



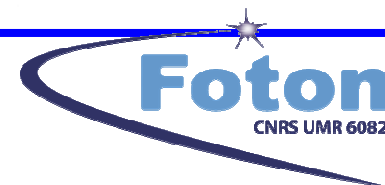
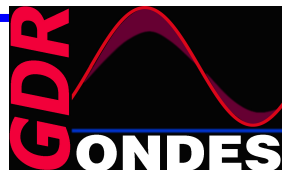
PAYSAGES COUPLONNIQUES

*(ou le couplage de modes dans
quelques-uns de ses états)*

Yann G. BOUCHER

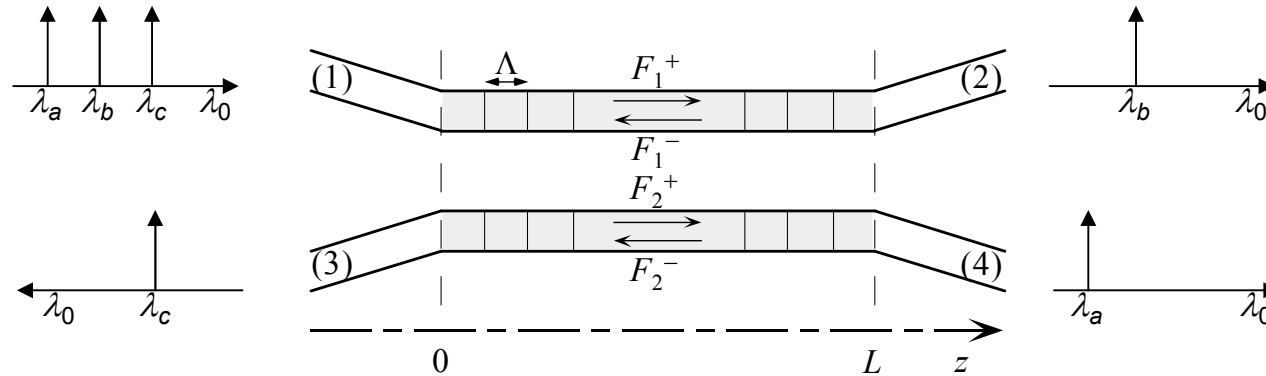
(1) Institut FOTON (UMR CNRS 6082), CS 80518, 22305 Lannion Cedex
(2) ENIB, Technopôle Brest-Iroise, CS 73862, 29238 Brest Cedex 3

yann.boucher@enib.fr

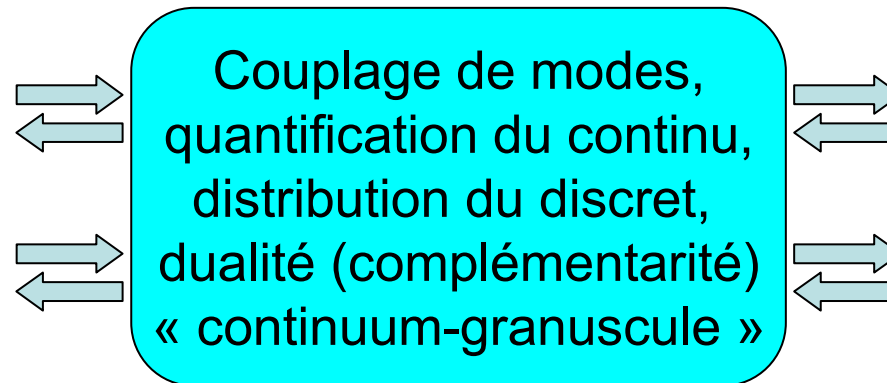


Couplonique : contexte et enjeux

Adressage et filtrage spectral



- MOTS-CLEFS :
- Guides d'onde périodiques couplés,
 - Cristal photonique,
 - Réflecteur de Bragg (DBR),
 - Rétroaction distribuée...



Plan de l'exposé

1. *Couplage co-directionnel*

Algèbre linéaire, approche formelle, modèle planaire, couplage non-perturbatif

2. *Couplage contra-directionnel*

DBR/DFB, identification matricielle, relief universel, alpinisme couplonique

3. *Éléments de couplonique*

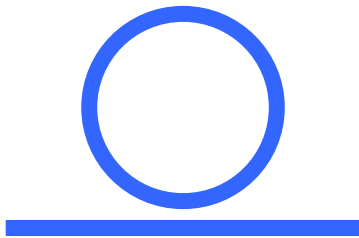
Opérateur d'évolution, supermodes propres, paramètres S

4. *Exemples et perspectives*

Photonique discrète, symétrie parité-temps...

1. Couplage co-directionnel

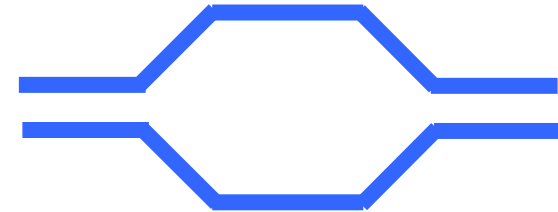
Quelques exemples en optique intégrée



Résonateur



Répartiteur

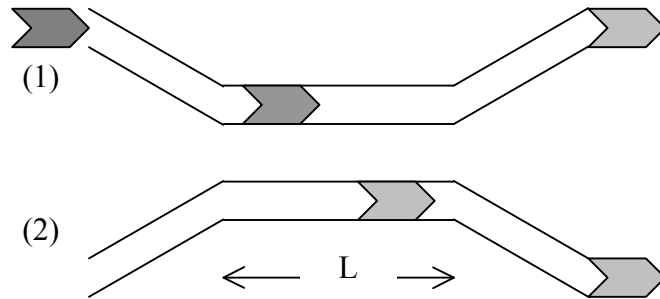


Interféromètre

Recouvrement par ondes évanescentes...
ou autrement

Opérateur d'évolution

Deux modes, de constantes de propagation (β_1, β_2) . $F(t)$ en $e^{+i\omega t}$



$$i \frac{\partial}{\partial z} \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta + \Delta & \chi \\ \chi & \beta - \Delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix}$$

$$F_n(z) = A_n(z) e^{-i\beta z}$$

- *Vecteur d'onde moyen* : $\beta = (\beta_1 + \beta_2)/2$
- *Désaccord de phase* : $\Delta = (\beta_1 - \beta_2)/2$
- *Constante de couplage* : χ (réel positif)

$$i \frac{\partial}{\partial z} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta & \chi \\ \chi & -\Delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} \Rightarrow \boxed{\frac{\partial^2 A_n}{\partial z^2} + \Gamma^2 A_n = 0} \quad (\Gamma^2 = \chi^2 + \Delta^2)$$

Matrices de Jones

Entre $z = 0$ et $z = L$

- enveloppes lentement variables (A_n) :

$$\begin{pmatrix} A_{1L} \\ A_{2L} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\Gamma L) - i \frac{\Delta}{\Gamma} \sin(\Gamma L) & -i \frac{\chi}{\Gamma} \sin(\Gamma L) \\ -i \frac{\chi}{\Gamma} \sin(\Gamma L) & \cos(\Gamma L) + i \frac{\Delta}{\Gamma} \sin(\Gamma L) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{10} \\ A_{20} \end{pmatrix}$$

- avec les phases (F_n) :

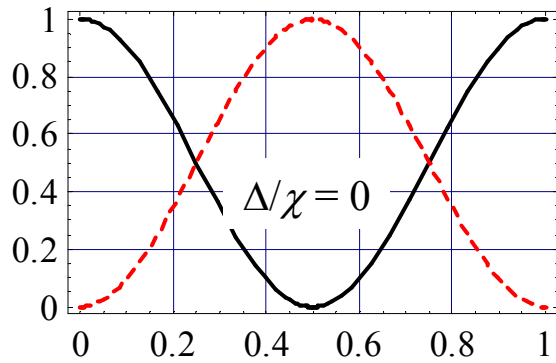
$$\begin{pmatrix} F_{1L} \\ F_{2L} \end{pmatrix} = e^{-i\beta L} \begin{pmatrix} \cos(\Gamma L) - i \frac{\Delta}{\Gamma} \sin(\Gamma L) & -i \frac{\chi}{\Gamma} \sin(\Gamma L) \\ -i \frac{\chi}{\Gamma} \sin(\Gamma L) & \cos(\Gamma L) + i \frac{\Delta}{\Gamma} \sin(\Gamma L) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_{10} \\ F_{20} \end{pmatrix}$$

Transfert d'énergie

Conditions aux limites : $A_1(0) = A_{10}$, $A_2(0) = 0$; $\Gamma = [\chi^2 + \Delta^2]^{1/2}$.

