

Habilitation à diriger des recherches
de l'Université de Franche-Comté, Besançon

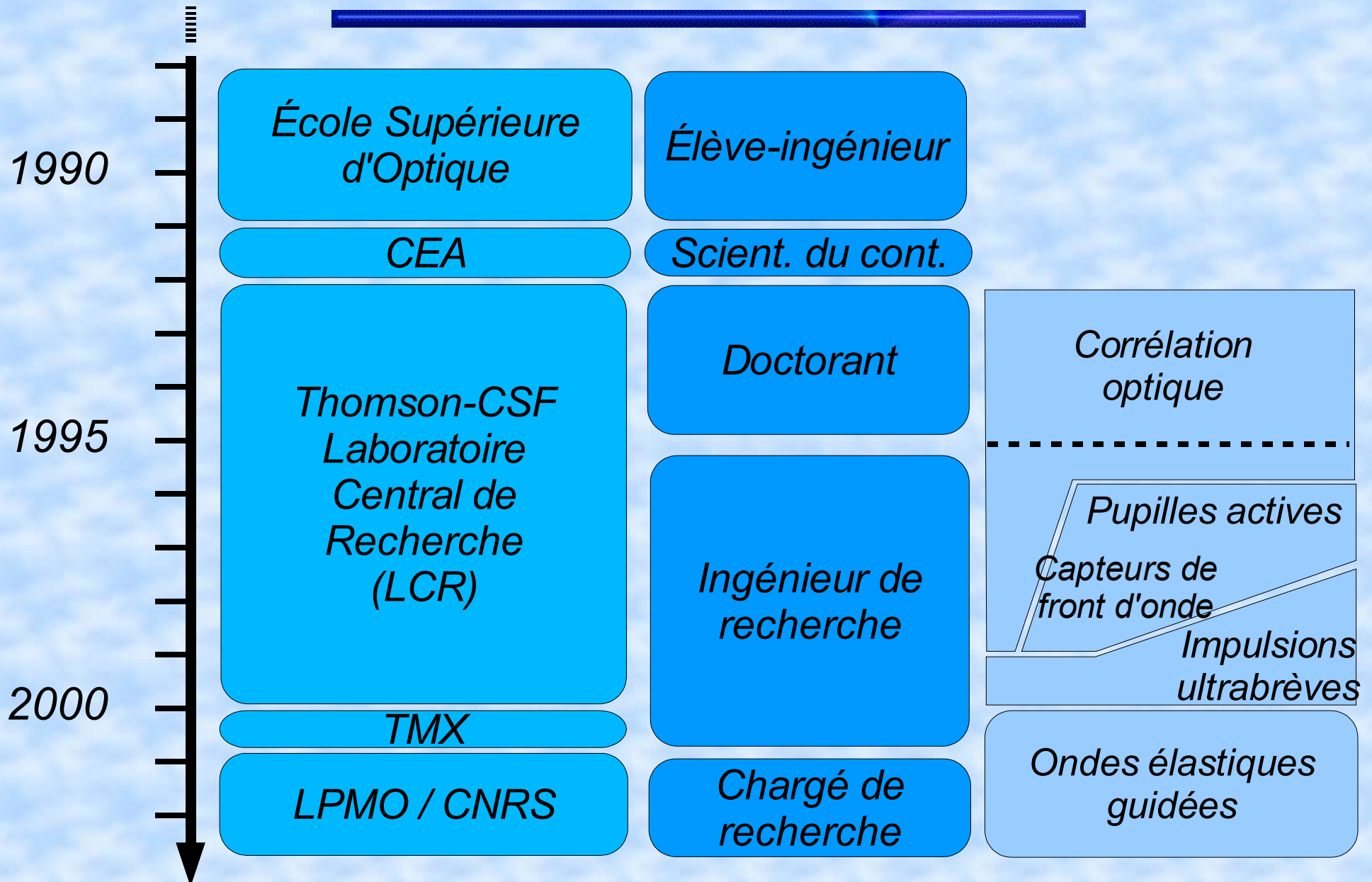
Contributions au
traitement optique de l'information
et aux
ondes élastiques guidées

Vincent Laude

25 septembre 2002

Introduction

Curriculum



- Résumé de la thèse (corrélation optique)
- Travaux post-doctoraux
 - Corrélation optique
 - Modulateurs spatiaux de lumière
 - Impulsions laser ultrabrèves
 - Ondes élastiques guidées
- Encadrement
- Enseignement
- Perspectives

- Opération de corrélation

- $$c(n) = \sum_{m=1}^N f^*(m)g(m+n)$$

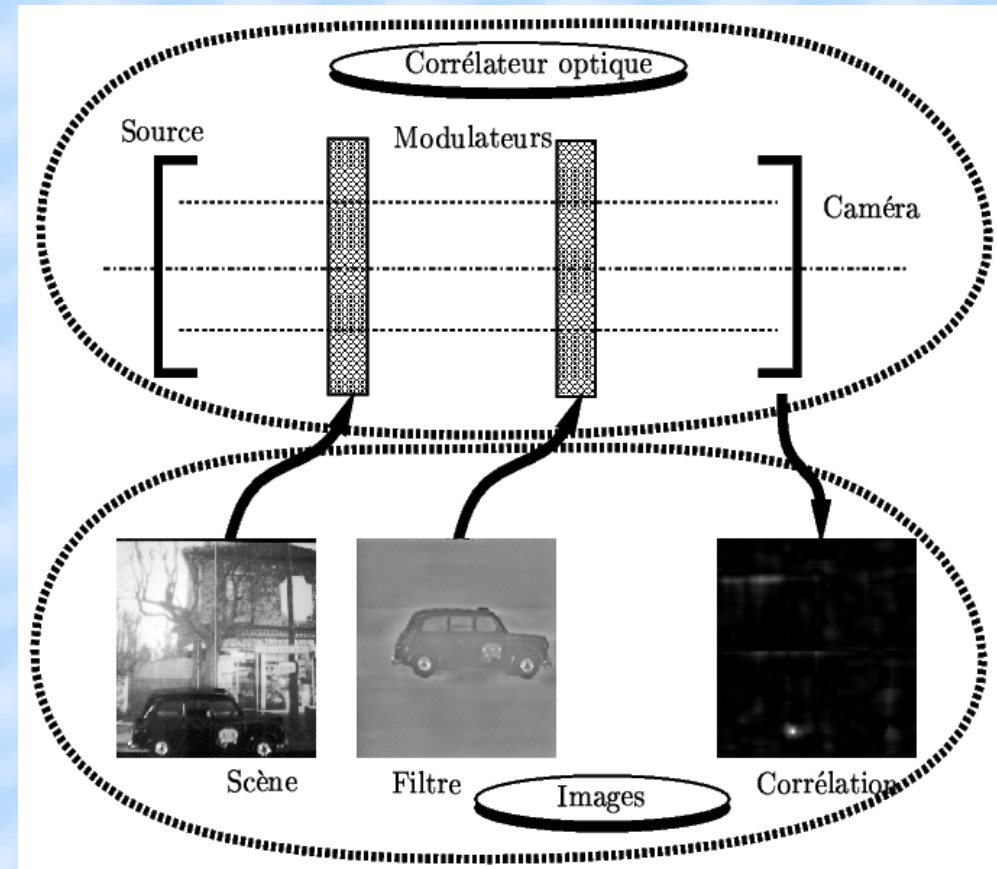
- $$\tilde{c}(k) = \tilde{f}^*(k)\tilde{g}(k)$$

- Traitement du signal

- ➔ Traitement des images
- ➔ Estimation de paramètres (opérateur de localisation)

- Problématique de la thèse

- Étude de la corrélation incohérente bas-coût
- Optimisation des filtres en fonction des modulateurs spatiaux de lumière

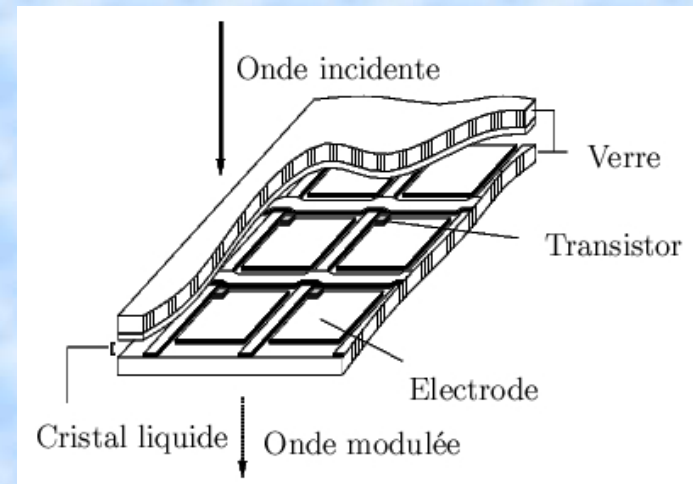


- Écrans à cristaux liquides

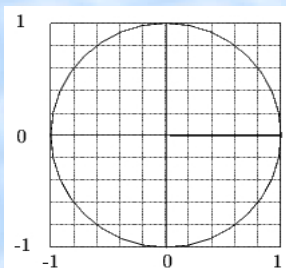
- Affichage des images
- Pixels indépendants
- VGA : 640 X 480 pixels

- Domaine de codage

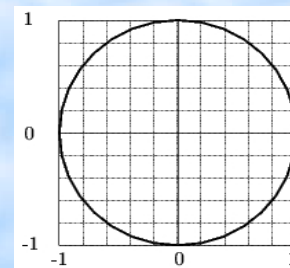
- Définition : ensemble des valeurs complexes de transmission d'un pixel (fonction du niveau de gris)



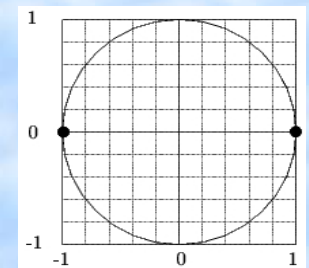
*Amplitude
pure*



*Phase
pure*



Binaire



➔ V. Laude, S. Mazé, P. Chavel et Ph. Réfrégier, *Opt. Commun.* **103**, 33-38 (1993).

➔ Ph. Réfrégier et V. Laude, *JOSA A* **12**, 1338-1345 (1995).

- Algorithme donnant les filtres optimaux
 - ➔ V. Laude et Ph. Réfrégier, Applied Optics **33**, 4465-4471 (1994).
 - Réalisant un compromis optimal entre critères (robustesse, discrimination, efficacité optique)
 - Affichés dans l'espace de Fourier sur un MSL
- Travaux sur les filtres non linéaires
 - Filtres non linéaires optimaux
 - ➔ Ph. Réfrégier, B. Javidi et V. Laude, Optics Letters **19**, 405-407 (1994).
 - Propriétés des filtres non linéaires optimaux
 - ➔ Ph. Réfrégier, V. Laude et B. Javidi, Applied Optics **34**, 3915-3923 (1995).

