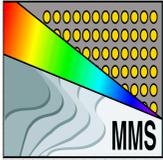


# Cristaux Magnéto-photoniques 2D et Non-réciprocité optique

---

**Mathias Vanwolleghem**, Philippe Gogol, Pierre  
Beauvillain, Jean-Michel Lourtioz.





# Sommaire

---

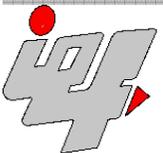
## Introduction

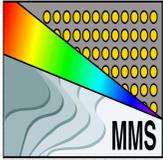
- Origine et motivation
- Non-réciprocité des bandes : conditions de Figotin

## Application aux cristaux magnéto-photoniques 2D (MO PhC)

- Approche par la théorie des groupes
- 1<sup>ères</sup> simulations numériques

## Conclusions et perspectives





# Introduction

**Fin du siècle dernier :**

**Inoue et Levy proposent un MO PhC 1D**

*Inoue et al., J. Appl. Phys., vol. 81(8), 5659 (1997)*

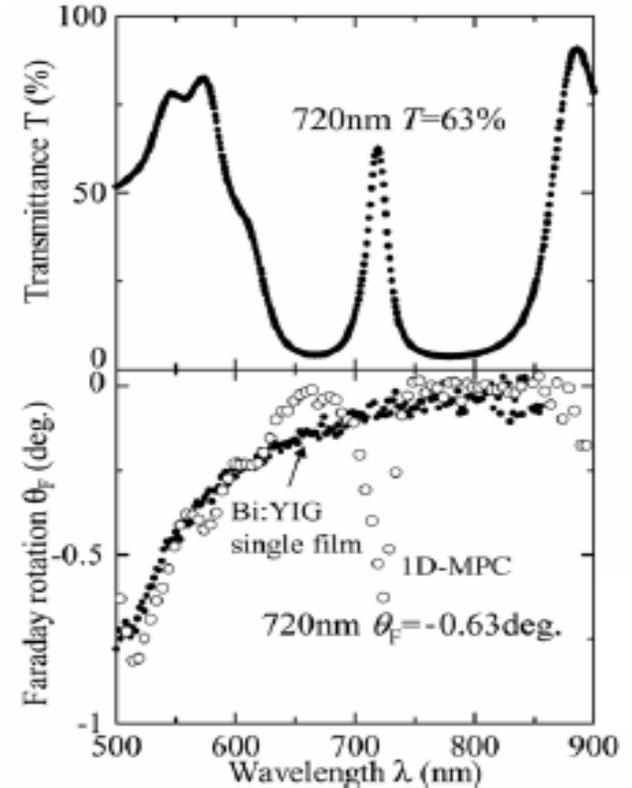
*Steel et al., IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 12(9), 1171 (2000)*

↪ **Miroir de Bragg 1D avec un défaut MO de type cavité  $\lambda/2$**

↪ **Accroissement de l'effet MO Faraday**

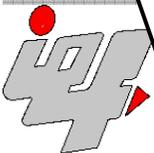
**2003 – Inoue : 1<sup>ère</sup> observation**

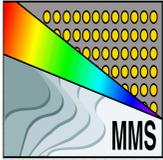
**Véritable MO PhC ou « juste »  
une cavité MO dans un cristal  
photonique 1D standard?**



*Kato et al., J. Appl. Phys., 93(7),3906 (2003)*

Bi:YIG massif :  $\theta_F = -0.2^\circ/\mu\text{m}$   
1D MO PhC :  $\theta_F = -4.1^\circ/\mu\text{m}$   
augmentation d'un facteur x20