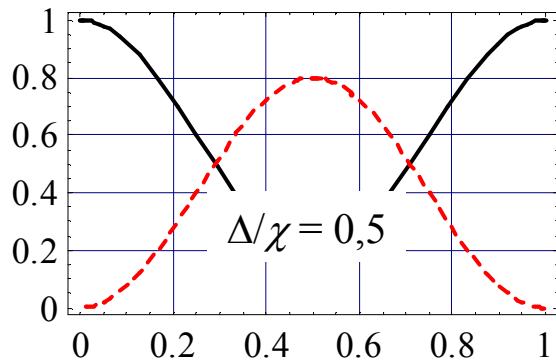
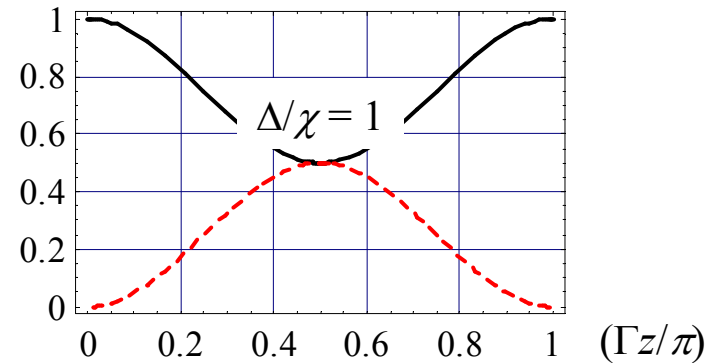
$$A_1(z) = A_{10} \times [\cos(\Gamma z) - i (\Delta/\Gamma) \sin(\Gamma z)],$$

$$A_2(z) = A_{10} \times [-i (\chi/\Gamma) \sin(\Gamma z)].$$



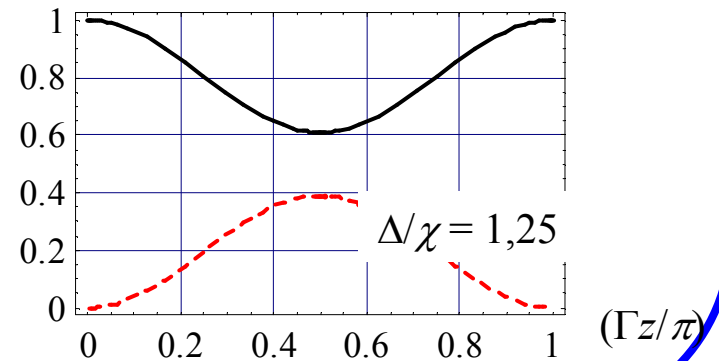
$$|A_1/A_{10}|^2 \text{ (—)},$$

$$|A_2/A_{10}|^2 \text{ (- -)}$$



$$P_1 + P_2 = \text{cte}$$

$$\eta_{Max} = \frac{\chi^2}{\chi^2 + \Delta^2}$$



$\Delta = 0$: supermodes pair-impair (e/o)

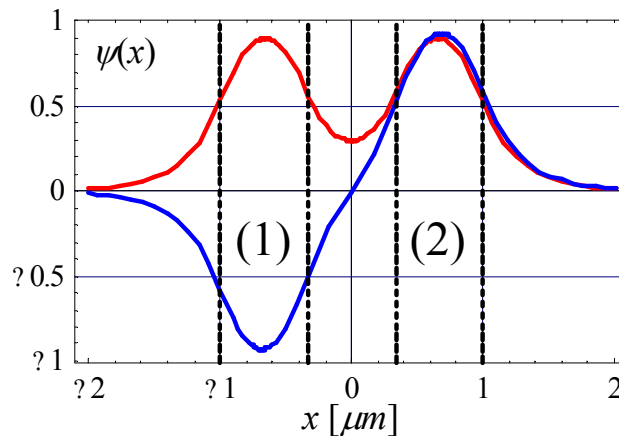
$$\begin{pmatrix} F_e \\ F_o \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_e \\ F_o \end{pmatrix}$$

$$i \frac{\partial}{\partial z} \begin{pmatrix} F_e \\ F_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta + \chi & 0 \\ 0 & \beta - \chi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_e \\ F_o \end{pmatrix}$$

(e) = lent
(o) = rapide

$$\beta_e = \beta + \chi$$

$$\beta_o = \beta - \chi$$



Mode (1) \propto (e) - (o)

Mode (2) \propto (e) + (o)

$$A_1(z) = A_{10} \cos(\chi z), \quad A_2(z) = -i A_{20} \sin(\chi z).$$

Transfert intégral de puissance : $\chi L \equiv \pi/2$ [π]

Analogie atomique : formules de Rabi

Système à 2 niveaux :

$$H_0 |\varphi_1\rangle = E_1 |\varphi_1\rangle,$$

$$H_0 |\varphi_2\rangle = E_2 |\varphi_2\rangle,$$

$$\langle \varphi_i | \varphi_j \rangle = \delta_{ij}, \quad (i, j = 1, 2).$$

Énergie moyenne : $E = (E_1' + E_2')/2,$

Écart d'énergie : $\Delta = (E_1' - E_2')/2$

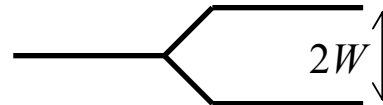
Valeurs propres : $E^\pm = E \pm [\Delta^2 + W^2]^{1/2}.$

Vecteurs propres : $|\varphi^+\rangle = +\cos(\theta/2) |\varphi_1\rangle + \sin(\theta/2) |\varphi_2\rangle,$
 $|\varphi^-\rangle = -\sin(\theta/2) |\varphi_1\rangle + \cos(\theta/2) |\varphi_2\rangle,$

$\text{tg}(\theta) = W/\Delta,$ avec $\theta \in [0, \pi[.$

*Sous l'effet du couplage non-diagonal,
 les niveaux perturbés « se repoussent »
 (formules de Rabi).*

Si $E_1' = E_2',$ levée de dégénérescence :



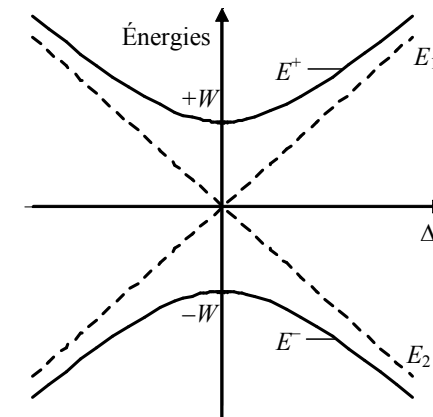
Hamiltonien non perturbé

$$H_0 = \begin{pmatrix} E_1 & 0 \\ 0 & E_2 \end{pmatrix}$$

Hamiltonien perturbé

$$H = \begin{pmatrix} E_1' & W \\ W & E_2' \end{pmatrix}$$

E^+ et E^- en fonction de $\Delta.$



D'autres exemples ?

- Lame biréfringente
- Oscillation des neutrinos
- Coupleur assisté par réseau...

2. Couplage contra-directionnel

Modulation périodique de l'indice :



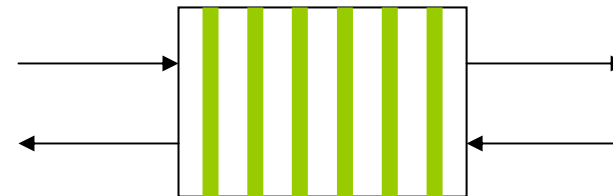
« RÉTROACTION
DISTRIBUÉE »

- période Λ
- indice (effectif) moyen n_m
- vect. d'onde de Bragg $\beta_B = (\pi/\Lambda)$
- désaccord de phase $\delta = \beta - \beta_B$
- nombre de périodes N
- longueur $L = N \Lambda$
- vecteur d'onde $\beta = n_m (\omega/c)$
- constante de couplage κ (réelle)

Deux modes contra-propagatifs

$$F^+(z) = B_1(z) \exp(-i \beta_B z),$$

$$F^-(z) = B_2(z) \exp(+i \beta_B z).$$



$$i \frac{\partial}{\partial z} \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta & \kappa \\ -\kappa & -\delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} \Rightarrow \boxed{\frac{\partial^2 B_n}{\partial z^2} - \gamma^2 B_n = 0} \quad (\gamma^2 = \kappa^2 - \delta^2)$$

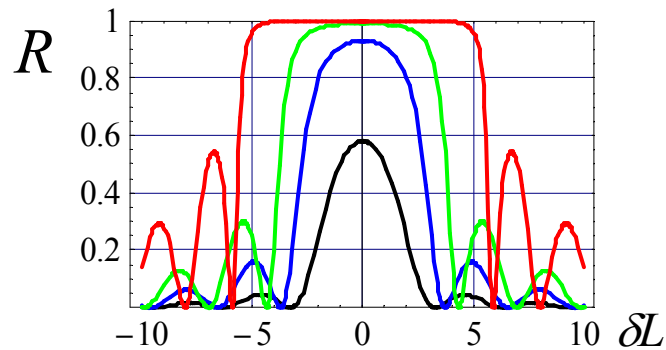
Matrice de transfert

$$\begin{pmatrix} F_0^+ \\ F_0^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left[\text{ch}(\gamma L) + i \frac{\delta L}{\gamma L} \text{sh}(\gamma L) \right] e^{+i\beta_B L} & \left[+i \frac{\kappa L}{\gamma L} \text{sh}(\gamma L) \right] e^{-i\beta_B L} \\ \left[-i \frac{\kappa L}{\gamma L} \text{sh}(\gamma L) \right] e^{+i\beta_B L} & \left[\gamma L \text{ch}(\gamma L) - i \frac{\delta L}{\gamma L} \text{sh}(\gamma L) \right] e^{-i\beta_B L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_S^+ \\ F_S^- \end{pmatrix}$$