- Retour sur une architecture de corrélation incohérente, connue pour être :
 - de bas coût (source blanche)...
 - ... mais peu discriminante
 - ... et de résolution limitée par diffraction
- Améliorations apportées
 - Représentation bipolaire optimale des filtres : très bonnes propriétés de robustesse / discrimination
 - ➔ V. Laude, P. Chavel et Ph. Réfrégier, Applied Optics **35**, 5267-5274 (1996).
 - Étude détaillée de la diffraction (perte de résolution) et simulation précise du corrélateur : optimisation du corrélateur
 - ➔ V. Laude, Optics Communications **138**, 394-402 (1997).

Travaux post-doctoraux

Corrélation optique

*Modulateurs spatiaux
de lumière*

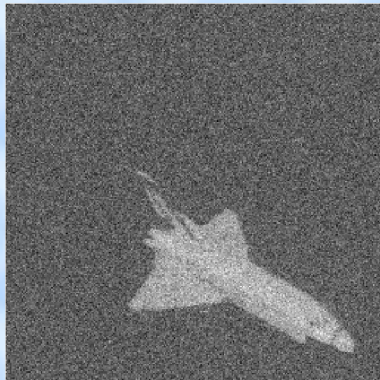
*Impulsions optiques
ultrabrèves*

*Ondes élastiques
guidées*

- *Implantation optique
des filtres de corrélation*
- *Études théoriques*
 - *Approche bayésienne*

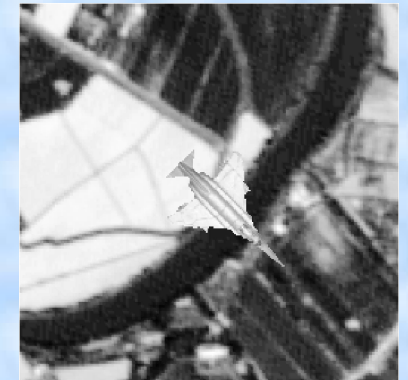
- Filtres non-linéaires optimaux pour la corrélation conjointe
 - ➔ Thèse de doctorat de Jérôme Colin
 - ➔ J. Colin, N. Landru, V. Laude, S. Breugnot, H. Rajbenbach et J.-P. Huignard, JEOS A **1**, 283-285 (1999).
- Implantations sous-optimales rapides
 - Approximation des filtres à compromis optimaux par convolution avec un noyau
 - ➔ A. Grunnet-Jepsen, S. Tonda et V. Laude, Applied Optics **35**, 3874-3879 (1996).
 - Estimation adaptative de la densité spectrale de l'image d'entrée
 - ➔ V. Laude, A. Grunnet-Jepsen et S. Tonda, Optical Engineering **38**, 672-676 (1999).

- Résistance de la corrélation linéaire au bruit non recouvrant



← *Bruit recouvrant*

Bruit non recouvrant →



→ F. Goudail, V. Laude et Ph. Réfrégier, *Optics Letters* **20**, 2237-2239 (1995).

- Corrélation non-linéaire pour la poursuite
 - Intégration dans un algorithme de type Kalman (estimation – prédiction) pour suivre une cible dans une séquence d'images
- Approche bayésienne pour la corrélation

→ V. Laude et S. Formont, *Optical Engineering* **36**, 2649-2659 (1997).

- Formule de Bayes

- Paramètre : θ
- Mesure : V

$$p(\theta|V) = \frac{p(\theta)}{p(V)} p(V|\theta)$$

Probabilité a posteriori Probabilités a priori Modèle de mesure

- Formuler des modèles d'images ; déterminer les estimateurs du *maximum à posteriori* (MAP)

- Modèles paramétriques d'images

- Bruit recouvrant (additif)
- Bruit non recouvrant
- Illumination (contraste)
- Discrimination d'objets connus



- Procédure : intégration des paramètres de nuisance (apparaissant dans le modèle, mais non estimés)
 - Densités de probabilité choisies gaussiennes ou uniformes
- Résultats
 - La corrélation est optimale pour la localisation dans un bruit additif
 - Illumination inconnue : combinaison de la corrélation et de son carré
 - Discrimination : filtres à compromis optimaux
 - Bruit non recouvrant : généralisation du « receveur optimal » de Javidi et Réfrégier

Travaux post-doctoraux

Corrélation optique

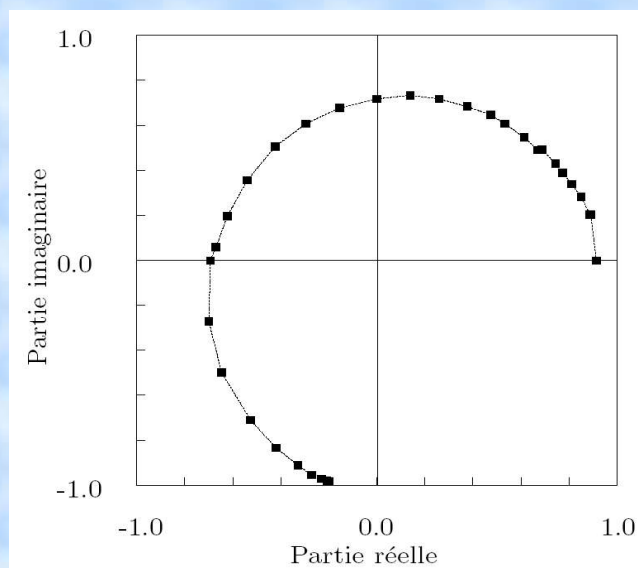
*Modulateurs spatiaux
de lumière*

*Impulsions optiques
ultrabrèves*

*Ondes élastiques
guidées*

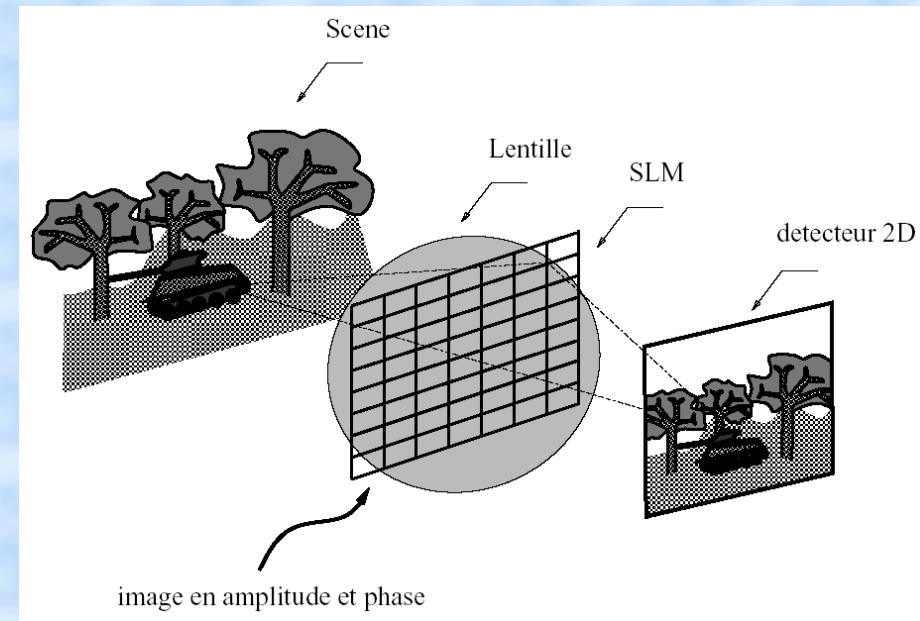
- *Domaines de codage*
- *Systèmes optiques à pupille active*
 - *Exemples*
- *Capteur de front d'onde*
 - *Illustration*

- Procédure de mesure du domaine de codage
 - ➔ V. Laude, Optics Communications 153, 134-152 (1998).
 - Modulation de phase par mire de Ronchi affichée sur le MSL
 - Estimation de la matrice de Jones
 - Forme paramétrique théorique de la matrice de Jones
 - Mesures redondantes : robustesse de l'estimation



*Configuration optimale
de quasi-phase pour un
MSL VGA Epson*

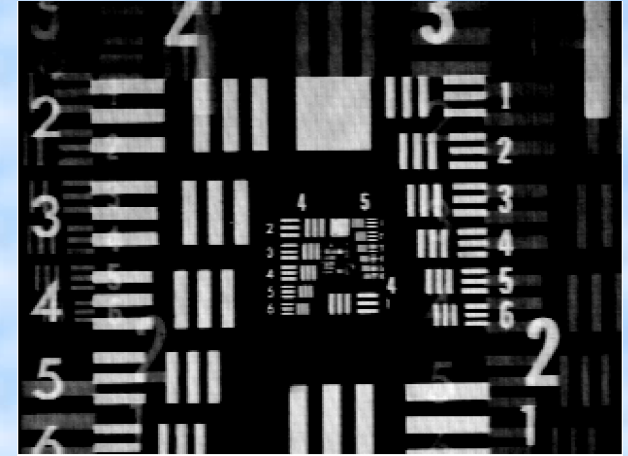
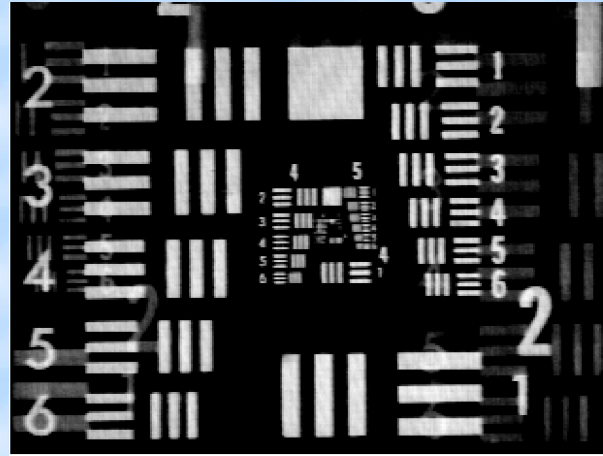
- Principe de la pupille active
 - La formation d'image d'un système optique est imposée par la fonction pupille, grandeur scalaire à valeurs complexes
 - Un MSL permet de modifier à volonté la fonction de transfert