# Introduction

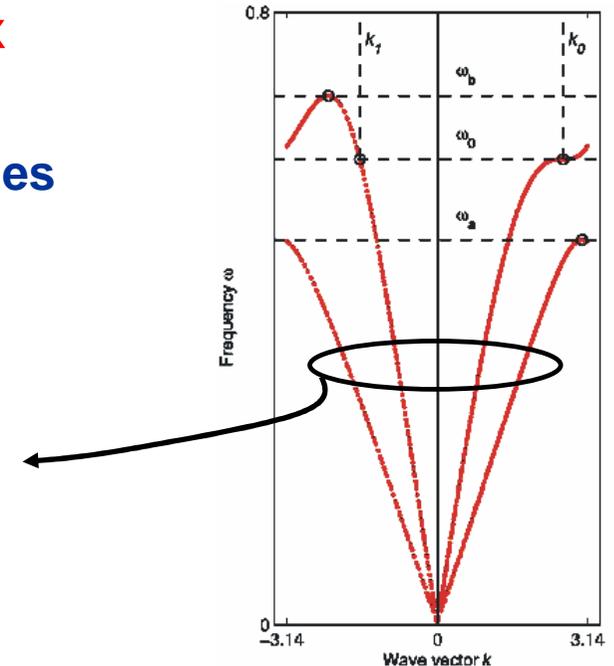
**2001 – Figotin : 1er calcul théorique rigoureux d'un « véritable » MO PhC 1D**

↳ **Prédiction de structures de bande asymétriques et de modes gelés :**

Entre les modes aller (+k) et retour (-k) :

- $\neq$  pente  $\Rightarrow \neq v_g$
- $\neq$  dispersion  $\Rightarrow \neq$  mode de Bloch
- Différence de phase non-réciproque

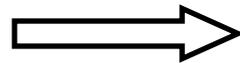
*(interféromètre, coupleurs non-réciproques, isolateurs optiques intégrés ou circulateurs miniaturisés?)*



*Figotin et al., Phys. Rev. E, 63, 066609 (2003)*

↳ **Conditions nécessaires**

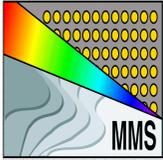
$$\omega(k) \neq \omega(-k)$$



$$\hat{g}\vec{k}_B \neq -\vec{k}_B \quad \forall g \in G$$

(**G** = groupe de symétrie incluant le magnétisme du MO PhC)





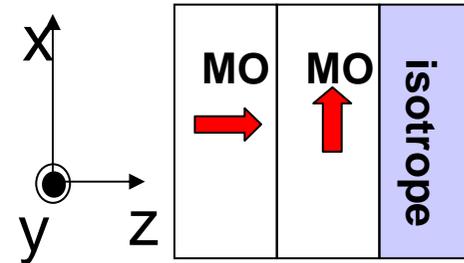
# Théorie de groupe

## Cristaux MagnétoPhotoniques

$$\hat{g}\vec{k}_B \neq -\vec{k}_B \quad \forall g \in G$$

### En MO PhC 1D :

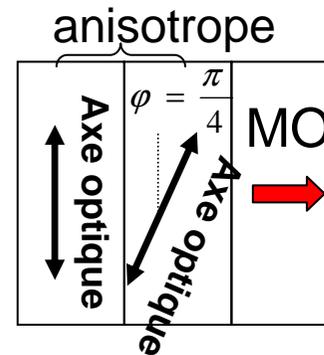
Impossible sans combinaison de matériau optiquement anisotrope et matériau magnéto-optique