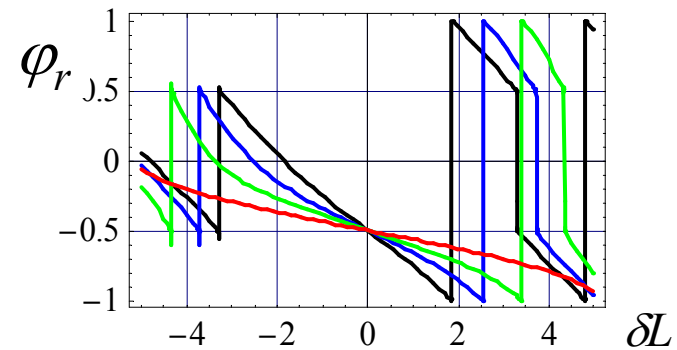
$$R = \left| \frac{M_{21}}{M_{11}} \right|^2, \quad T = \left| \frac{1}{M_{11}} \right|^2.$$

$$\gamma = [\kappa^2 - \delta^2]^{1/2}$$

$$R_{\text{MAX}} = \text{th}^2(|\kappa L|)$$



$\kappa L = 1, 2, 3, 5$



$\gamma^2 < 0 \Rightarrow$ propagation
 $\gamma^2 > 0 \Rightarrow$ évanescence

BANDE INTERDITE
 $\Delta \delta L = 2 |\kappa L|$

Maille élémentaire

$$[m] = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix}, \det[m] = 1 \Rightarrow \text{ÉQUIVALENCE FORMELLE EXACTE}$$

$$[m] = - \begin{bmatrix} \operatorname{ch} \gamma\Lambda + i \frac{\delta\Lambda}{\gamma\Lambda} \operatorname{sh} \gamma\Lambda & -i \frac{\kappa\Lambda}{\gamma\Lambda} \operatorname{sh} \gamma\Lambda \\ +i \frac{\kappa\Lambda}{\gamma\Lambda} \operatorname{sh} \gamma\Lambda & \operatorname{ch} \gamma\Lambda - i \frac{\delta\Lambda}{\gamma\Lambda} \operatorname{sh} \gamma\Lambda \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \operatorname{ch} \eta - \left(\frac{m_{11} - m_{22}}{2\sqrt{V_m^2 - 1}} \right) \operatorname{sh} \eta & \left(\frac{-m_{12}}{\sqrt{V_m^2 - 1}} \right) \operatorname{sh} \eta \\ \left(\frac{-m_{21}}{\sqrt{V_m^2 - 1}} \right) \operatorname{sh} \eta & \operatorname{ch} \eta + \left(\frac{m_{11} - m_{22}}{2\sqrt{V_m^2 - 1}} \right) \operatorname{sh} \eta \end{bmatrix}$$

Règles de correspondance :

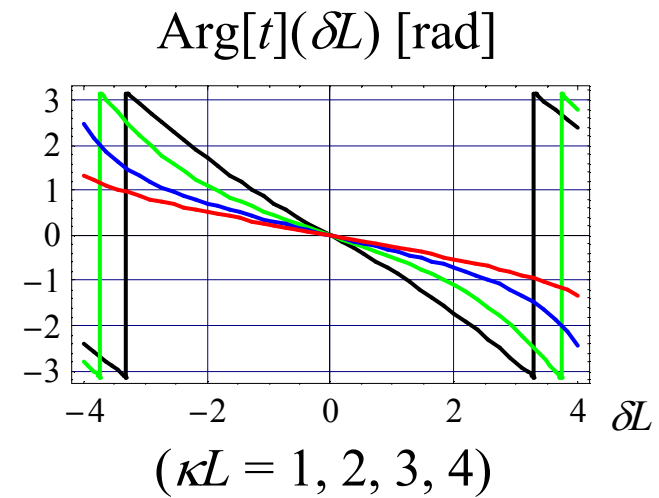
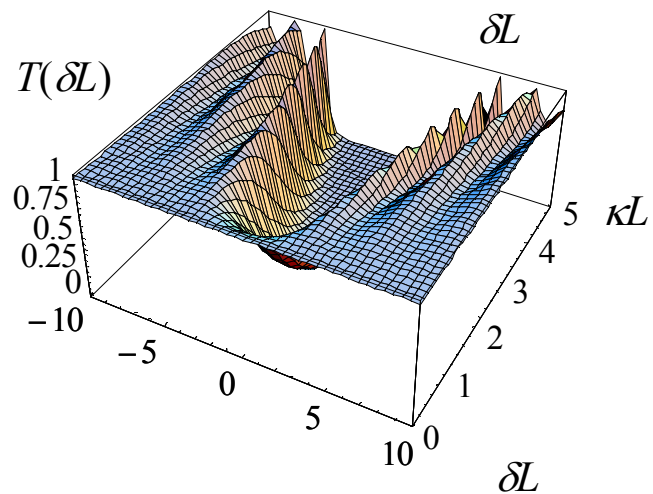
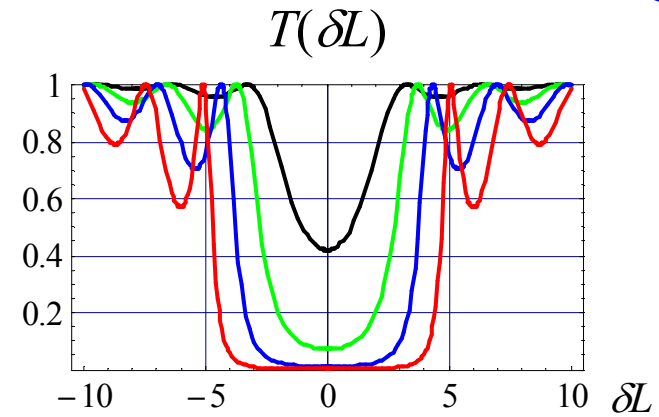
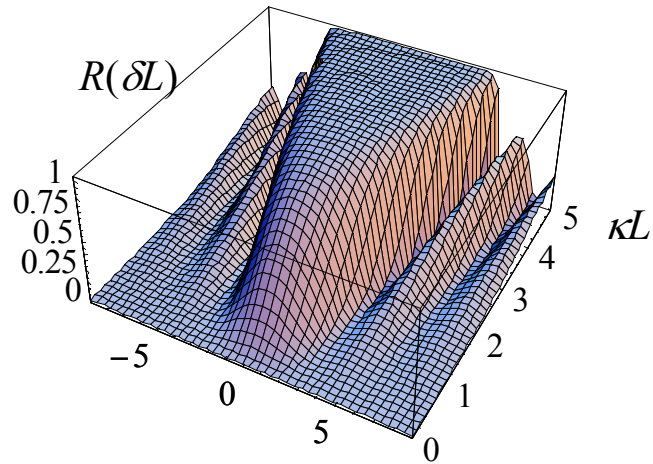
Paramètres *couploniques* : $(\kappa\Lambda, \delta\Lambda)$

$$\exists (V_m, \eta) \text{ complexes :} \quad \gamma\Lambda = \eta = \operatorname{Argch} \left(-\frac{m_{11} + m_{22}}{2} \right), \quad V_m = \frac{m_{11} + m_{22}}{2} = -\operatorname{ch}(\eta)$$

$$\frac{\operatorname{sh}(\eta)}{\sqrt{V_m^2 - 1}} = 1, \quad \kappa\Lambda = -i \frac{\gamma\Lambda}{\sqrt{V_m^2 - 1}} m_{12}, \quad \delta\Lambda = +i \frac{\gamma\Lambda}{\sqrt{V_m^2 - 1}} \left(\frac{m_{11} - m_{22}}{2} \right).$$

cf. N. Matuschek, F.X. Kärtner, U. Keller, *Exact Coupled-Mode Theories for Multilayer Interference Coatings with Arbitrary Strong Index Modulations*, **IEEE J. Quantum Electron.** Vol. 33 (3), pp. 295-302 (1997).