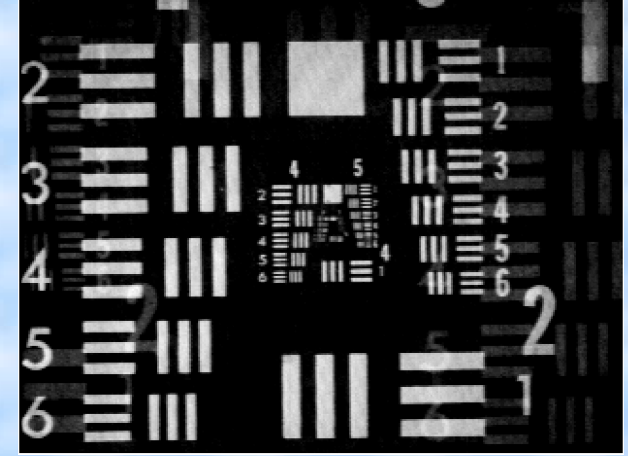
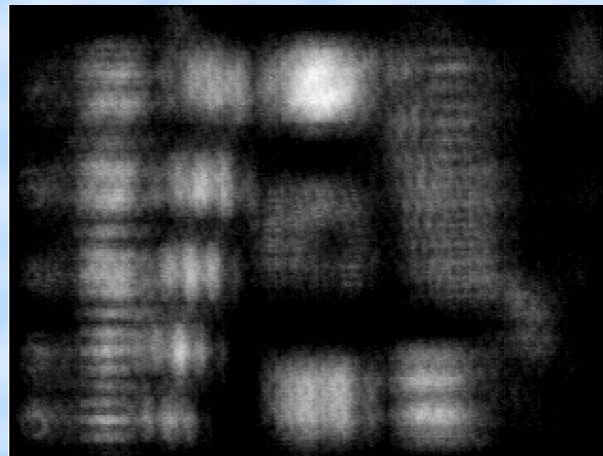
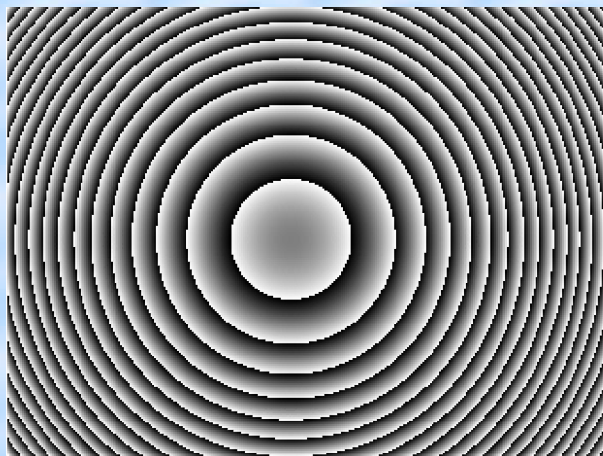
→ V. Laude, Optics Communications 153, 134-152 (1998).

- Effets limitants
 - Pixélisation (échantillonnage) : limitation du champ
 - Quantification (projection sur le domaine de codage) : fantômes

- Fonction prisme, ou translation de l'image



- Fonction lentille, ou focalisation de l'image



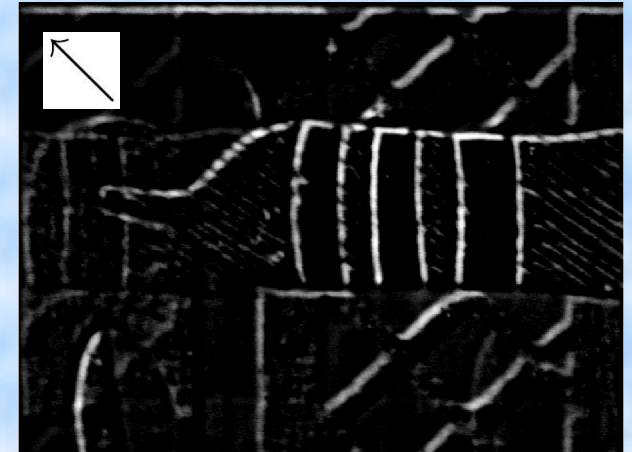
- Traitement optique (programmable) des images



Image originale



Contours 80 μm



Contours 80 μm

→ V. Laude, C. Dirson, D. Delautre, S. Breugnot et J.-P. Huignard, SPIE Optical Engineering Press **CR74**, (SPIE, 1999).

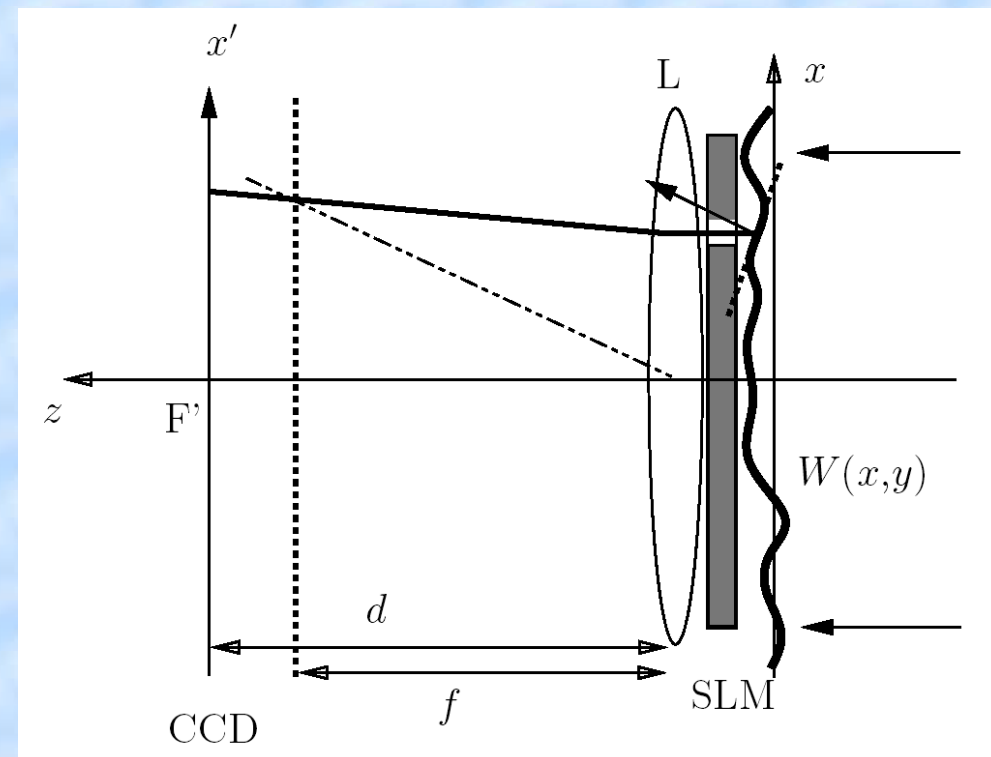
- Microbalayage d'un capteur matriciel

→ V. Laude et C. Dirson, Optics Communications **163**, 72-78 (1999).

- Caractérisation (spatiale) de la détection hétérodyne

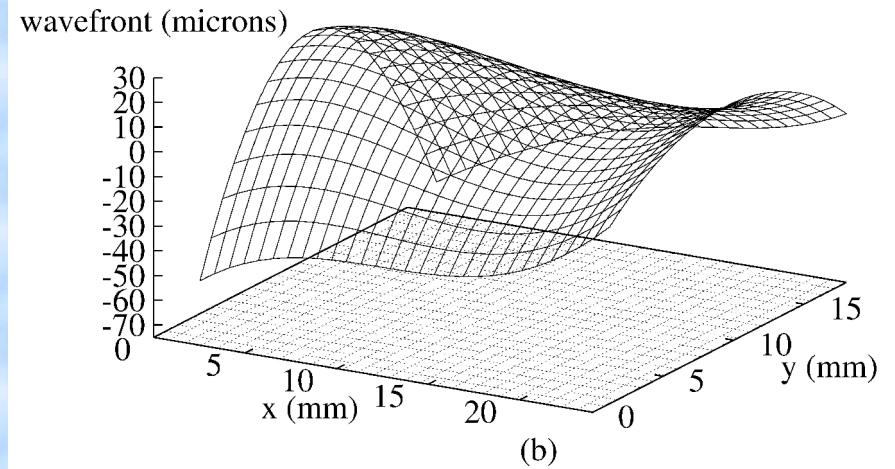
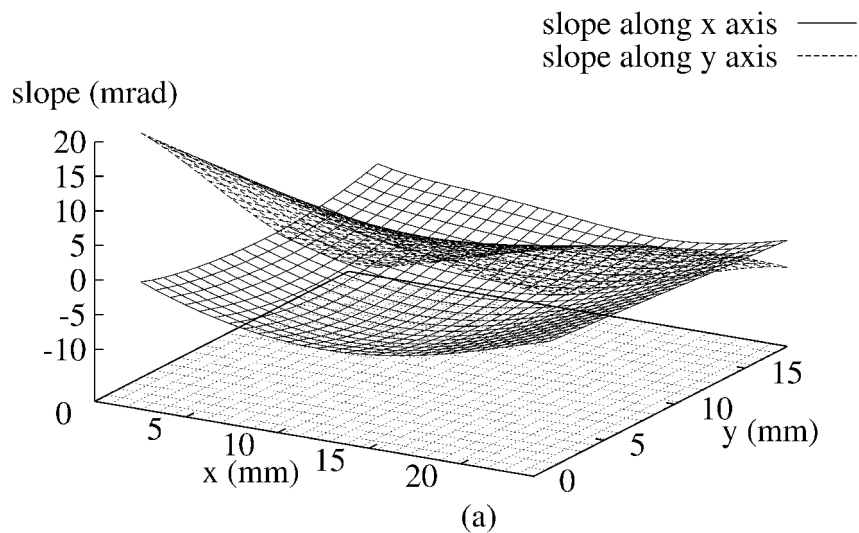
→ D. Delautre, S. Breugnot et V. Laude, Optics Communications **160**, 61-65 (1999).

- Capteur de front d'onde
 - Multiplication par une fonction connue et intégration
 - Valeur locale d'une dérivée
- Principe du *Hartmann wavefront scanner*
 - Masque binaire programmable sur le SLM
 - ➔ V. Laude, S. Olivier, C. Dirson et J.-P. Huignard, *Opt. Lett.* **24**, 1796-1798 (1999).
 - ➔ S. Olivier, V. Laude et J.-P. Huignard, *Appl. Opt.* **39**, 3838-3846 (2000).