$$\hat{m}_{xz} \circ \hat{\mathcal{R}}k_{B,z} = -k_{B,z}$$

$$\hat{m}_{xz} \circ \hat{\mathcal{R}} \in G$$

$\Rightarrow$  réciproque



$$\hat{g}k_{B,z} \neq -k_{B,z}$$

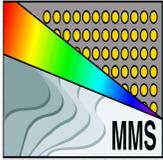
$$\forall g \in G$$

$\Rightarrow$  non-réciproque

**En 2D, degré de liberté supplémentaire : symétrie de groupe du cristal (en plus du magnétisme)**

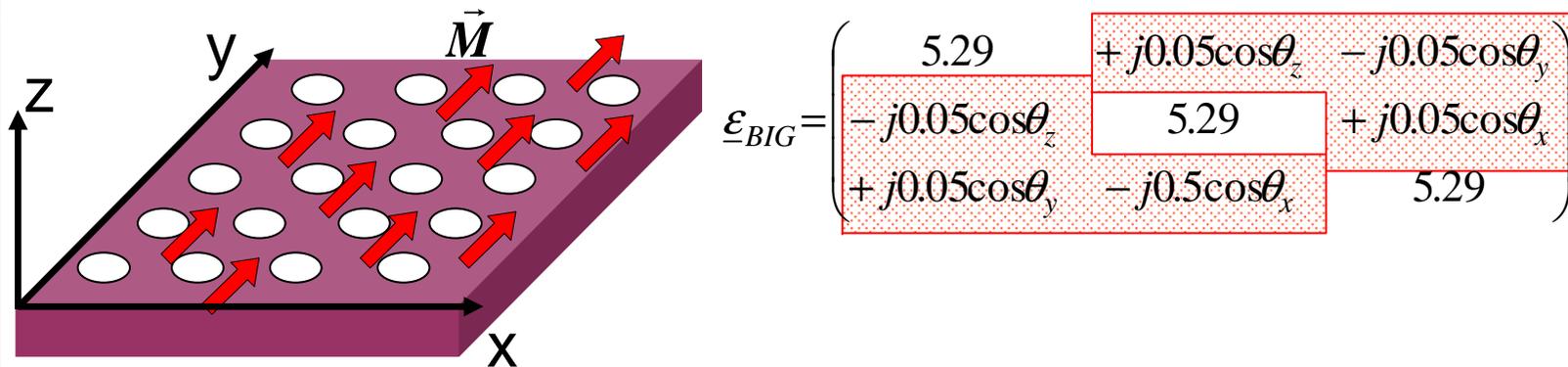
**$\Rightarrow$  Satisfaire les conditions de Figotin sans matériau anisotrope?**





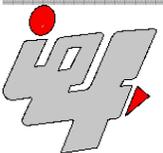
### Réseau 2D de trous d'Air dans un grenat $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (BIG) avec aimantation uniforme

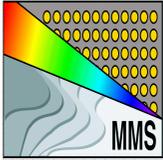
- Transparent, fort indice magnéto-optique (fréquences télécoms)
- $n_{\text{BIG}} \approx 2.3$  et paramètre MO  $Q \approx 0.01$  ( $Q = \varepsilon_{\text{MO,offdiag}}/\varepsilon_{\text{diag}}$ )



Outil de simulation avec  $\varepsilon$  tensoriel

↳ Code libre du MIT : MPB (méthode PWE, <http://ab-initio.mit.edu/wiki>)





### Recherche de la symétrie induisant une non-réciprocité des bandes

↪ Evaluation de la quantité  $\Delta\mathbf{k} = \mathbf{k}_f - \mathbf{k}_b$ , **Forward** (+ $\mathbf{k}_B$ ) et **Backward** (- $\mathbf{k}_B$ )

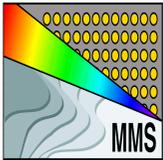
$$\omega(\mathbf{k}) \neq \omega(-\mathbf{k}) \quad \Longrightarrow \quad \hat{g}\vec{k}_B \neq -\vec{k}_B \quad \forall g \in G$$

↪ Identifier le **groupe de symétrie** du cristal avec le **magnétisme** (*Théorie de Shubnikov « B&W groups »*)

↪ Identifier l' « image » d'un **vecteur de Bloch**  $\mathbf{k}_B$  quelconque de la **BZ**

↪ Estimer la nouvelle **Zone de Brillouin Irréductible (IBZ)**

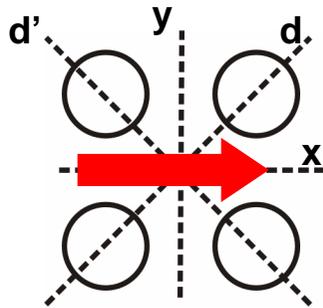




# Simulation

## Cristaux MagnétoPhotoniques

### Exemple : réseau carré uniformément aimanté selon x



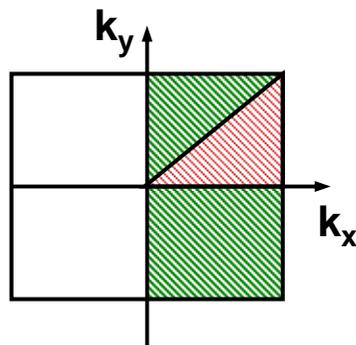
↪ Groupe de symétrie **sans** aimantation =  $C_{4v}$