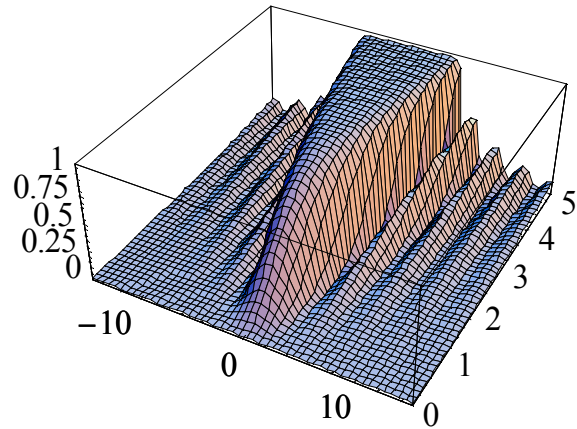
Relief de Bragg universel



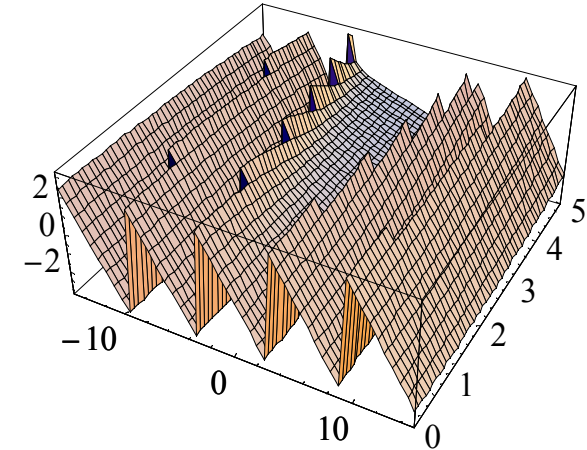
Structure passive à couplage pur par l'indice (κ réel positif)

Alpinisme ou surf couplonique

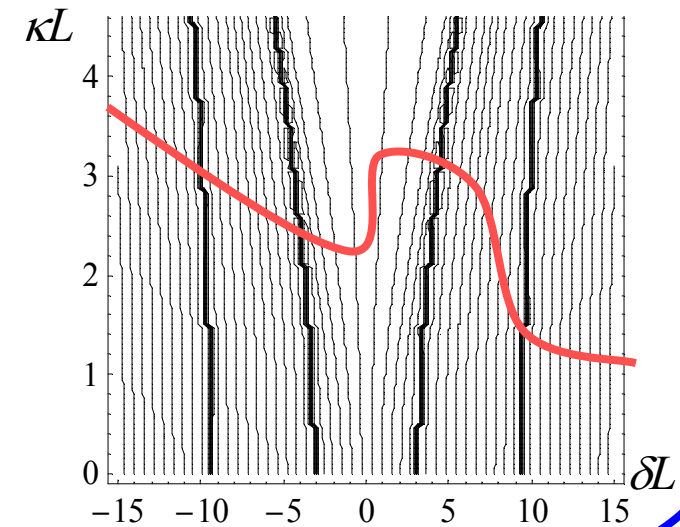
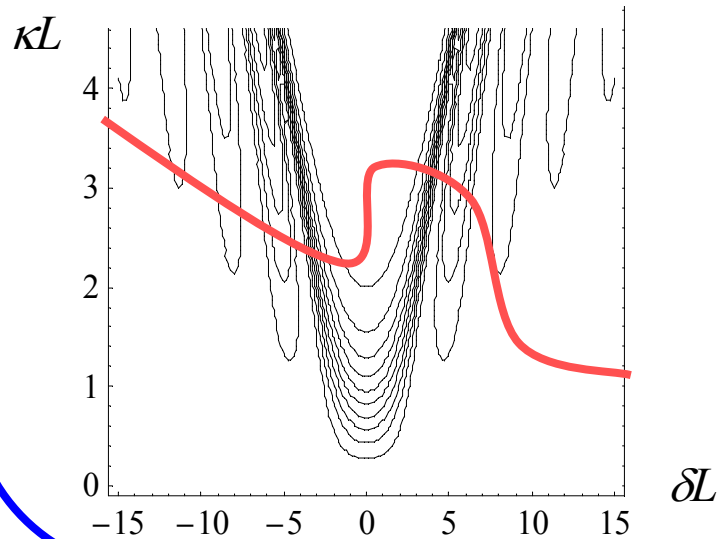
« ALPINISME »



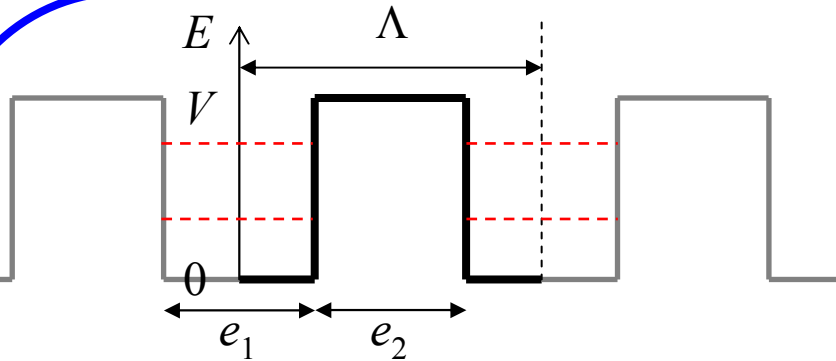
« SURF »



— Relief universel
— Itinéraire balisé



Créneau de potentiel quantique



$$m_{11} = \left\{ \cos \theta_2 + i \left(\frac{2X^2 - 1}{2X\sqrt{X^2 - 1}} \right) \right\} e^{+i\theta_1} = m_{22}^*$$

$$m_{12} = i \left(\frac{1}{2X\sqrt{X^2 - 1}} \right) \sin \theta_2 = m_{21}^*$$

$$\hbar k_1 = [2 m E]^{1/2}$$

$$\hbar k_2 = [2 m (E - V)]^{1/2}$$

$$\hbar k_v = [2 m V]^{1/2}$$

$$f = (e_2 / \Lambda)$$

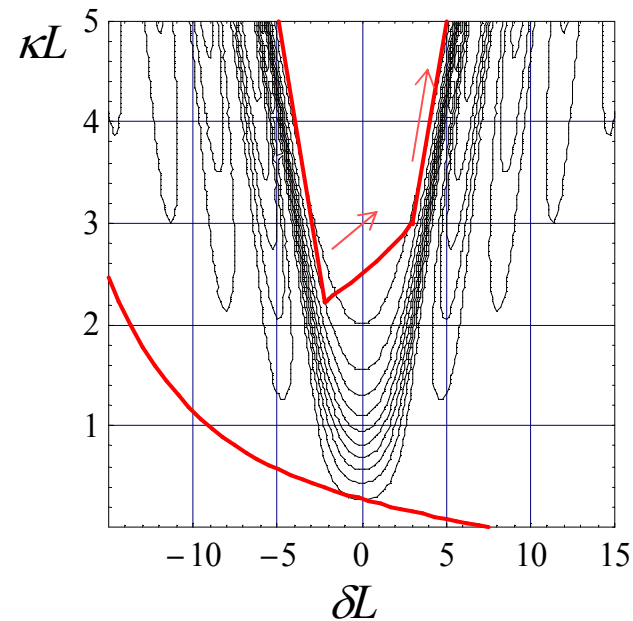
$$(1 - f) = (e_1 / \Lambda)$$

$$X = k_1 / k_v = (E / V)^{1/2}$$

$$\theta_1 = k_1 e_1 = X (1 - f) (k_v \Lambda),$$

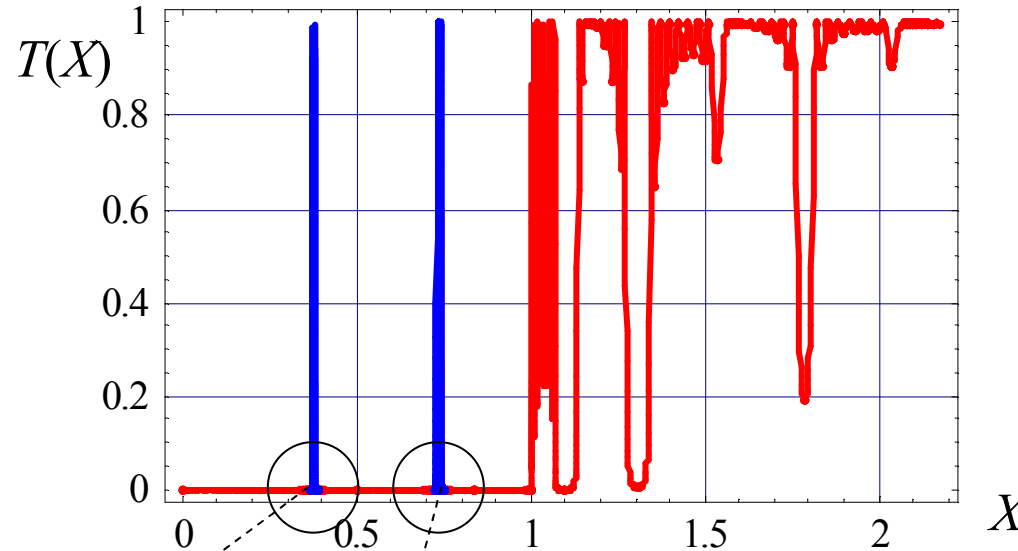
$$\theta_2 = k_2 e_2 = [1 - X^2]^{1/2} f (k_v \Lambda).$$

