



HAL
open science

Conception et réalisation d'un banc automatisé de caractérisation du comportement temporel des miroirs auto-pompés à conjugaison de phase photoréfractive : cartographie d'échantillons et modélisation physique

Michel Goetz

► To cite this version:

Michel Goetz. Conception et réalisation d'un banc automatisé de caractérisation du comportement temporel des miroirs auto-pompés à conjugaison de phase photoréfractive : cartographie d'échantillons et modélisation physique. Matière Condensée [cond-mat]. Université Paul Verlaine - Metz, 1994. Français. NNT : 1994METZ040S . tel-01776743

HAL Id: tel-01776743

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01776743v1>

Submitted on 24 Apr 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

JBSA 627

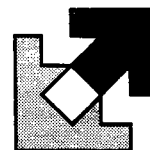


ÉCOLE
SUPÉRIEURE
D'ÉLECTRICITÉ

Supélec

Service Électronique

Université de Metz



Centre Lorrain d'Optique et d'Électronique des Solides
Groupe Matériaux Optiques à Propriétés Spécifiques

THESE

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Metz

mention

Physique - Sciences de l'Ingénieur

par

Michel GOETZ

BIBLIOTHEQUE UNIVERSITAIRE - METZ	
N° inv.	1994 20 S
Cote	S/M3 94/40
Loc	Magasin

**Conception et réalisation d'un banc automatisé de
caractérisation du comportement temporel des miroirs
auto-pompés à conjugaison de phase photoréfractive :
cartographie d'échantillons et modélisation physique**

soutenue le 21 Décembre 1994

Devant la commission d'examen :

J.C. ANDRÉ	Directeur de Recherche CNRS, NANCY
J. ETCHEPARE	Directeur de Recherche CNRS LOA, PALAISEAU
G.E. KUGEL	Professeur à l'Université de METZ
P. JULLIEN	Maître de Conférences à l'Université de DIJON
G. ROOSEN	Directeur de Recherche CNRS IOTA, ORSAY
D. RYTZ	Directeur de Sandoz Optoelectronics, HUNINGUE
J.M. VANZO	Directeur adjoint de SUPÉLEC, METZ

Examineur
Rapporteur
Directeur de thèse
Rapporteur
Examineur
Examineur
Directeur de thèse

à Dali,

à Pierre,

à Hélène,

à Agnès.

TABLE DES MATIERES

* * *

1. LA CONJUGAISON DE PHASE.....	23
1.1. Définition et propriétés d'une onde conjuguée.....	23
1.2. Le miroir à conjugaison de phase	24
1.3. Méthodes d'obtention de la conjugaison de phase.....	24
2. L'HOLOGRAMME STATIQUE	26
3. LE MÉLANGE À QUATRE ONDES DANS LES MILIEUX DE TYPE KERR (C3).....	26
3.1. Principe du mélange à quatre ondes	26
3.2. Les équations couplées du mélange à quatre ondes.....	27
4. LE MÉLANGE À DEUX ONDES DANS LES PHOTORÉFRACTIFS	28
4.1. Principe du mélange à deux ondes.....	29
4.2. Gain du mélange à deux ondes	30
5. LE MÉLANGE À QUATRE ONDES DÉGÉNÉRÉ DANS LES PHOTORÉFRACTIFS.....	30
5.1. Les débuts du FWM.....	30
5.2. La mise en équation du FWM.....	31
5.3. La résolution des équations du FWM.....	33
5.4. Variantes du système à quatre ondes photoréfractif.....	35
5.5. TWM dans les milieux de type Kerr et dans les photoréfractifs : analogies et différences.	36
6. LA CONJUGAISON DE PHASE PAR DIFFUSION BRILLOUIN STIMULÉE.....	36
7. LES MIROIRS AUTOPOMPÉS UTILISANT DES CRISTAUX PHOTORÉFRACTIFS.....	37
7.1. Oscillateurs à conjugaison de phase photoréfractifs autopompés	37
7.2. Les débuts du miroir CAT avec le titanate de baryum.....	37
7.3. D'autres cristaux fonctionnent en miroir CAT.....	39
7.4. Autres configurations de miroirs autopompés.....	40
8. LE MIROIR CAT EN TITANATE DE BARYUM.....	40
8.1. Comportement temporel : "chaos" et instabilités.....	40
8.2. Amélioration des performances du miroir CAT en BaTiO ₃	41