↪ On ajoute l'aimantation (vecteur axial)

↪ Il ne reste que les opérations 1,  $\sigma_x = C_s$

↪ Application de la théorie de Shubnikov

↪ Groupe de symétrie du cristal **avec** aimantation =  $C_{2v}(C_s)$



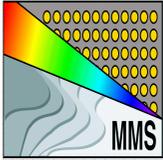
**IBZ SANS** aimantation

**IBZ AVEC** aimantation  $M // x$

↪ seuls les points sur  $\Gamma X$  sont équivalents avec leur opposé (**réciprocité**)

↪ **non-réciprocité** pour les autres directions





# Simulation

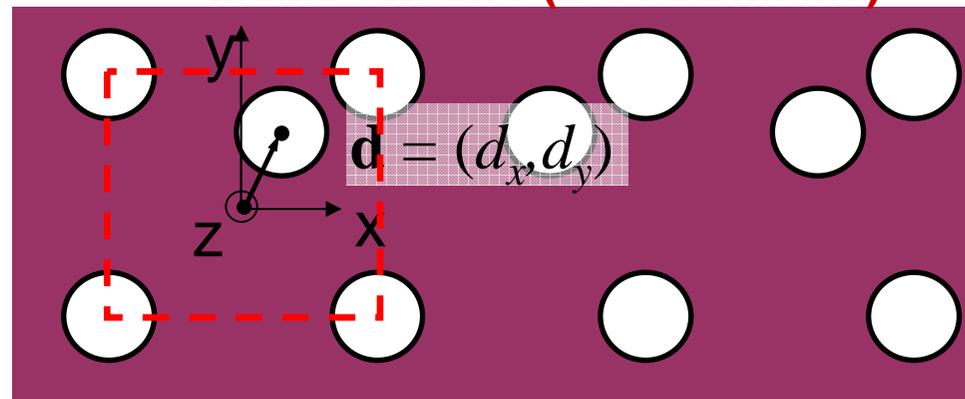
## Cristaux MagnétoPhotoniques

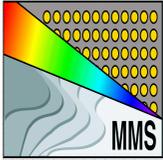
### Objectif : Non-réciprocité dans toutes les directions

- ↳ Peut on avoir IBZ = BZ (réduire les symétries vers  $C_1$ )?
- ↳ Briser la symétrie magnétique : Modifier l'orientation de l'aimantation ( $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ ) ou sa distribution  
⇒ *Difficile à maîtriser*
- ↳ Briser la symétrie cristalline (agencement des trous d'air)  
⇒ *option choisie*

↳ Décalage hors diagonal du trou central de  $d_x$  et  $d_y$

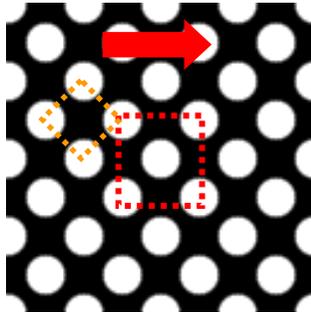
### Maille unitaire (2 trous/maille)