A.N.: $k_v e_1 = 2 \pi$
 \Rightarrow
 2 niveaux par PQ

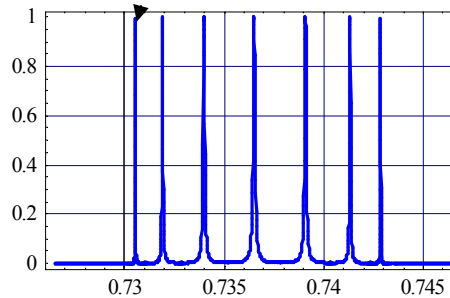
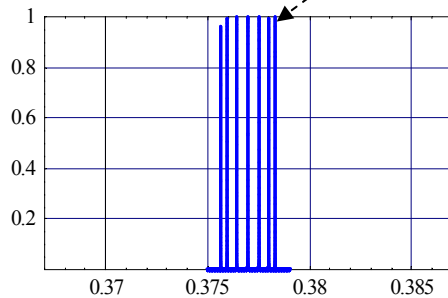


Puits quantiques couplés

8 cellules ($f = 0,45$) \Rightarrow 7 PQ couplés \Rightarrow levée de dégénérescence



Confinement..... Continuum

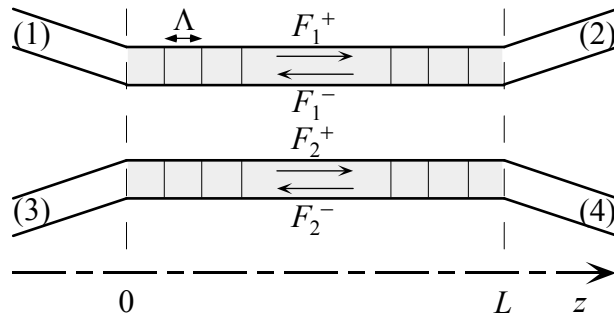


$k_v e_1 = 2 \pi \Rightarrow$
2 niveaux dans le PQ
[$X_1 = 0,377$; $X_2 = 0,736$]
Couplage \Rightarrow 7 niveaux

3. Guides périodiques couplés

Configuration continue

2 guides monomodes identiques à modulation périodique de l'indice



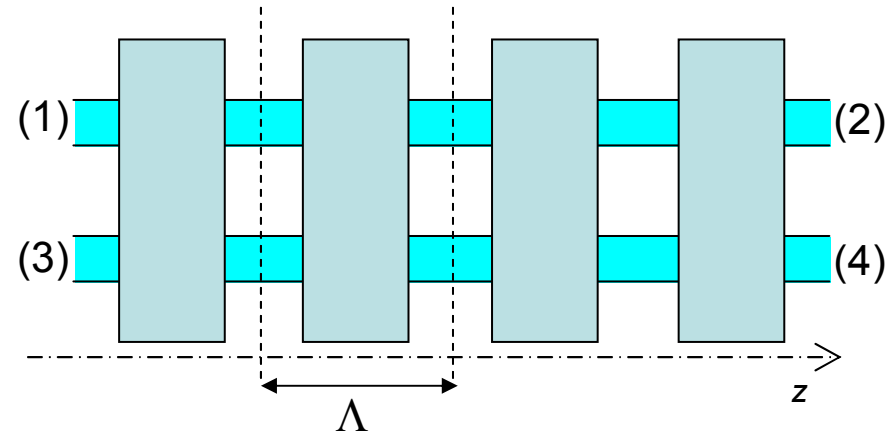
Couplages co- et contra-directionnels simultanés

OPÉRATEUR D'ÉVOLUTION [K]
(équations d'ondes couplées)

Enveloppes lentement variables : $F_n^+ = C_n^+ \exp(-i \beta_B z)$,
 $F_n^- = C_n^- \exp(+i \beta_B z)$.

Configuration discrète

Empilement périodique d'octopôles connectés par des tronçons de ligne



Maille élémentaire : symétrique, réciproque, passive et sans perte

MATRICE DE RÉPARTITION
(paramètres S)

Opérateur d'évolution (4×4)

(MAILLE SYMÉTRIQUE)

$$i \frac{\partial}{\partial z} \begin{pmatrix} C_1^+ \\ C_2^+ \\ C_1^- \\ C_2^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta & \chi & \kappa & \xi \\ \chi & \delta & \xi & \kappa \\ -\kappa & -\xi & -\delta & -\chi \\ -\xi & -\kappa & -\chi & -\delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1^+ \\ C_2^+ \\ C_1^- \\ C_2^- \end{pmatrix} = [\mathbf{K}] \begin{pmatrix} C_1^+ \\ C_2^+ \\ C_1^- \\ C_2^- \end{pmatrix}$$

κ = couplage contra-directionnel

χ = couplage co-directionnel

ξ = couplage contra-directionnel *croisé*

β = constante de propagation

$\delta = \beta - \beta_B =$ désaccord de phase

Découplage pair (e) – impair (o)

✓ Modes pairs (e)

✓ Modes impairs (o)

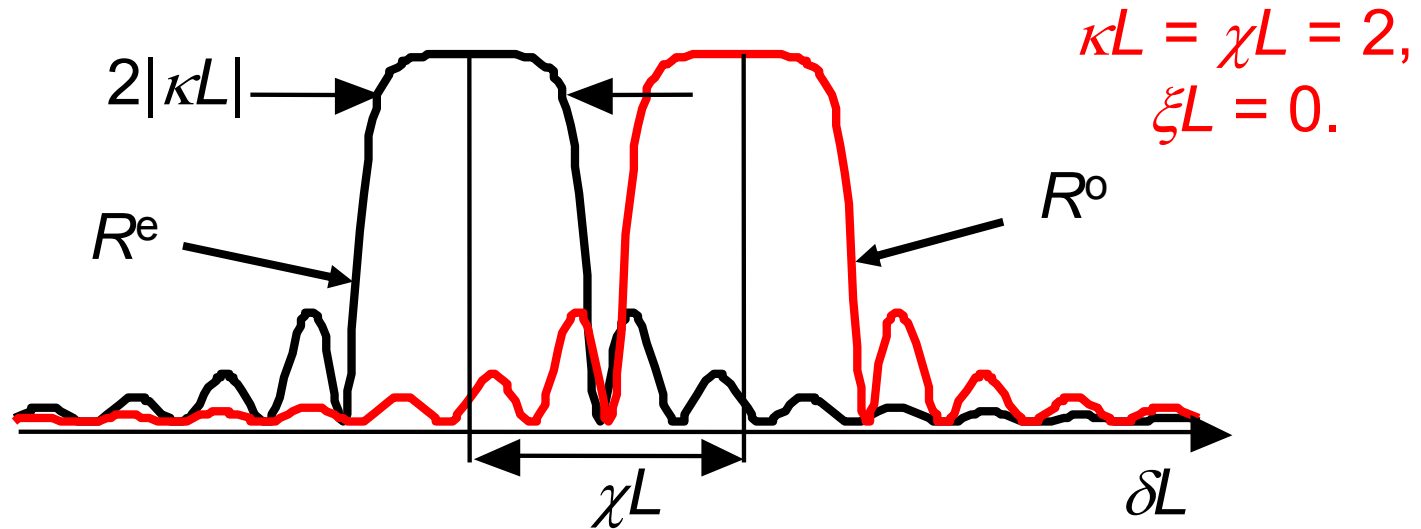
$$\begin{pmatrix} C_e^+ \\ C_o^+ \\ C_e^- \\ C_o^- \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1^+ \\ C_2^+ \\ C_1^- \\ C_2^- \end{pmatrix}$$

Opérateur d'évolution :

$$i \frac{\partial}{\partial z} \begin{pmatrix} C_e^+ \\ C_e^- \\ C_o^+ \\ C_o^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta + \chi & \kappa + \xi & 0 & 0 \\ -(\kappa + \xi) & -(\delta + \chi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \delta - \chi & \kappa - \xi \\ 0 & 0 & -(\kappa - \xi) & -(\delta - \chi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_e^+ \\ C_e^- \\ C_o^+ \\ C_o^- \end{pmatrix}$$

$$(e) : \delta_e = (\delta + \chi), \quad \kappa_e = (\kappa + \xi), \quad (o) : \delta_o = (\delta - \chi), \quad \kappa_o = (\kappa - \xi).$$