- Reconstruction du front d'onde
 - Représentation du front d'onde sur la base des polynômes de Legendre
 - Estimation des coefficients par minimisation des moindres carrés
- Résultats pratiques
 - Sensibilité proportionnelle à la distance focale : très supérieure au Shack-Hartmann (matrice de micro-lentilles)
 - Exemple pour $\Phi=20$ mm, 32 X 32 points d'acquisition
 - ➔ Sensibilité pour un tilt (prisme) : 0.2 μ rad
 - ➔ Sensibilité pour une courbure (lentille) : < 1 nm rms
 - Fonctionnement séquentiel : pas de temps réel

- Exemple de mesure
 - Lentille de vue à foyer variable



Travaux post-doctoraux

Corrélation optique

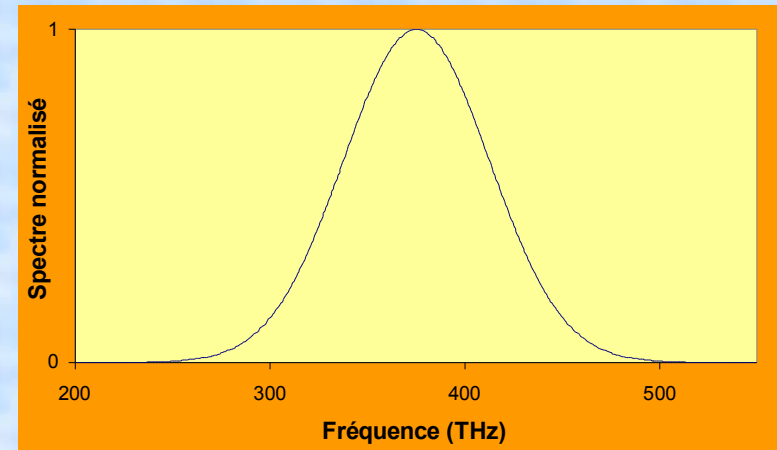
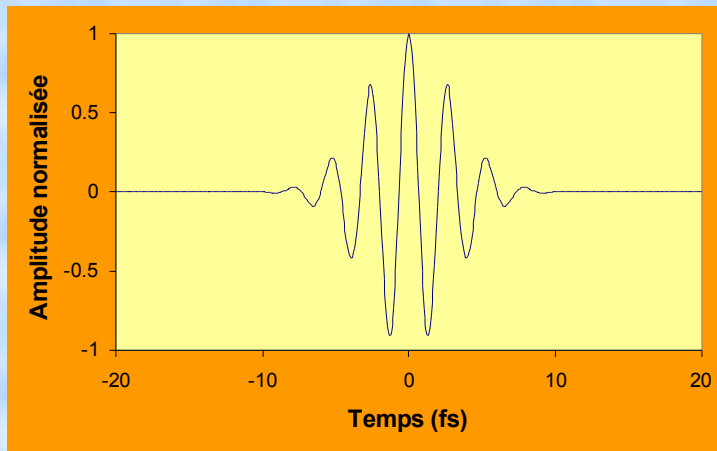
*Modulateurs spatiaux
de lumière*

*Impulsions laser
ultrabrèves*

*Ondes élastiques
guidées*

- *Temps de groupe superluminaux*
 - *Miroirs diélectriques*
- *Miroirs à dispersion contrôlée*
 - *Conception & mesure*
- *Filtre acousto-optique programmable*

- Impulsion ultrabrève : de qq. fs à qq. 100 fs
 - 1 fs (femtoseconde) = 10^{-15} s
 - Vitesse de la lumière = 300 nm / fs
 - Exemple d'une impulsion gaussienne de 5 fs



- Problématique : aspects temps fréquence
 - Modifier (améliorer) les caractéristiques des impulsions au cours de leur propagation

- Travaux menés avec P. Tournois : tester la causalité
- Vitesse et temps de groupe

- $$E(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2\pi} \int \tilde{E}(\omega) \exp(j(\omega t - \Phi(\omega))) d\omega \quad \Phi(\omega) = \mathbf{k}(\omega) \cdot \mathbf{r}$$

- $$t_g(\omega) = \frac{\partial \Phi(\omega)}{\partial \omega}$$

- $$\bar{t} = \frac{\int t dt |E(\mathbf{r}, t)|^2}{\int dt |E(\mathbf{r}, t)|^2} = \frac{\int t_g(\omega) d\omega |E(\omega)|^2}{\int d\omega |E(\omega)|^2}$$

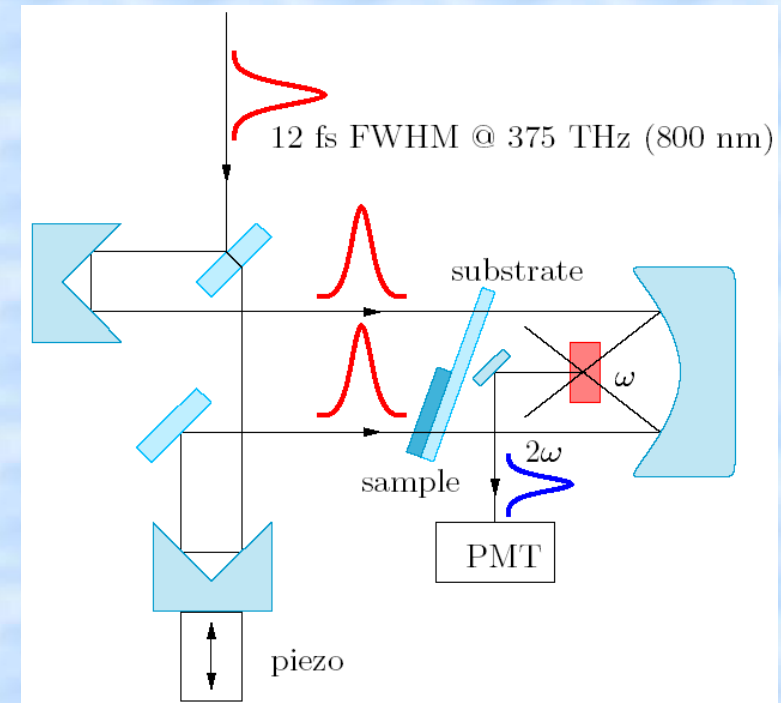
- Guides métal/diélectrique : vitesses de groupe négatives

→ P. Tournois et V. Laude, *Optics Communications* **137**, 41-45 (1997).

- Interféromètres frustrés : temps de groupe négatifs

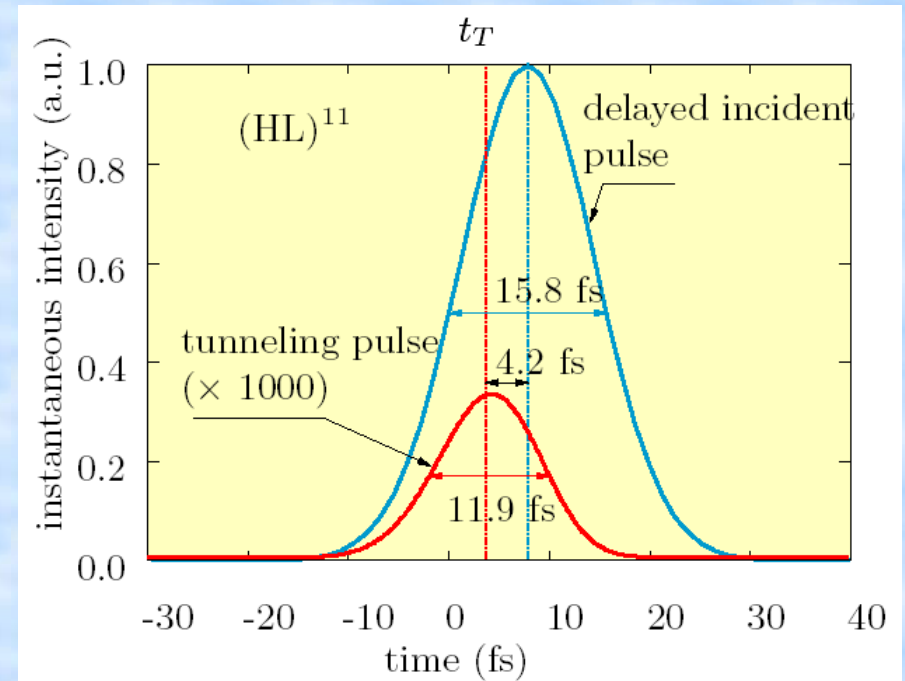
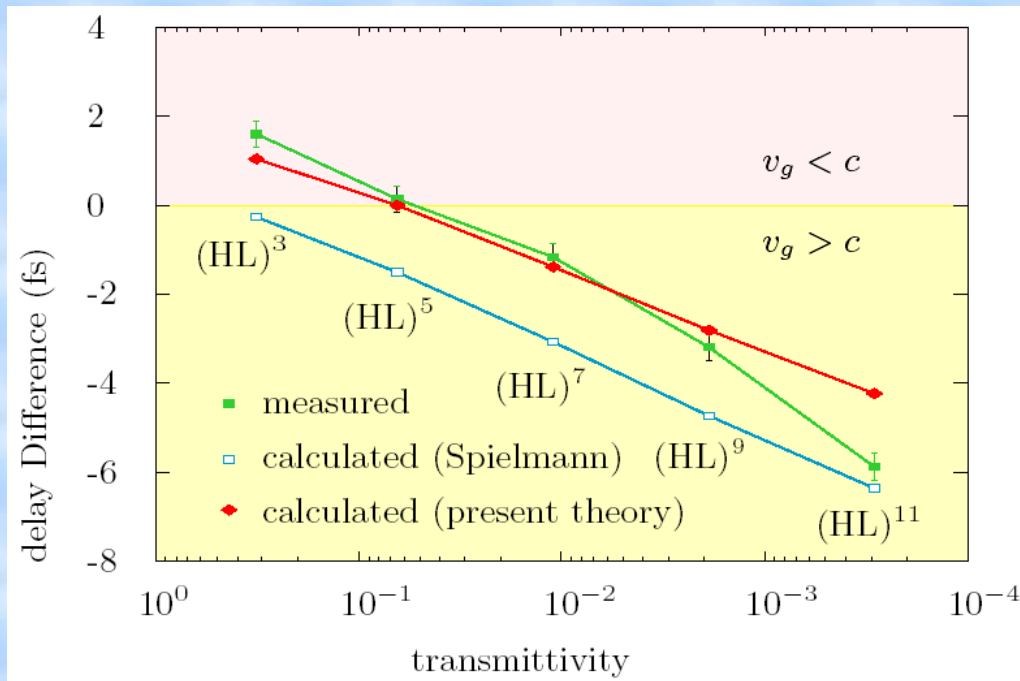
→ V. Laude et P. Tournois, *Laser Optics '98* (Saint Petersburg, 1998).

