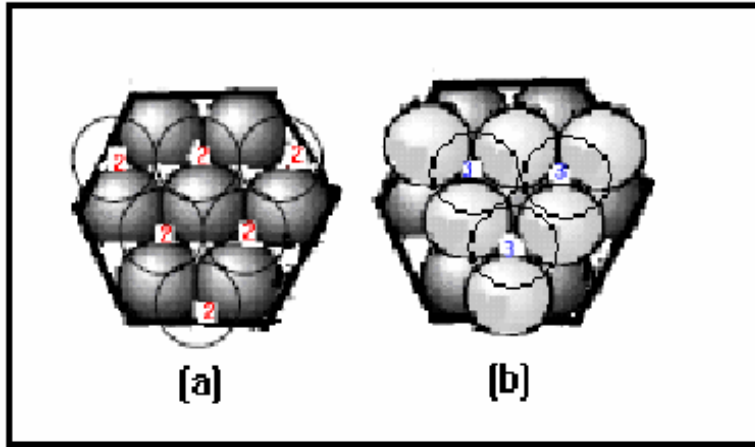


*Montage holographique pour écriture des réseaux*

# Choix des plans d'écriture du réseau



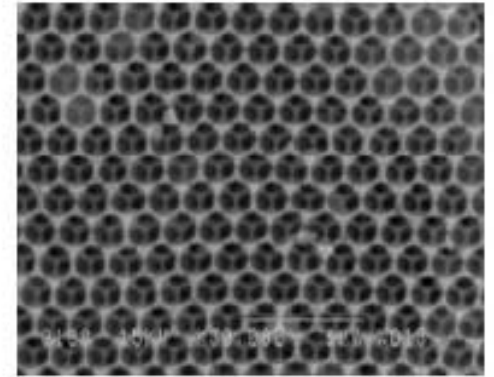
# croissance des cristaux sur une surfaces profilées



- **Plan (111):** Une superposition compacte des billes selon la configuration (a) c'est à dire une répétition des couches 1,2,1,2....donne une structure cubique à faces centrées et selon (b) 1,2,3,1,2,3,.....on obtient une structure hexagonale compacte.
- **Plan (100)** une seule possibilité de superposition

# Opales inverses

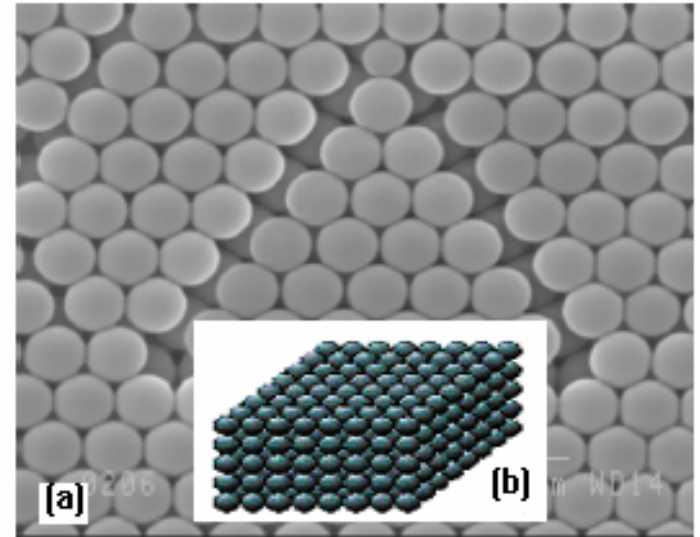
- Pour améliorer le contraste d'indice de réfraction, il est possible d'utiliser les opales comme moule afin de déposer des matériaux à fort indice de réfraction par infiltration
- Le silice ou le polymère est éliminé par la suite
- On obtient ainsi des opales inverses qui gardent la même structure



*Opale inverse de  $TiO_2$*

# Défauts d'empilement

- Un mauvais empilement de l'opale artificielle initiale se reproduit dans celle inverse
- Les défauts dans l'empilement peuvent apporter des modifications significatives dans la position des bandes d'ordre élevé



*Cristal avec défauts d'empilement (a) et idéal (b)*



# Conclusion

- **Lever certaines limites techniques rencontrées dans la structuration des matériaux à l'échelle de la longueur d'onde dans le domaine optique.**
- **Elles permettent de réaliser des cristaux 3D avec plusieurs périodes**
- **Améliorer le contraste d'indice de réfraction**
- **Varié la position de la bande interdite en jouant sur le diamètre des billes.**
- **Mis à part les faibles indices de réfraction des matériaux utilisés et les défauts d'empilement liés à une mauvaise organisation des billes, les opales présentent de belles perspectives**

# Perspectives

- **Tester certains matériaux en les infiltrant dans la structure des opales régulières ou inverses**
- **Transférant le profil de la photorésine sur le substrat par gravure RIE**
- **Méthodes d'analyse pour déterminer le nombre de couches, l'organisation des billes à l'intérieur de la structure cristalline afin de mieux calculer le diagramme des bandes.**