Levée de dégénérescence



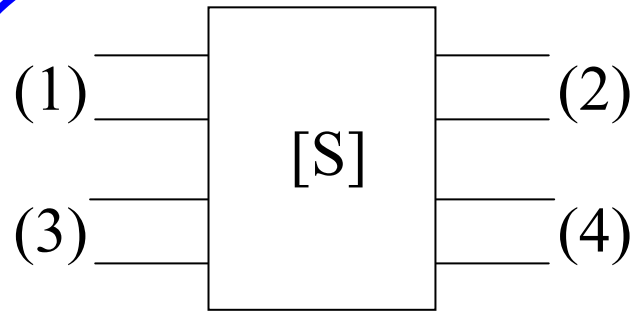
1 problème à 4 ondes \Leftrightarrow 2 problèmes à 2 ondes (1D)

Couplage entre 2 résonateurs de Bragg

$$R^\alpha = \left| \frac{-i \kappa_\alpha L \operatorname{sh}(\gamma_\alpha L)}{\gamma_\alpha L \operatorname{ch}(\gamma_\alpha L) + i \delta_\alpha L \operatorname{sh}(\gamma_\alpha L)} \right|^2 \quad \gamma_\alpha L = \sqrt{|\kappa_\alpha L|^2 - (\delta_\alpha L)^2}$$

$(\alpha = e, o)$

Paramètres de répartition



$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B & C & D \\ B & A & D & C \\ C & D & A & B \\ D & C & B & A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{pmatrix}$$

Sortie = [S] . Entrée

MODES PAIRS (e) :

$$a_1 = +a_3, \quad a_2 = +a_4$$

MODES IMPAIRS (o) :

$$a_1 = -a_3, \quad a_2 = -a_4$$

$$\begin{pmatrix} b_{e1} \\ b_{e2} \\ b_{o1} \\ b_{o2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A+C & B+D & 0 & 0 \\ B+D & A+C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A-C & B-D \\ 0 & 0 & B-D & A-C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{e1} \\ a_{e2} \\ a_{o1} \\ a_{o2} \end{pmatrix}$$

Découplage pair/impair \Rightarrow **Identification couplonique**
équivalence formelle EXACTE entre les configurations discrète et continue
 (1 octopôle = 1 quadripôle pair + 1 quadripôle impair)

Équivalence couplonique

Constante de couplage

$$\kappa_\alpha \Lambda = -i \frac{\eta}{\text{sh } \eta} m_{12}^\alpha$$

Désaccord de phase

$$\delta_\alpha \Lambda = i \frac{\eta}{\text{sh } \eta} \left(\frac{m_{11}^\alpha - m_{22}^\alpha}{2} \right)$$

Par identification terme à terme $\{\alpha = e, o\}$

Paramètres équivalents du coupleur discret

Quanta élémentaires de désaccord ou de couplage

$$\delta\Lambda = \frac{\delta_e \Lambda + \delta_o \Lambda}{2}$$

$$\kappa\Lambda = \frac{\kappa_e \Lambda + \kappa_o \Lambda}{2}$$

$$\chi\Lambda = \frac{\delta_e \Lambda - \delta_o \Lambda}{2}$$

$$\xi\Lambda = \frac{\kappa_e \Lambda - \kappa_o \Lambda}{2}$$

Les “**couplons**” co- et contra-directionnels ($\chi\Lambda$, $\kappa\Lambda$, $\xi\Lambda$) peuvent s’interpréter comme les **quanta de couplage normalisé** [$\delta\Lambda$ de **désaccord normalisé**] à l’échelle d’une maille élémentaire, indépendamment de la nature, des dimensions ou du contenu de cette dernière. Ceci rend manifeste la **dualité fondamentale** entre les configurations **discrète** et **continue**. La réponse d’un coupleur périodique symétrique peut toujours s’exprimer comme la combinaison linéaire des fonctions de transfert paire/impair, toutes deux déterminées analytiquement.

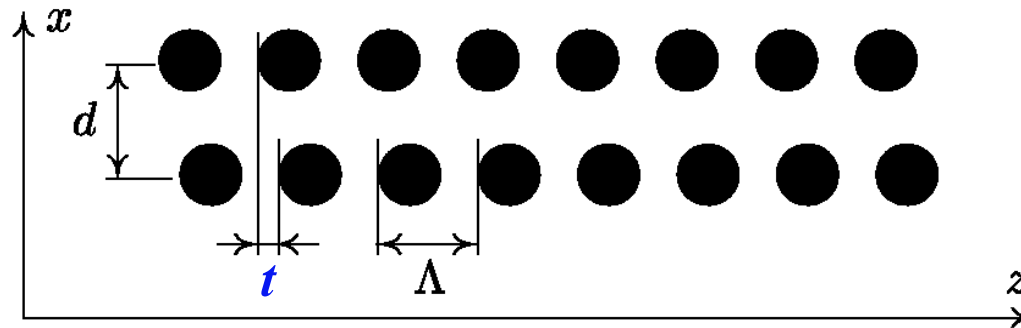
Conclusions

Démarche analytique en coordonnées normalisées
Réponses universelles d'un réflecteur périodique
Identification formelle des quanta de couplage
Quantification du continu, distribution du discret
« Dualité continuum-granuscule »
Extension 2D et synthèse de dispositifs...

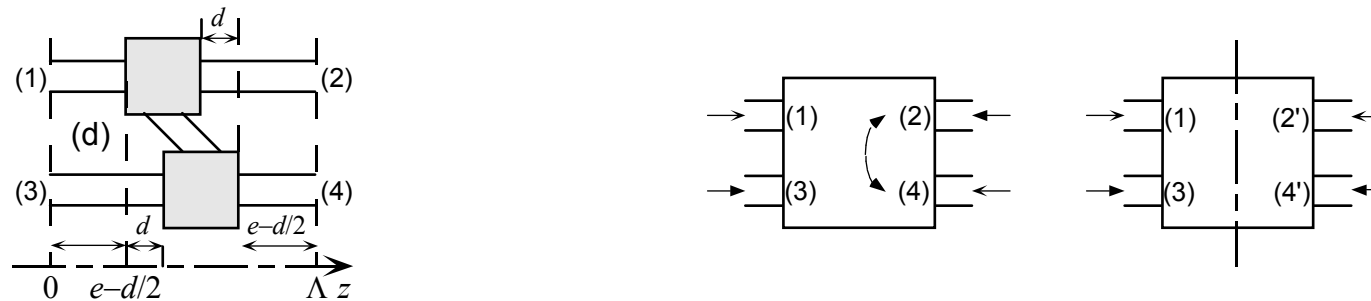
Initialement considérés comme approximatifs, les paramètres $(\kappa\Lambda, \delta\Lambda, \chi\Lambda, \xi\Lambda)$ s'avèrent bien plus rigoureux qu'escompté. Y compris dans des systèmes périodiques de dimension $D > 1$, la **COUPLONIQUE** constitue un outil conceptuel élégant, précis et universel pour la modélisation des cristaux photoniques (soniques, électroniques...) de taille finie.

4. Guides d'ondes décalés

En collaboration avec Andrei V. Lavrinenko (COM-DTU, Université Technique du Danemark) et Dmitri N. Chigrin (Physikalishes Institut, Université de Bonn)



Symétrisation de la maille élémentaire (translation + permutation)



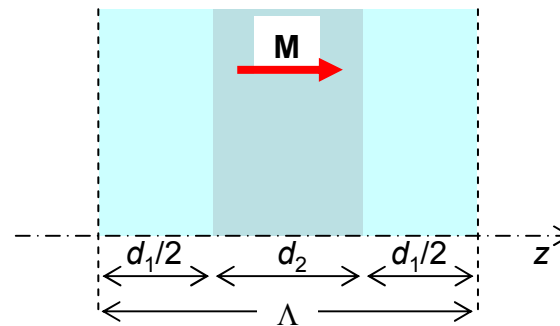
cf. [Y.G. Boucher, A.V. Lavrinenko, D.N. Chigrin, *Out-of-phase Coupled Periodic Waveguides: a “couplonic” approach*, Optical and Quantum Electron., Vol. 39 \(10-11\), 2007.](#)

Cristal magnéto-photonique

En collaboration avec Florian Bentivegna (Lab-STICC/ENIB) et Igor L. Lyubchanskii (Institut Physico-Chimique de Donetsk, Ukraine)

Maille élémentaire bicouche :
matériau bigyrotropique / milieu isotrope

Sous incidence arbitraire, les modes *lent* et *rapide* du milieu bigyrotropique se couplent par réflexion aux interfaces.



$$[\varepsilon] = \begin{pmatrix} \varepsilon_2 & i\varepsilon_a & 0 \\ -i\varepsilon_a & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{//} \end{pmatrix}$$

$$[\mu] = \begin{pmatrix} \mu_2 & i\mu_a & 0 \\ -i\mu_a & \mu_2 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{//} \end{pmatrix}$$

Opérateur symétrique, mais
(probablement) non réciproque :