9. LA MODÉLISATION DU MIROIR À CONJUGAISON DE PHASE AUTOPOMPÉ DE TYPE CAT	42
9.1. Position du problème.....	42
9.2. Modèle de mélange à deux ondes de Lam.....	42
9.3. Le modèle de MacDonald et Feinberg.....	44
9.4. Autres analyses.....	47
1. DESCRIPTION FONCTIONNELLE	51
2. LA PARTIE OPTIQUE.....	53
2.1. La source laser.....	53
2.3. Les éléments optiques.....	54
2.4. L'interféromètre.....	54
2.5. La video de surveillance.....	55
3. LA PARTIE MÉCANIQUE.....	55
3.1. Les obturateurs	55
3.1.1. Technologie	55
3.1.2. Connections.....	56
3.1.3. Commande des moteurs des obturateurs (version PC)	57
3.1.4. Ouverture et fermeture des obturateurs (version MacIntosh).....	57
3.2. Le porte-échantillon régulé en température	57
3.2.1. Orientation du cristal.....	59
3.2.3. La régulation de température.....	60
3.3. Les tables de translation et de rotation motorisées.....	60
3.4. La table optique	61
4. LA MESURE DE L'ONDE CONJUGUÉE	61
4.1. Le matériel utilisé.....	61
4.2. Etalonnage du dispositif de mesure.....	62
5. AUTOMATISATION DU BANC DE MESURE.....	63
5.1. Version pour PC.....	63
5.1.1. Les cartes d'interface.....	64
5.1.2. Automate et programmation "modeless"	64
5.2. Version pour MacIntosh Quadra.....	65
5.2.1. Les cartes d'interface.....	65
5.2.2. Organisation de l'automate.....	65
5.2.2.1. Variables et variables d'état.....	67
5.2.2.2. Programme principal.....	67
5.2.2.3. Exécution d'une manipulation.....	68
5.2.2.4. Initialisation de l'acquisition.....	69
5.2.2.5. Acquisition des deux voies	69
5.2.2.6. Gestion de la reprise après arrêt d'urgence.....	69
5.2.2.7. Gestion de la création du nom des fichiers résultats.....	69
5.2.2.8. Fin d'une acquisition.....	70

5.2.2.9. Prise en compte des conditions expérimentales.....	70
5.2.2.10. Ouverture et fermeture des obturateurs.....	70
5.2.2.11. Commande des moteurs MicroControle.....	70
1. CONDITIONS EXPÉRIMENTALES ET CRISTAUX.....	75
1.1. Échantillons testés.....	75
Échantillon 1.....	75
Échantillon 2.....	75
1.2. Conditions expérimentales de la première série de mesure.....	76
1.3. Conditions expérimentales de la seconde série de mesure.....	76
2. RÉSULTATS DE MESURE DE RÉFLECTIVITÉ.....	76
2.1. Réflectivité du miroir à conjugaison de phase en fonction du temps à température donnée.....	76
2.2. Influence de la température.....	81
2.3. Influence de la puissance d'illumination sur la réflectivité.....	82
2.4. Reproductibilité des acquisitions.....	83
2.5. Etude d'un régime d'oscillations périodiques en fonction de la température.....	87
3. CLASSIFICATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX.....	91
3.1. Analyse initiale avant automatisation.....	91
3.1.1. Classification des comportements en réflectivité.....	91
3.1.2. Cartographie dans le plan Td-R du type de comportement.....	92
3.1.3. Cartographie dans le plan Td-R de la réflectivité maximale.....	92
3.1.4. Cartographie du temps d'apparition et de stabilisation de l'onde conjuguée.....	94
3.1.4. Cartographie de l'intensité maximale de l'onde conjuguée sur la fenêtre temporelle.....	95
3.2. Analyse automatisée.....	97
3.2.1. Introduction et objectifs.....	97
3.2.2. Cartographie de valeur maximale.....	97
3.2.3. Cartographie de valeur moyenne.....	104
3.2.4. Cartographie de temps d'apparition.....	110
3.2.5. Calcul de la fonction d'autocorrélation.....	116
3.2.6. Analyse critique et étude sur d'autres critères.....	118
3.2.6.1. Temps de montée.....	118
3.2.6.2. Valeur moyenne après décollage.....	119
3.2.6.3. Stabilité.....	119
3.2.6.4. Amplitude des oscillations.....	119
3.2.6.5. Fonction d'autocorrélation après décollage.....	119
4. DISCUSSION.....	119
4.1. Point de vue phénomène physique.....	119
4.2. Point de vue instrumental et traitement.....	120
1. REMARQUES PRÉLIMINAIRES CONCERNANT LES MODÉLISATIONS PROPOSÉES.....	123
2. LE BEAM FANNING.....	124