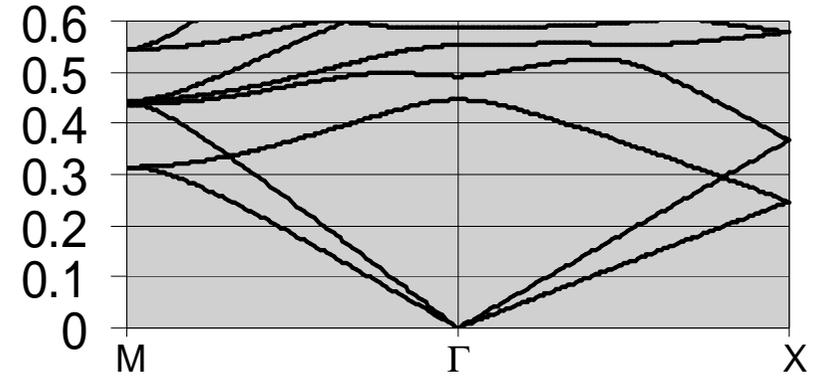
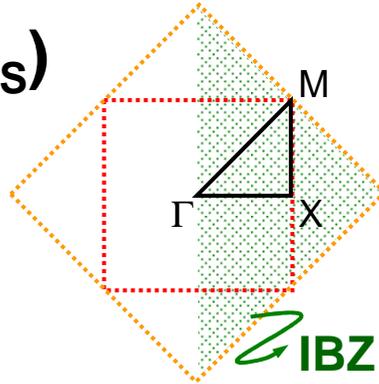
# Simulation

## Cristaux MagnétoPhotoniques



non-déformé

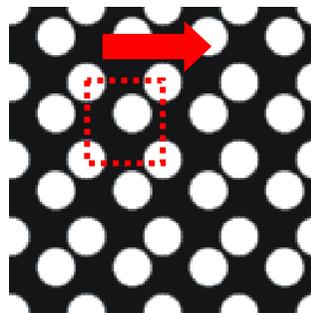
$C_{2v}(C_s)$



f.f.=45%

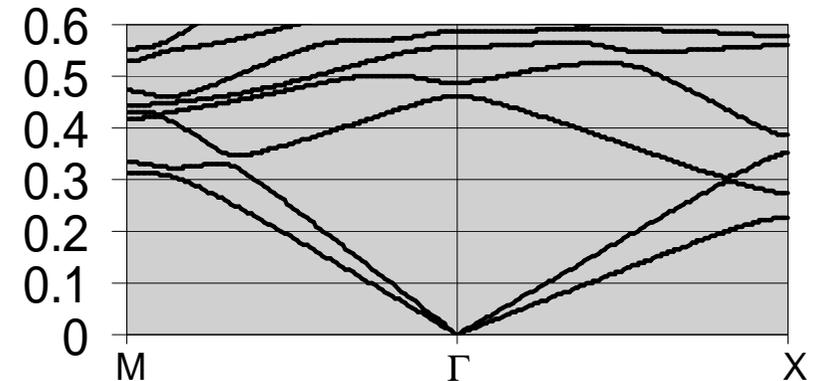
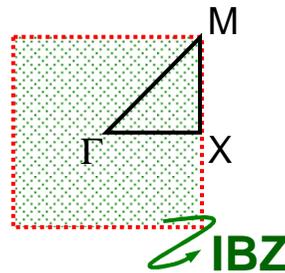
$\vec{M} // x$

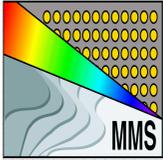
- ↪ Réduction du groupe de symétrie
- ↪ Moins de croisements
- ↪ Bandes plus plates = plus de décélération = effets MO plus forts