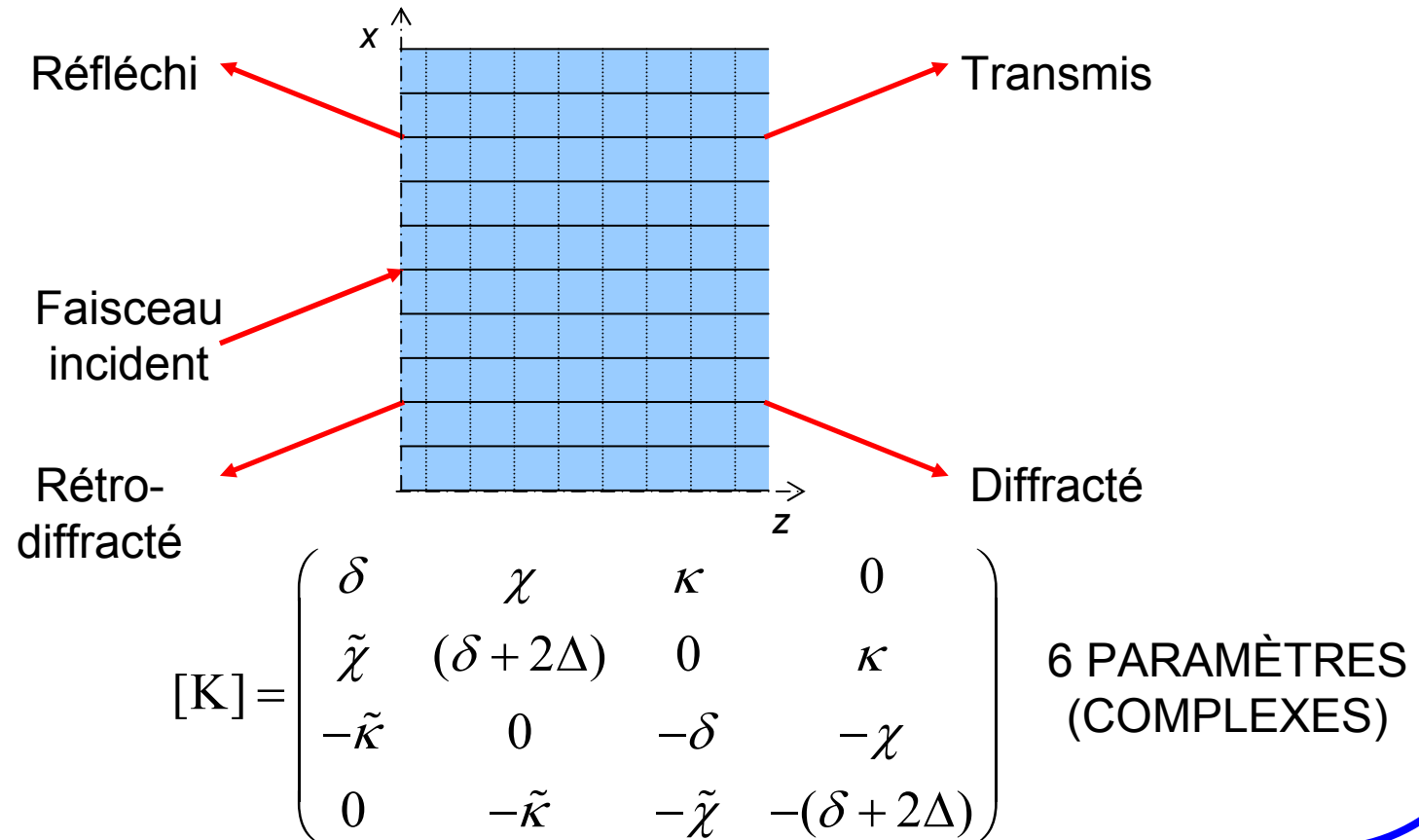
$$[\mathbf{K}] = \begin{pmatrix} \delta_1 & \chi_{12} & \kappa_1 & \xi_{12} \\ \chi_{21} & \delta_2 & \xi_{21} & \kappa_2 \\ -\kappa_1 & -\xi_{12} & -\delta_1 & -\chi_{12} \\ -\xi_{21} & -\kappa_2 & -\chi_{21} & -\delta_2 \end{pmatrix}$$

cf. Y.G. Boucher, F.F.L. Bentivegna, I.L. Lyubchanskii, A “couplonic” approach to multilayer magneto-photonic crystals, Physica Status Solidi (a), vol. 205 (8), 2008

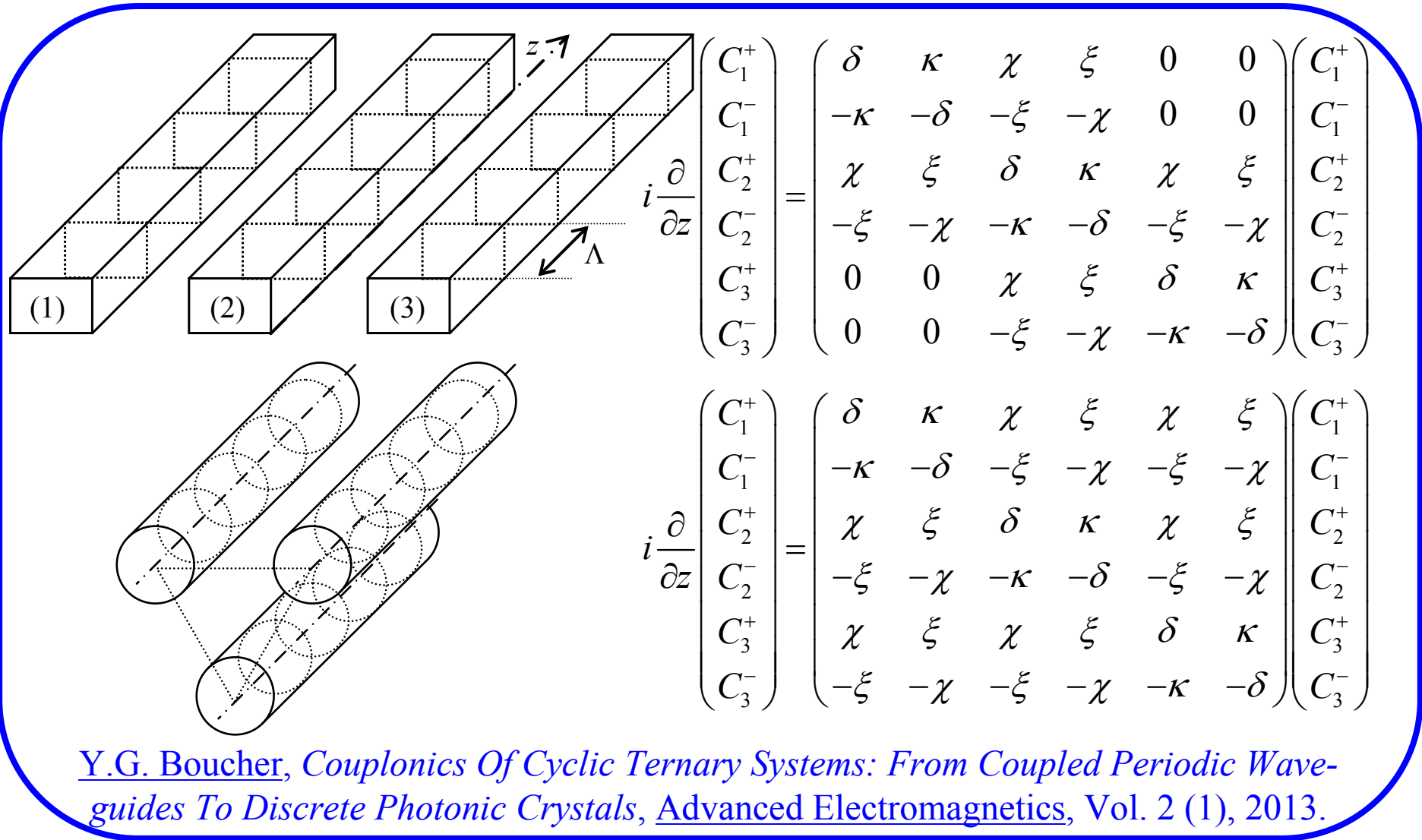
Hologramme 2D actif

Thèse de Deka Moussa Djama (2013), dirigée par Florian Bentivegna, en collaboration avec Tigran Galstian (COPL, Université Laval, Canada)

Hologramme 2D à modulation croisée de phase et d'amplitude (gain).



Systemes ternaires



The figure illustrates two types of ternary systems. The top part shows three rectangular waveguides labeled (1), (2), and (3) arranged in a row, with a coordinate system z and a coupling parameter Λ . The bottom part shows two cylindrical waveguides with overlapping cross-sections.