- Retour sur l'expérience de Spielmann *et al.*
 - Mesure par autocorrélation différentielle
 - Version classique d'une expérience d'optique quantique
 - Le temps de traversée d'un empilement diélectrique quart d'onde (miroir) peut être plus court que le temps équivalent dans le vide
- Valeurs asymptotiques des temps de groupe

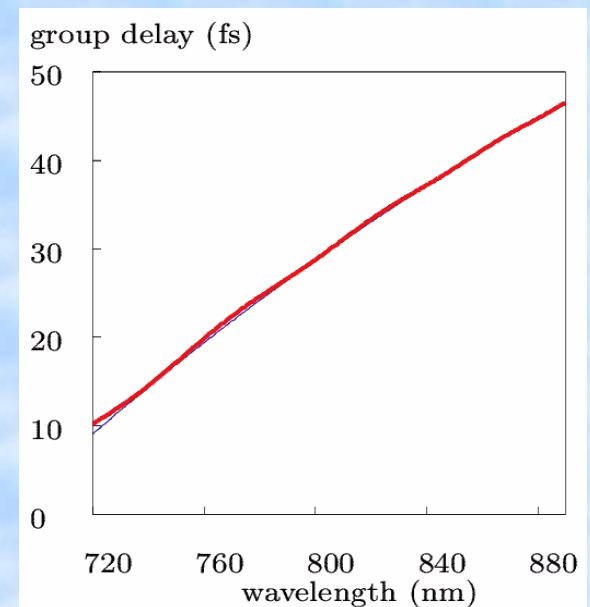
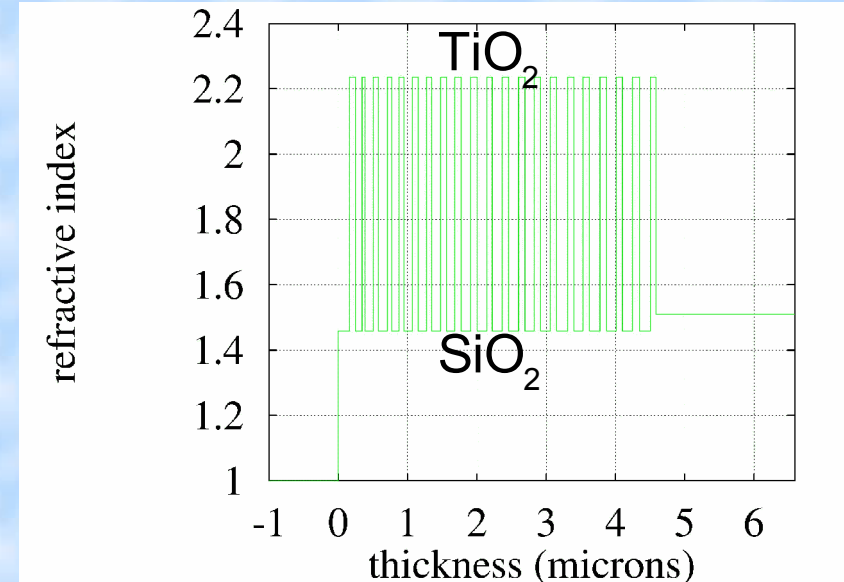


→ V. Laude et P. Tournois, J. Opt. Soc. Am. B **16**, 194-198 (1999).

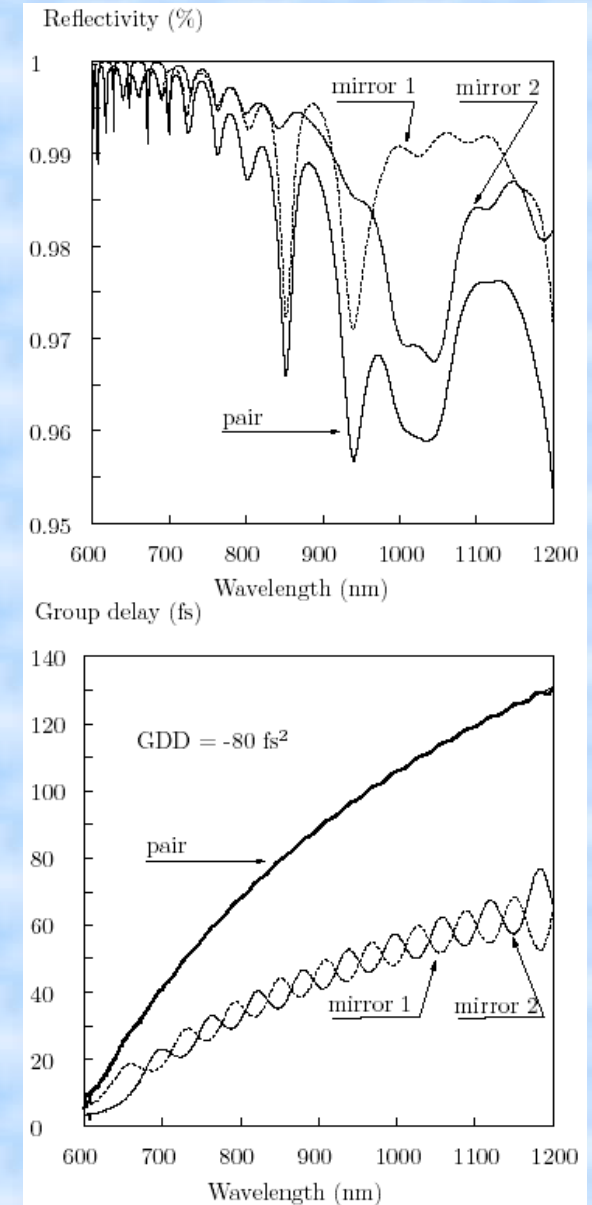
- Comparaison théorie / expérience : meilleur accord
- Explication par l'enveloppe
 - L'impulsion transmise reste dans l'impulsion de référence
 - Violation de la causalité ?



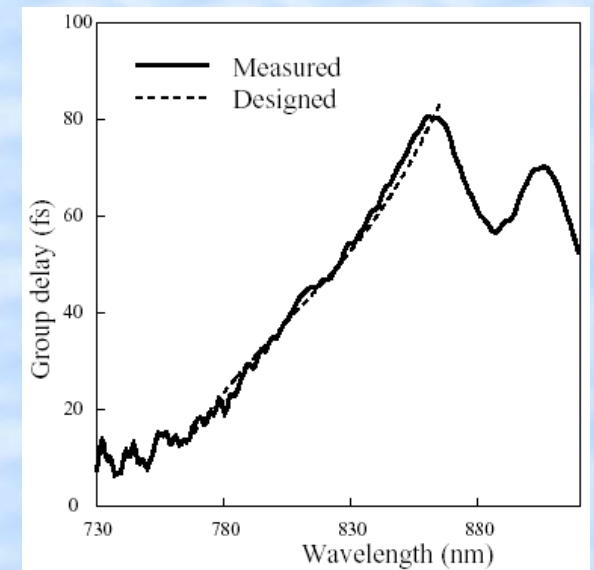
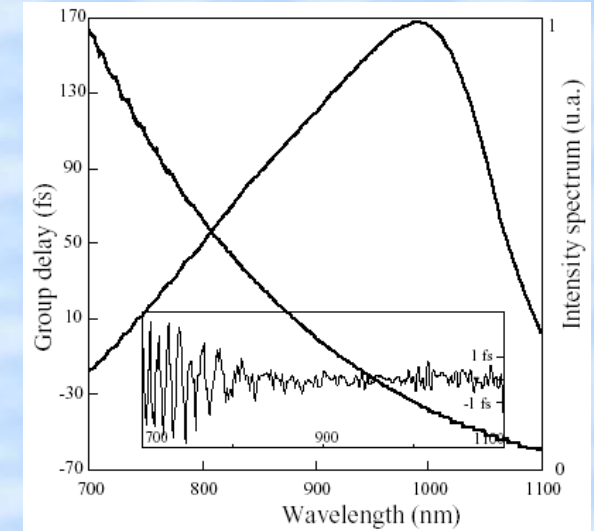
- Principe des MDC
 - Miroirs diélectriques
 - Réflectivité unitaire
 - Loi de temps de groupe imposée
- Utilité
 - Compensation de dispersion dans les oscillateurs femtoseconde (remplacement des prismes)
 - Compression / extension limitée des impulsions : OPA, etc.
- Exemple : oscillateur Ti:Sa
 - Spécification : -75 fs^2



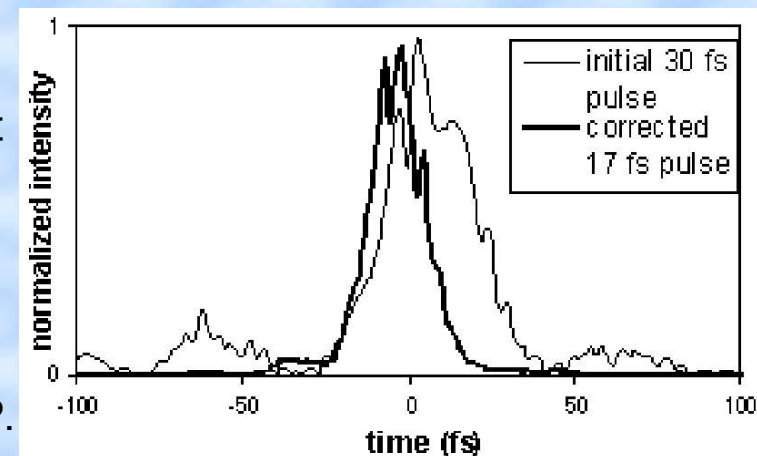
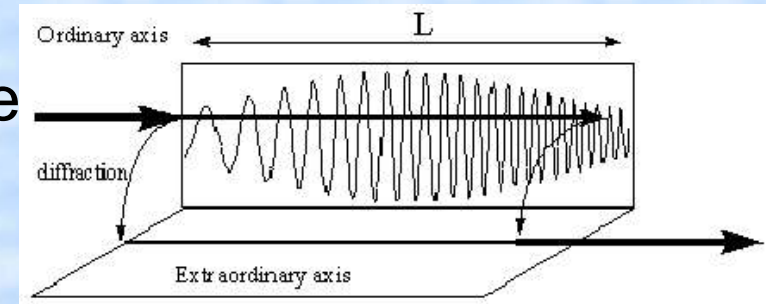
- Optimisation des MDC
 - ➔ V. Laude et P. Tournois, *CLEO' 98*, 156-157 (San Francisco, 1998).
 - Critère de dispersion minimale au second ordre...
 - ...Critère de largeur minimale
 - Recuit simulé : optimisation de l'épaisseur des couches
- Combinaison de miroirs : extension de la bande cible
 - Une octave obtenue avec deux MDC de 60 couches de $\text{SiO}_2 / \text{TiO}_2$
 - ➔ V. Laude et P. Tournois, *CLEO '99*, 187-188 (Baltimore, 1999).



- Mesure de la dispersion des MDC
 - Problème essentiel pour améliorer leur fabrication
 - Difficile car la précision doit être meilleure qu'une femtoseconde
- Intercorrélation interférométrique en lumière blanche
 - ➔ V. Laude, J. Opt. Soc. Am. B **19**, 1001-1008 (2002).
 - Étude précise du bruit : abandon de la DFT, sur-échantillonnage et quadrature de type trapèzes : précision sub-femtoseconde



- Interaction colinéaire
 - Convolution d'une impulsion ultrabrève avec un signal acoustique arbitraire
- Thèse de F. Verluise
 - Coupe très efficace du TeO_2
 - Analyse dans l'approximation de la phase stationnaire
 - ➔ F. Verluise, V. Laude, J.-P. Huignard, P. Tournois et A. Migus, *J. Opt. Soc. Am B* **17**, 138-145 (2000).
 - Démonstration de formage d'impulsion dans une chaîne CPA
 - ➔ F. Verluise, V. Laude, Z. Cheng, Ch. Spielmann et P. Tournois, *Opt. Lett.* **25**, 575-577 (2000).