Déformation de 20%  
selon la diagonale

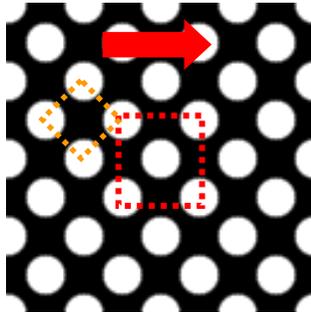
$C_2(C_1)$





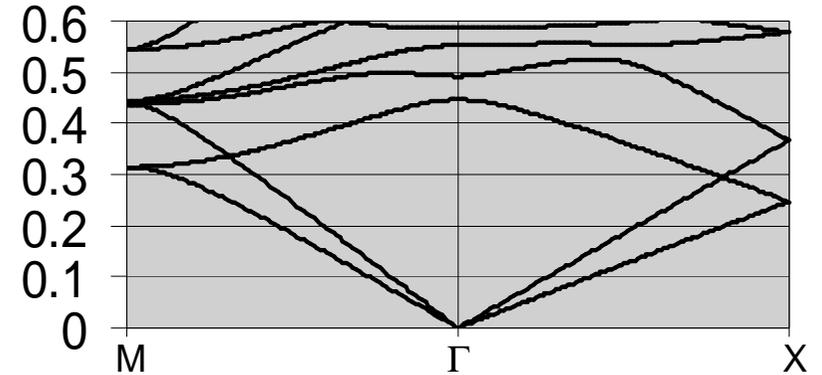
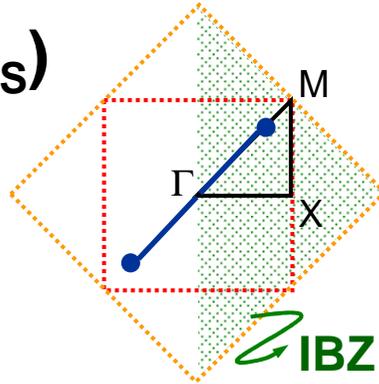
# Simulation

## Cristaux MagnétoPhotoniques



non-déformé

$C_{2v}(C_s)$



f.f.=45%

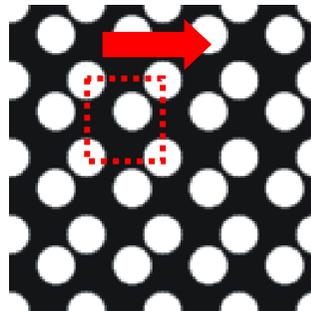
$\vec{M} // x$

Evaluation de la **Non-réciprocité** :

↪ Calcul de  $\Delta k_B$  dans les directions  $\Gamma M^+$  et  $\Gamma M^-$

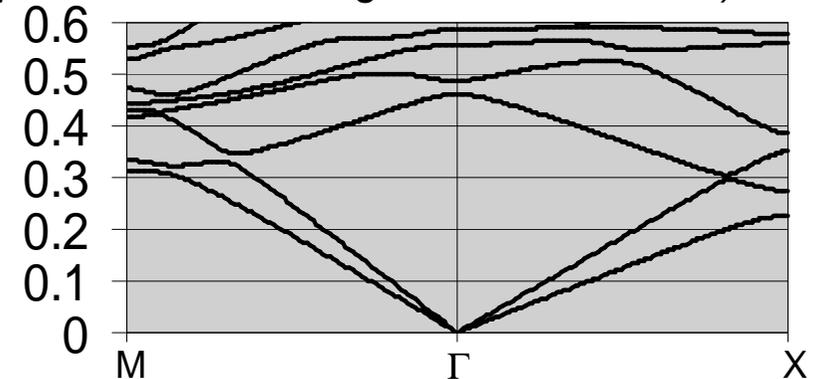
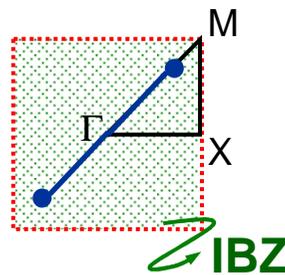
↪ On s'intéresse au bord de bande

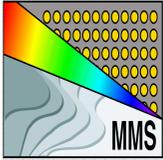
(modification plus spectaculaire du diagramme de bandes)