The coupled mode equations for the rectangular waveguides are:

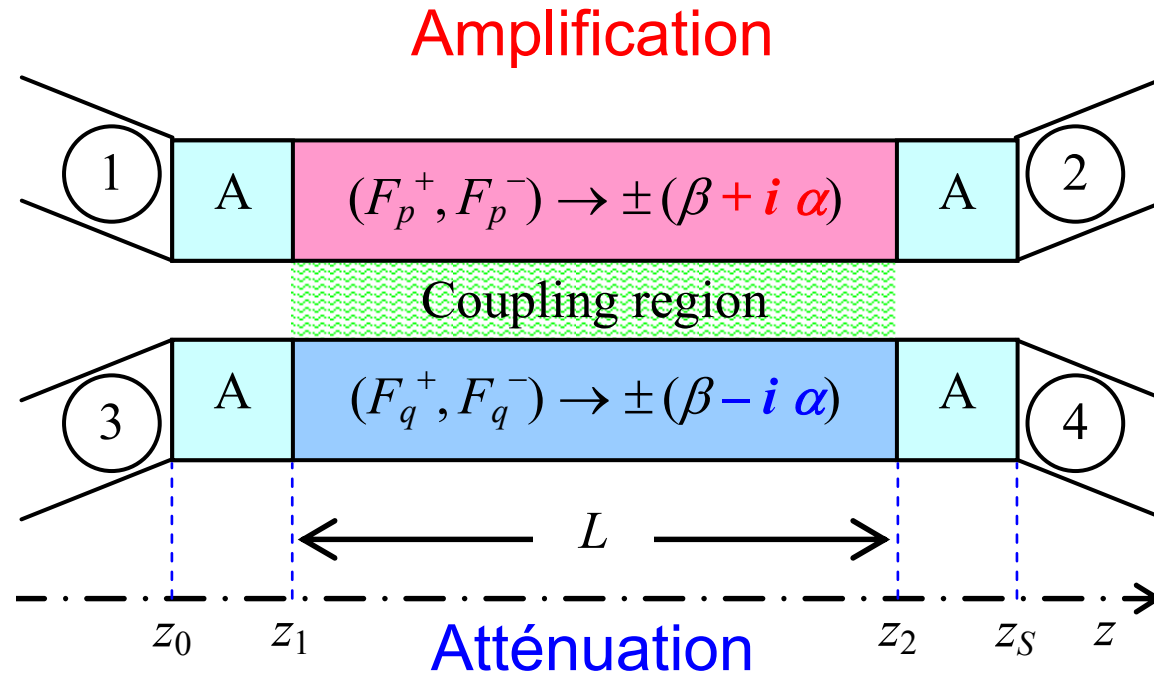
$$i \frac{\partial}{\partial z} \begin{pmatrix} C_1^+ \\ C_1^- \\ C_2^+ \\ C_2^- \\ C_3^+ \\ C_3^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta & \kappa & \chi & \xi & 0 & 0 \\ -\kappa & -\delta & -\xi & -\chi & 0 & 0 \\ \chi & \xi & \delta & \kappa & \chi & \xi \\ -\xi & -\chi & -\kappa & -\delta & -\xi & -\chi \\ 0 & 0 & \chi & \xi & \delta & \kappa \\ 0 & 0 & -\xi & -\chi & -\kappa & -\delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1^+ \\ C_1^- \\ C_2^+ \\ C_2^- \\ C_3^+ \\ C_3^- \end{pmatrix}$$

The coupled mode equations for the cylindrical waveguides are:

$$i \frac{\partial}{\partial z} \begin{pmatrix} C_1^+ \\ C_1^- \\ C_2^+ \\ C_2^- \\ C_3^+ \\ C_3^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta & \kappa & \chi & \xi & \chi & \xi \\ -\kappa & -\delta & -\xi & -\chi & -\xi & -\chi \\ \chi & \xi & \delta & \kappa & \chi & \xi \\ -\xi & -\chi & -\kappa & -\delta & -\xi & -\chi \\ \chi & \xi & \chi & \xi & \delta & \kappa \\ -\xi & -\chi & -\xi & -\chi & -\kappa & -\delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1^+ \\ C_1^- \\ C_2^+ \\ C_2^- \\ C_3^+ \\ C_3^- \end{pmatrix}$$

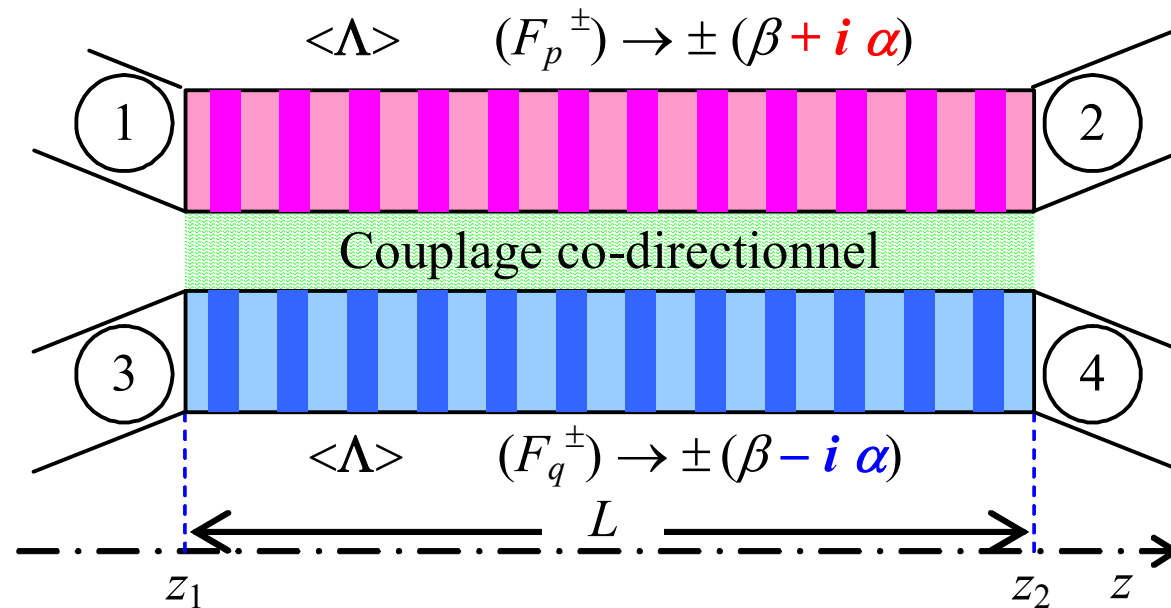
Y.G. Boucher, Couplonics Of Cyclic Ternary Systems: From Coupled Periodic Waveguides To Discrete Photonic Crystals, Advanced Electromagnetics, Vol. 2 (1), 2013.

Coupleur PTS en cavité FP



Cf. Y.G. Boucher & P. Féron, Mode Coupling and Scattering Parameters in a Parity-Time Symmetric Resonant Integrated Coupler, IEEE J. Quantum Electron. Vol. 54 (1), Feb. 2018.

Coupleur PTS en cavité distribuée



Cf. Y.G. Boucher & P. Féron, *Parity-Time Symmetry in Laterally Coupled Bragg Waveguides*, IEEE J. Quantum Electron. Vol. 55 (6), Dec. 2019.

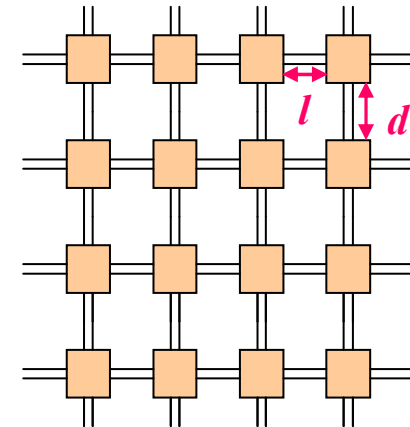
Photonique discrète

$$i \frac{\partial}{\partial z} \begin{bmatrix} A_1^+ \\ A_1^- \\ A_2^+ \\ A_2^- \\ A_3^+ \\ A_3^- \\ A_4^+ \\ A_4^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta & \kappa & \chi & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\kappa^* & -\delta & 0 & -\chi & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \chi & 0 & \delta & \kappa & \chi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\chi & -\kappa^* & -\delta & 0 & -\chi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \chi & 0 & \delta & \kappa & \chi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\chi & -\kappa^* & -\delta & 0 & -\chi \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \chi & 0 & \delta & \kappa \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\chi & -\kappa^* & -\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1^+ \\ A_1^- \\ A_2^+ \\ A_2^- \\ A_3^+ \\ A_3^- \\ A_4^+ \\ A_4^- \end{bmatrix}$$

4 guides
3 guides
2 guides

Laurence Le Floc'h,
Cristaux électromagnétiques 2D discrets,
Thèse Brest, 2005.

($\xi = 0$)



Équivalence formelle avec un réseau d'octopôles interconnectés par des portions de ligne de transmission : sous-classe de Cristaux Photoniques Discrets (2D)

Voir aussi Belabas et al. (LPN/C2N), travaux sur la *Guidonique* et les réseaux de guides couplés

Voir aussi Feigenbaum et al., *Resonant Guided Wave Networks*, PRL 104, 147402 (2010)