Travaux post-doctoraux

Corrélation optique

*Modulateurs spatiaux
de lumière*

*Impulsions optiques
ultrabrèves*

*Ondes élastiques
guidées*

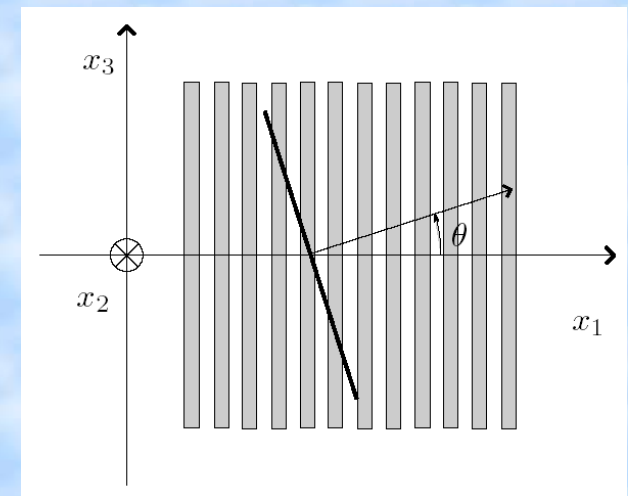
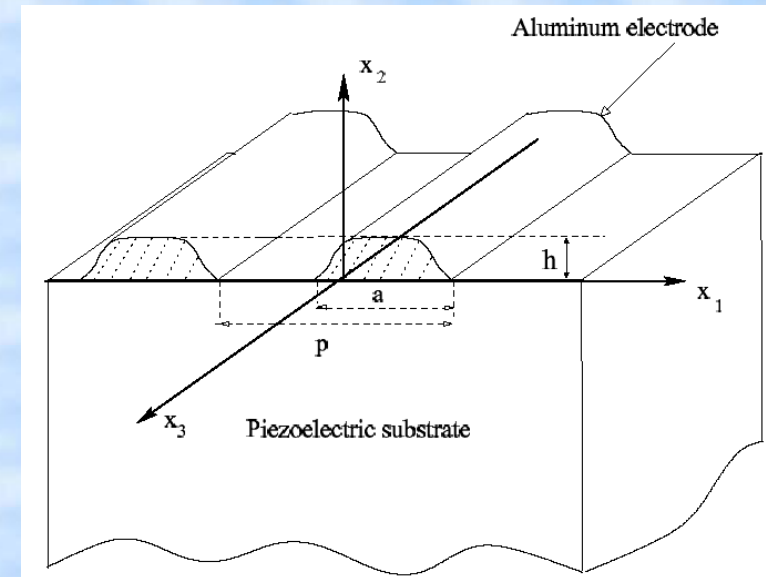
- *Courbes de lenteur*
→ *Illustration*
- *Structures stratifiées*
- *Ondes d'interface*
- *Transducteurs à grand
facteur de forme*
→ *Exemples*

- Ondes élastiques de surface (SAW)
 - Ondes de déplacement et contraintes au sens de l'élasticité
 - Phénomènes semblables à l'optique : diffraction, diffusion, dispersion angulaire et spectrale, etc.
 - Richesses supplémentaires : forte anisotropie, piézoélectricité
- Dispositifs à ondes de surface
 - Filtres dans tous les téléphones portables
 - Capteurs, oscillateurs, etc.
 - Transducteur à peignes interdigités (IDT)
- Problématique de mon travail
 - Propagation des ondes élastiques guidées dans les μ -structures : (matériaux ; structure ; ondes)

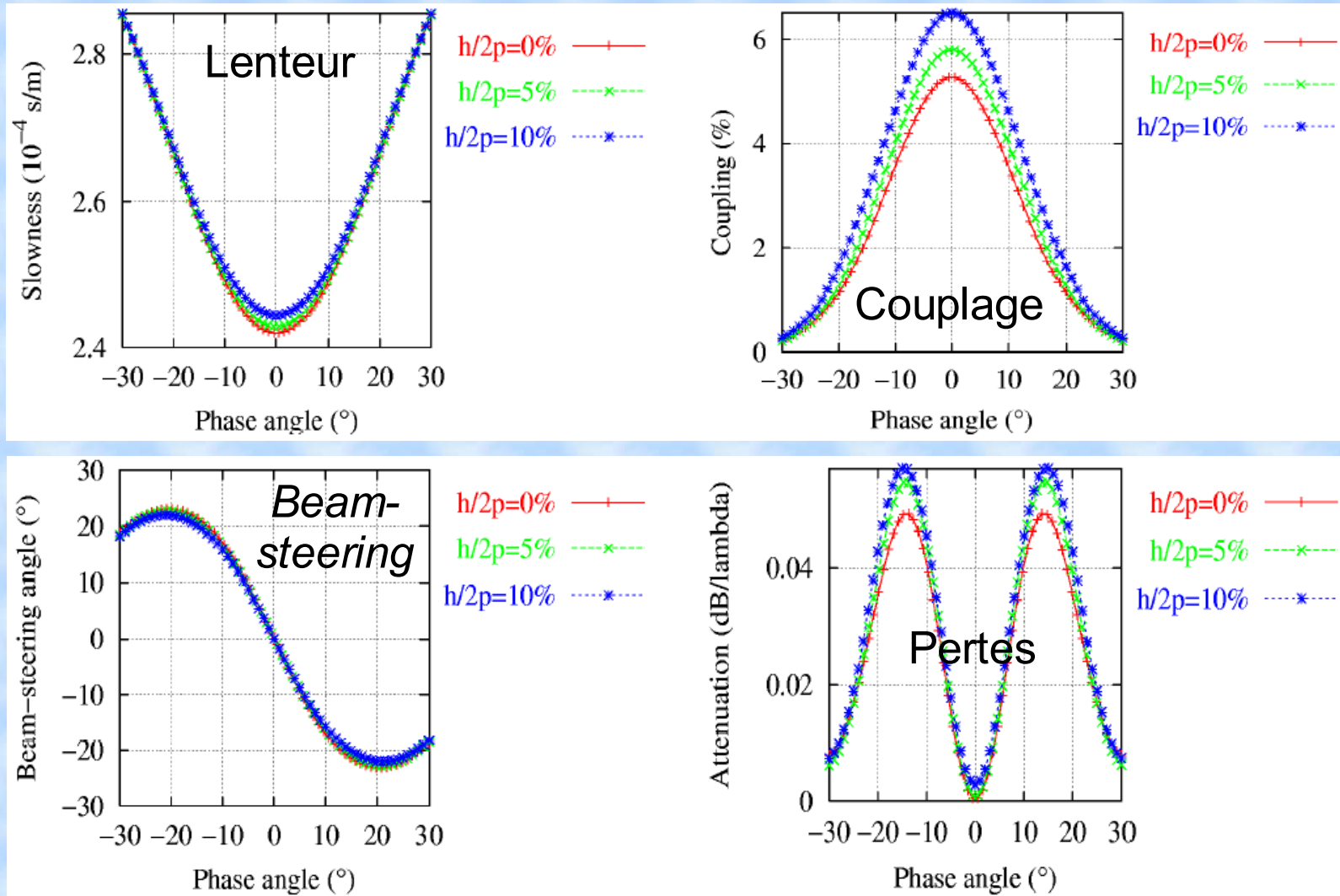
Ondes élastiques guidées

Courbes de lenteur dans les réseaux d'électrodes (1)

- Courbes de lenteur
 - Analogues aux surfaces des indices
 - Modélisation de la diffraction anisotrope
- Approche
 - ➔ V. Laude et S. Ballandras, soumis à IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Control.
 - Prise en compte mécanique des électrodes par la méthode FEM/BEM (P. Ventura, TMX)
 - Fonction de Green de surface pour le substrat
 - Élément fini pour la propagation penchée

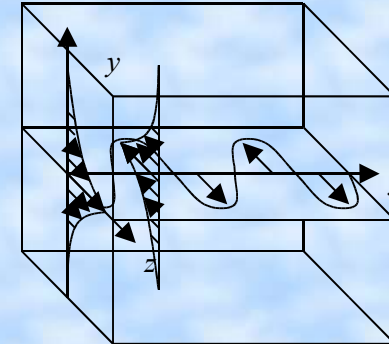


- Exemple : tantalate de lithium, coupe (YXI)/36°



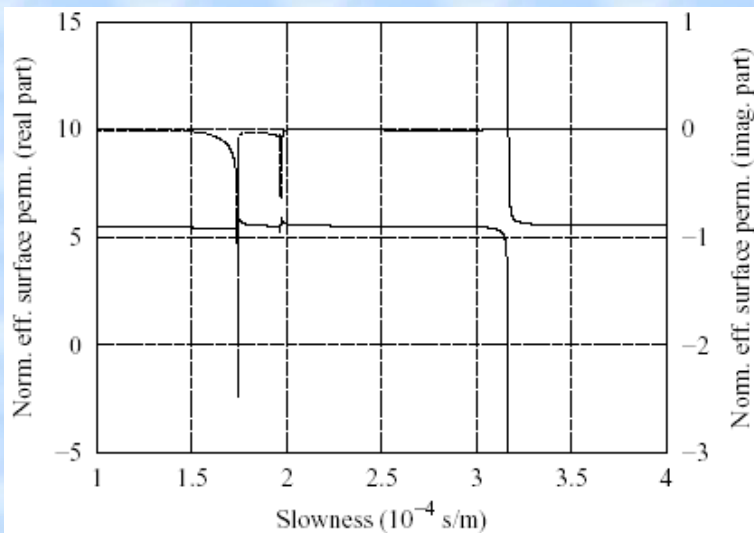
- Intérêt
 - Guidage d'ondes rapides, protection de la surface, compensation de température, etc.
- Ondes planes dans les empilements de matériaux
 - ➔ Thèses de S. Camou, Th. Pastureaud et A. Reinhardt
 - Calcul stable pour des épaisseurs arbitraires : « matrice de diffusion »
 - ➔ Th. Pastureaud, V. Laude et S. Ballandras, Appl. Phys. Lett. **80**, 2544-2546 (2002).
 - Couches épitaxiales de nitrure de gallium ou d'aluminium
 - ➔ S. Camou, Th. Pastureaud, D. Schenck, S. Ballandras et V. Laude, Electron. Lett. **37**, 1053-1055 (2001).
 - Projet « OASIS » : report d'un substrat aminci piézoélectrique sur un substrat de silicium (procédé IMPROVE du LETI)

- Ondes guidées par une interface
 - Évanescentes de part et d'autre
- Résultats théoriques

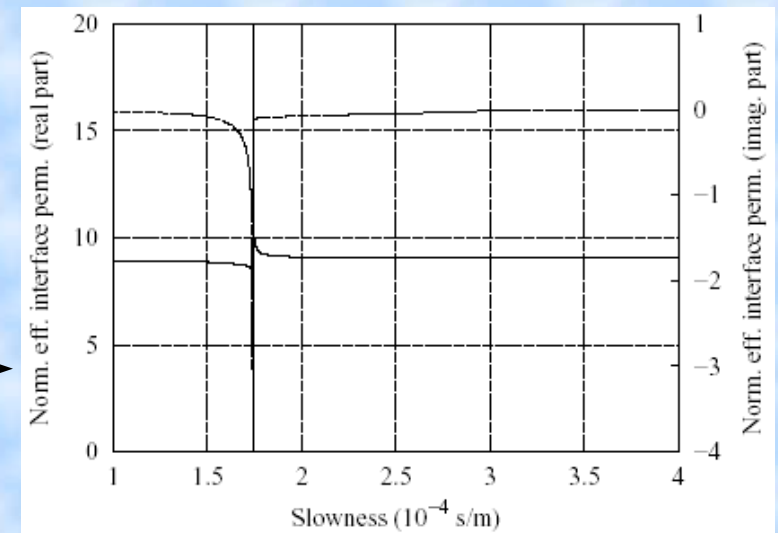


➔ S. Camou, V. Laude, Th. Pastureaud et S. Ballandras, soumis à IEEE Trans. UFFC.