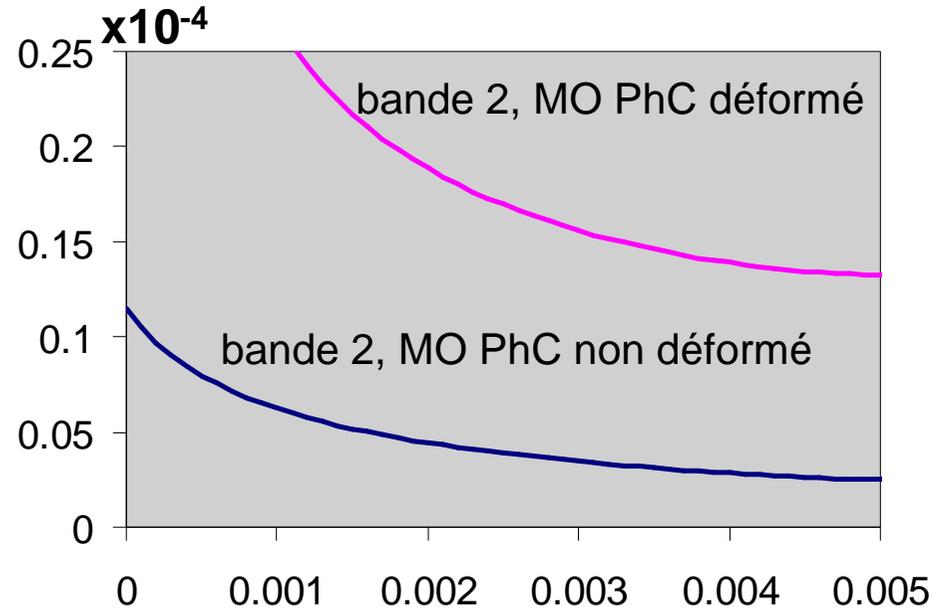
Déformation de 20%  
selon la diagonale

$C_2(C_1)$



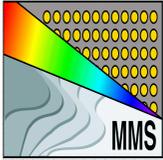


### $\Delta k_B$ normalisé ( $a/2\pi$ pour MPB)



- ↪ Attention : Origine = bord de bande
- ↪ Attention : échelle des ordonnées avec un facteur  $10^{-4}$
- ↪ Identifier les bandes (pas de TE ou TM pur)
- ↪ **Sans Déformation** :  $\Delta k_B \approx 2.5 \cdot 10^{-5} \Rightarrow$  différence de phase de  $1\pi/\text{cm}$   
( $a/\lambda = 0.3$ , @  $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$ )
- ↪ Comparable au guide grenat habituel
- ↪ mais **avec Déformation, augmentation x4**



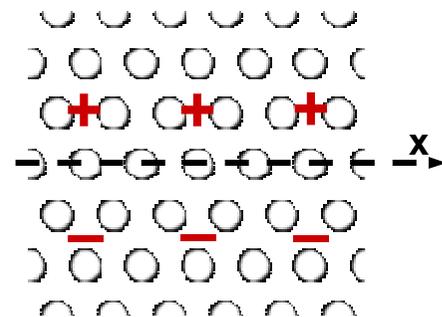


# Faire mieux?

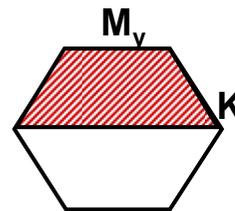
↪ **Briser le plus possible les symétries**

**Solution possible: Aimantation selon Z (Mz) NON uniforme**

*Kono and Koshiba, Opt. Expr. 13(23), pp. 9155, (2005) and OFC 2006*



Groupe de symétrie  $C_2(C_S)$



$$IBZ = BZ/2$$

$$\Gamma K: \Delta k_B \approx 5 \times 10^{-4} \text{ @ } a/\lambda = 0.33$$

↪  $2\pi/\text{mm}$  de non-réciprocité sur la phase

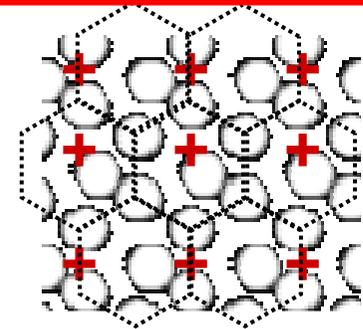
***Mais structure magnétique très difficile à contrôler***

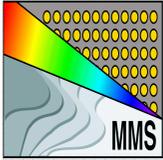
**Notre solution: Maille unitaire « asymétrique »**

↪ **Aimantation uniforme  $M // z$**

↪ **Réduction du groupe également à C**

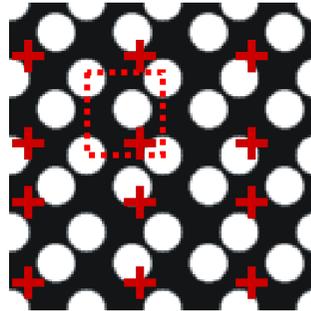
↪ **Aimantation plus « facilement » contrôlable**