- Permittivité effective d'interface
- Admittance harmonique pour des électrodes infiniment minces



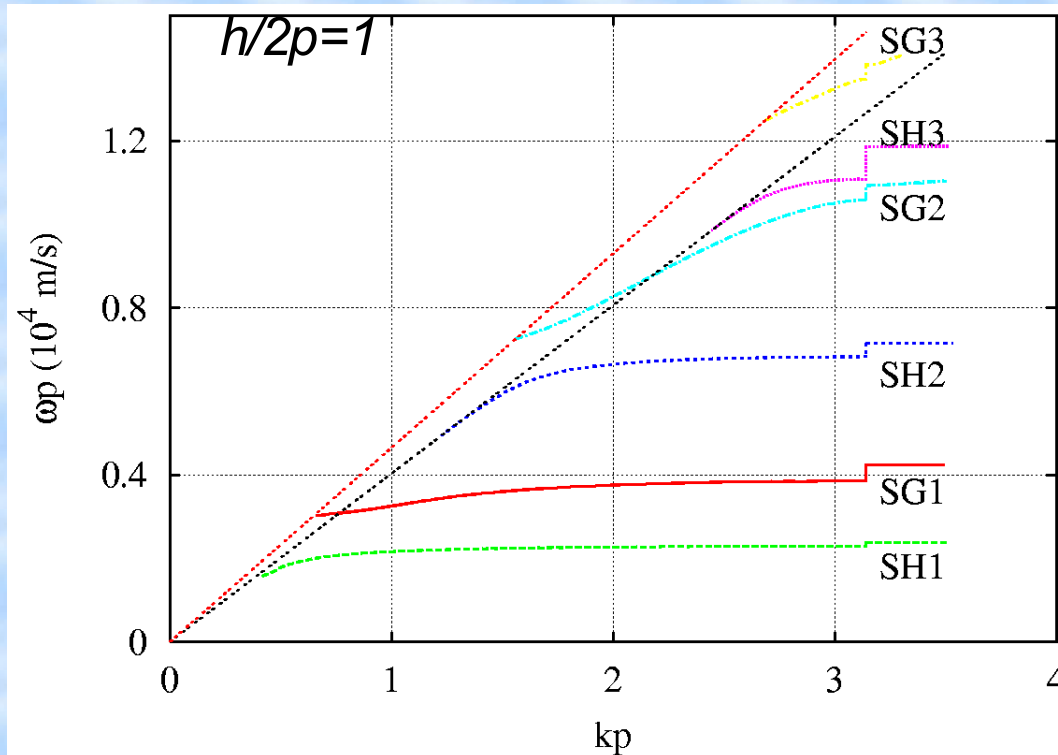
Quartz ST
surface
interface



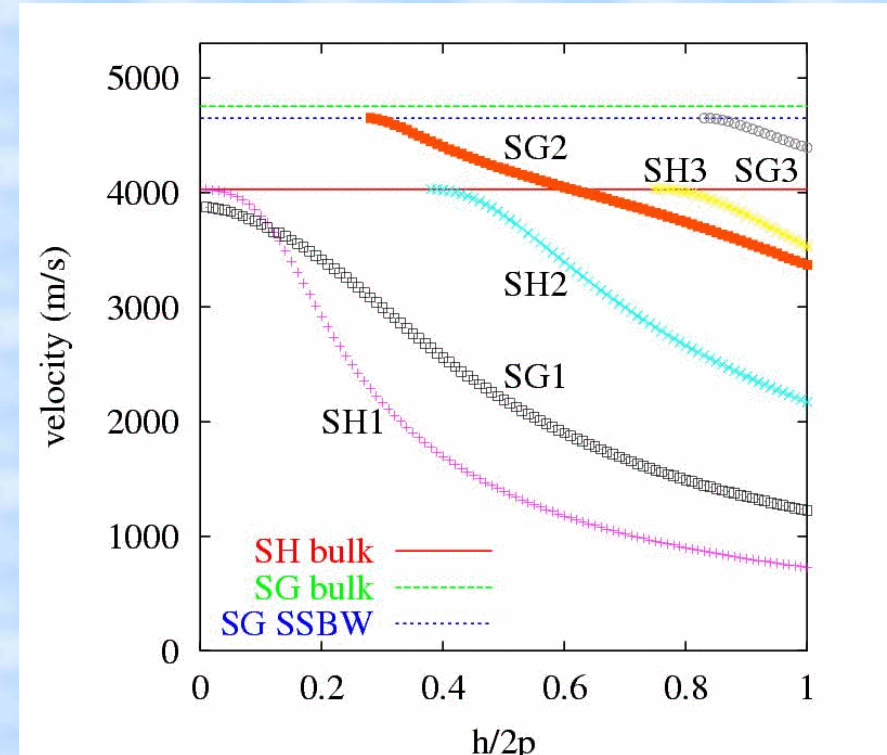
- Forte corrugation d'un substrat isotrope
 - Existence d'une famille de modes transverses guidés (Auld, Gagnepain & Tam, 1976)
 - Nombreux travaux ultérieurs sur ces ondes transverses
- Transducteur à grand facteur de forme
 - ➔ V. Laude, A. Khelif, Th. Pastureaud et S. Ballandras, J. of Appl. Phys. **90**, 2492-2497 (2001).
 - Existe t-il des modes guidés d'ordre supérieur ?
 - Quelle est leur polarisation ? Leur vitesse ?
 - Génération de ces modes par le transducteur ?
 - Méthode FEM/BEM : extension pour calculer la polarisation

- Résultats théoriques

- Électrodes d'aluminium sur substrat de LiNbO_3 , (YXI)/128°
- $h/2p=1$ ou facteur de forme de 4:1



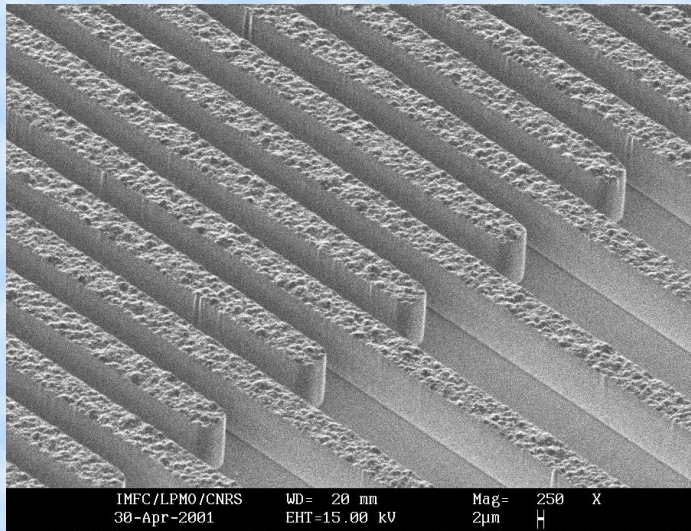
Courbes de dispersion



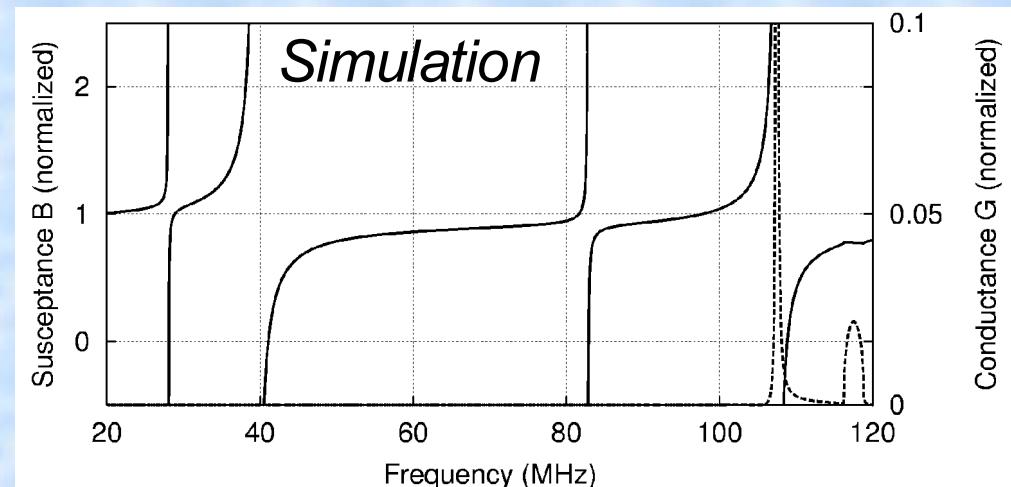
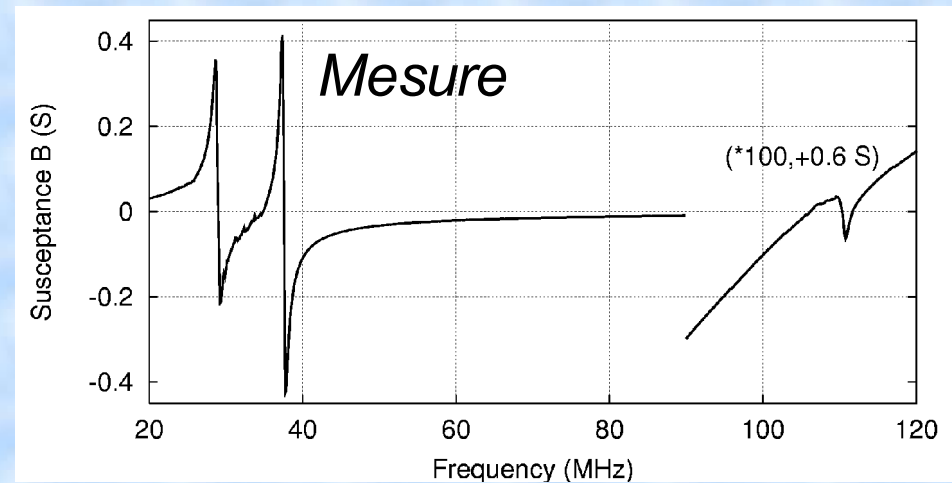
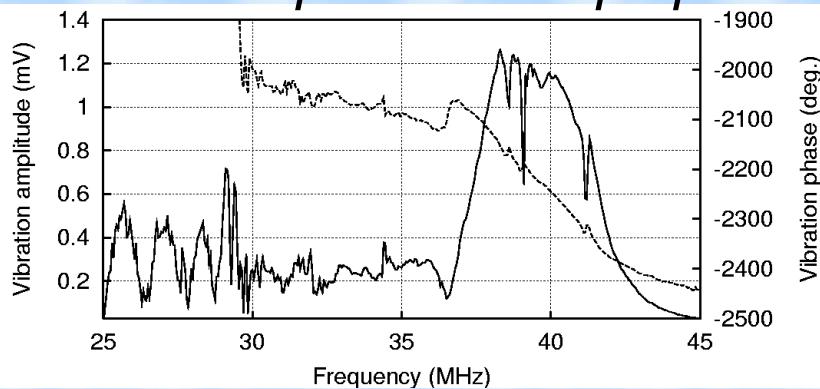
Vitesse vs. hauteur 37