# Exemples canoniques

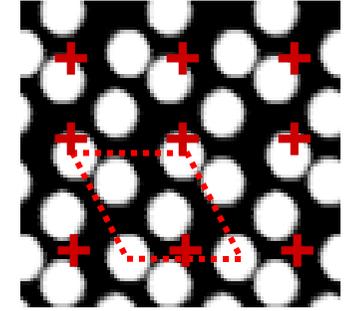
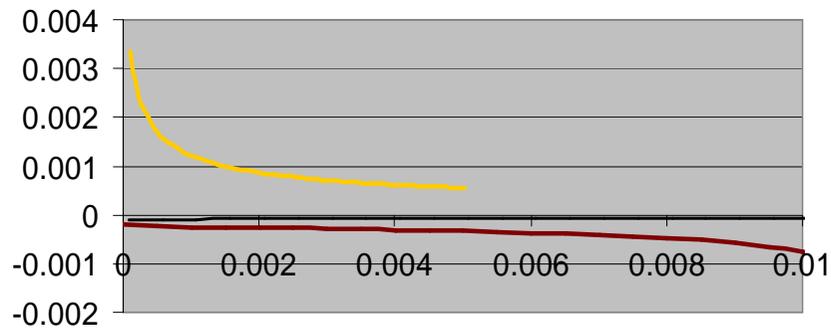
## Cristaux MagnétoPhotoniques



$C_{4v}$  vers  $C_S(C_1)$

$\Delta k_B$  selon  $\Gamma X$

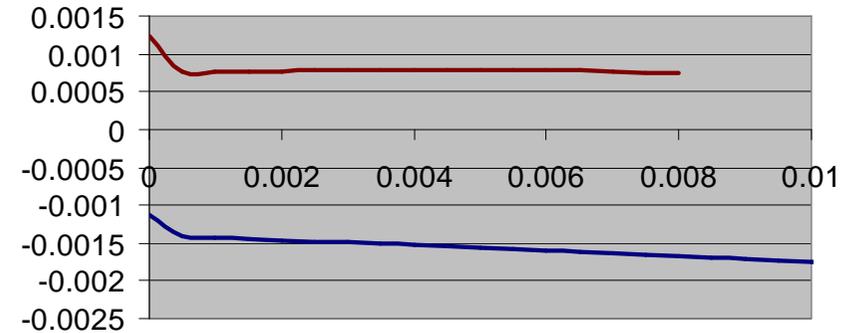
— band 3 — band 4 — band 5



$C_{6v}$  vers  $C_S(C_1)$

$\Delta k_B$  selon  $\Gamma M'$

— band 3 — band 4



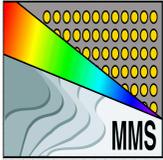
↪ Attention : échelle des ordonnées SANS un facteur  $10^{-4}$

↪ «  $C_{6v}$  vers  $C_1$  » plus fort (facteur 2 au moins) que «  $C_{4v}$  to  $C_1$  »

Pour «  $C_{6v}$  to  $C_S(C_1)$  » :  $\Delta k_B \approx 1.5 \cdot 10^{-3}$  @  $a/\lambda = 0.6$

⇒ **3.25  $\pi/\text{mm}$**  de non-réciprocité sur la phase





### Validité de la non-réciprocité des Cristaux MagnétoPhotoniques :

- ↪ Déformation du cristal permet une augmentation d'un facteur 5
- ↪ Effet plus important pour un réseau hexagonal avec  $M // z$

### Perspectives :

- ↪ Etude systématique des 5 types de réseaux de Bravais (avec déformation)
- ↪ Comportement d'un guide d'onde de type W
- ↪ Simulation micromagnétique (effet local de la structuration sur M)
- ↪ Réalisation technologique et 1<sup>er</sup> test expérimental (ANR blanc 2006)