- LIGA-UV et électroformage de nickel (L. Robert, W. Daniau)

→ $h = 20 \mu\text{m}$; $p = 20 \mu\text{m}$; $h/2p = 0.5$



Mesure par sonde optique



- Structures piézo-composites 1-3

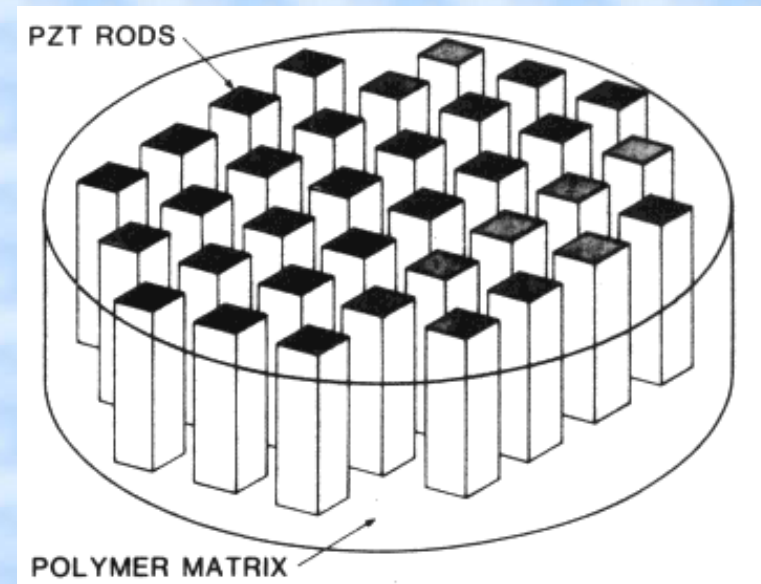
- ➔ Thèse de M. Wilm

- Mélange d'éléments piézoélectriques actifs et d'un polymère de découplage
 - Imagerie médicale et contrôle non destructif
 - Structure 2D permettant l'imagerie 3D

- Méthode «*Plane Wave Expansion*»

- Matériaux piézoélectriques quelconques

- ➔ M. Wilm, S. Ballandras, V. Laude et T. Pastureaud, J. Acoust. Soc. Am. **112**, 943-952 (2002).



Encadrement

- Doctorants

● J. Colin	DRET	30%	Corrélation optique	1996-1998
● F. Verluise	CIFRE	70%	Impulsions ultrabrèves	1977-1999
● D. Delautre	CIFRE	25%	Imagerie cohérente (MSL)	1997-...
● Th. Pastureaud	CIFRE	20%	Ondes élastiques de surface	2000-...
● A. Reinhardt	CIFRE	80%	FBAR	2002-...

- DEA, stages ingénieurs, etc.

- 3 DEA (Optique et Photonique, Laser et matière, Électronique)
- 3 stages ingénieurs (SupOptique, Centrale Lyon, SupPhy)
- 1 étudiant finlandais (HUT Helsinki)

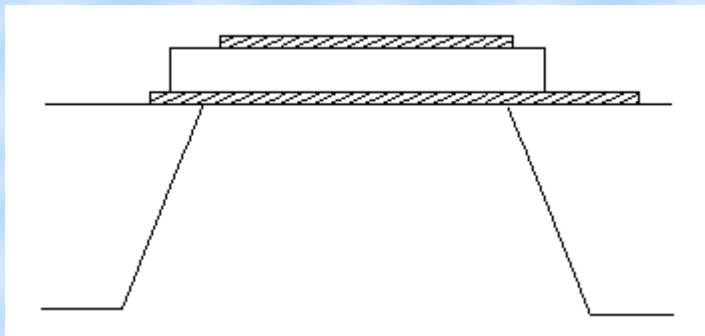
Enseignement

- Cours option troisième année SupOptique « traitement du signal avancé »
 - 45 heures entre 1995 et 1997
 - Programme : théorie logique des probabilités, théorie de la décision, estimation de paramètres, filtrage de Kalman
 - <http://www.lpmo.edu/~laude/poly.pdf> (113 pages)
- 5 conférences, 13 heures
 - ➔ SupOptique
 - ➔ ENST Br
 - ➔ École Navale, Brest
 - ➔ ENSPM, DEA Traitement de l'image et du signal

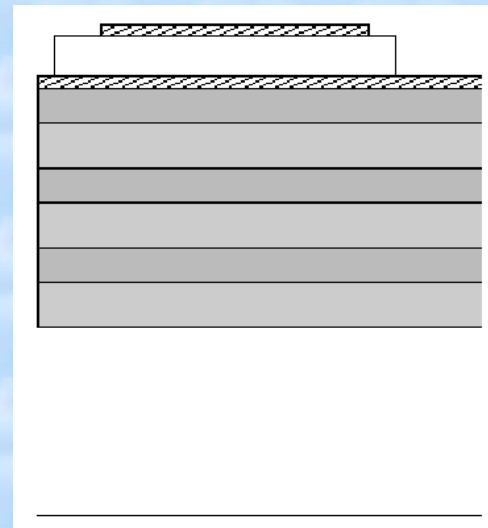
- Poursuivre dans la direction engagée au LPMO avec S. Ballandras
 - Sur les ondes élastiques guidées...
 - ...dans le cadre du LPMX (ou de son successeur)
- Mettre l'accent sur 2 thèmes neufs
 - Résonateurs à ondes de volume
 - Ondes élastiques d'interface
- Enrichir la thématique
 - Bandes interdites phononiques
 - Interactions entre optique et acoustique

- Modélisation phénoménologique des ondes élastiques guidées
 - Dispersion en fréquence des paramètres
 - Utilisation des déplacements
 - Amélioration des modèles de type « matrice mixte »
- Modélisation de la diffraction
 - Modèles de type « *angular spectrum of waves* »
 - Modélisation du guidage latéral des modes de surface
- Transducteurs non diffractants
 - Réalisation de transducteurs à peignes interdigités sans pertes par diffraction

- Résonateurs à films minces (FBAR)
 - ➔ Thèse de A. Reinhardt, depuis mars 2002
 - Modèles en ondes planes : conception, optimisation
 - Modèles éléments finis : aspects latéraux
 - Réalisation (films minces d'AlN)



Membrane



Miroir acoustique

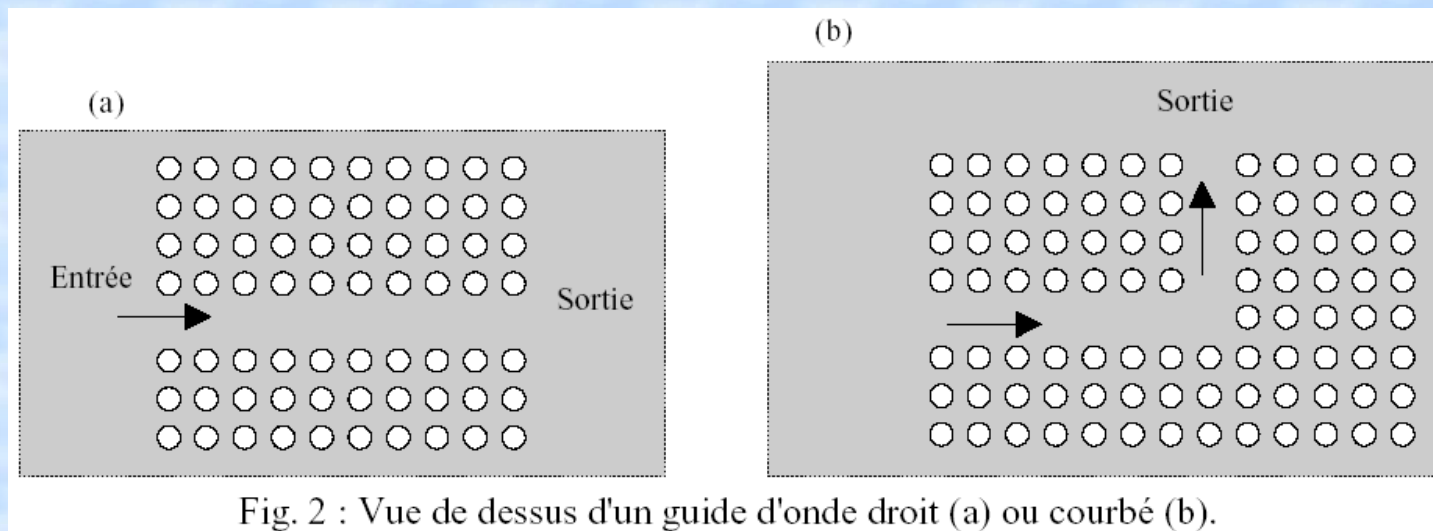
- Problématique

- ➔ Thèse démarrant en 2002 ?

- Démonstration expérimentale de la génération et détection des ondes d'interface par un transducteur à peignes interdigités
 - Identification d'une technique de collage des substrats
 - Réalisation de peignes interdigités à l'interface
 - Choix des matériaux et des coupes
 - Simulation numérique incluant le transducteur

- Problématique

- ➔ Projet de recherche de A. Khelif, entrant CR2 au LPMO
- Domaine naissant, relié aux bandes interdites photoniques
- Micro- ou nano-structures avec des ruptures d'impédance très violentes
- Confinement de l'énergie, guidage, filtrage, etc.



- Interactions entre optique et acoustique
 - Les longueurs d'onde des SAW et des ondes optiques sont similaires : $\sim 1 \mu\text{m}$
 - ➔ L'accord de phase est possible
 - ➔ Bandes interdites à la fois photoniques et phononiques
 - ➔ Exaltation des interactions ?
 - Peut-on imaginer des composants opto-acoustiques ?
 - ➔ Exemple : fibres optiques à bandes interdites commandées acoustiquement
- Théorie des ondes
 - Trait d'union de mes travaux
 - Écrire des livres sur le sujet ?