2.1. Mise en évidence du beam fanning.....	124
2.2. Modélisation du beam fanning.....	125
3. MODÉLISATION DE LA RÉFLECTIVITÉ À SATURATION.....	128
3.1. Raisons du choix du modèle.....	128
3.2. Rappel théorique et du principe du modèle à deux régions couplées.....	129
3.2.1. Schéma d'interaction et réseaux inscrits.....	129
3.2.2. Conditions aux limites et réflectivité.....	130
3.2.3. Coefficient de couplage.....	132
3.2.4. Influence de l'angle de fanning.....	133
3.3. Paramètres du calcul.....	133
3.4. Exemple de calcul.....	134
3.4.1. Calcul du coefficient de couplage.....	134
3.4.2. Influence de l'angle de fanning.....	135
3.4.3. Distribution de fanning.....	136
3.4.3. Estimation d'une longueur d'interaction effective.....	137
3.4.5. Calcul de la réflectivité en fonction de la position du point d'incidence.....	138
3.5. Application de ce modèle de calcul à deux échantillons de titanate de baryum.....	139
3.5.1. Echantillon 1.....	139
3.5.2. Echantillon 2.....	142
4. MODÉLISATION STATISTIQUE DU COMPORTEMENT TEMPOREL DU MIROIR CAT	145
4.1. Base du modèle statistique.....	145
4.1.2. Tableau.....	145
4.1.3. Initialisation et actualisation du tableau.....	146
4.1.4. Évaluation de réflectivité à partir du contenu du tableau.....	146
4.1.5. Outil d'étude expérimentale.....	146
4.2. Remplissages simples d'un tableau binaire.....	147
4.2.1. Remplissage par cumul simple.....	147
4.2.2. Remplissage par pile ou face.....	147
4.2.3. Remplissage par bascule.....	147
4.3. Remplissage d'un tableau binaire par loi de probabilité.....	148
4.4. Réponses temporelles obtenues pour diverses lois de probabilité.....	149
4.4.1. Influence de la valeur de M.....	149
4.4.2. Influence de la valeur de d.....	151
4.4.3. Influence de la valeur de e.....	153
4.4.4. Comportements périodiques.....	156
4.4.5. Comparaison entre les courbes expérimentales et modélisées.....	158
4.5. Discussion sur le modèle statistique et la relation avec les processus physiques intervenant dans la conjugaison de phase.....	159
4.5.1. Comparaison entre les résultats expérimentaux et les réponses obtenues avec le modèle statistique.....	159
4.5.2. Origines physiques du comportement temporel du miroir CAT.....	160
4.5.2.1. Remarques préliminaires.....	160
4.5.2.2. Le beam fanning et sa dépendance temporelle.....	160
4.5.2.3. Le mélange à quatre ondes et sa dépendance temporelle.....	161

4.5.2.4. Au delà du processus de mélange à quatre ondes.....	162
4.5.3. Relation entre le modèle statistique et les phénomènes physiques.....	162
4.5.4. Conclusion et perspectives.....	164
1. LES OBJECTIFS ET LES POTENTIALITÉS DE L' ICAMCAT.....	167
1.1. Caractérisation systématique et automatique.....	167
1.1.1. Caractérisation des échantillons.....	167
1.1.2. Comparer des géométries de montages.....	167
1.1.3. Obtenir des cartographies.....	168
1.1.4. Tester de nouveaux modèles physiques.....	168
1.2. Autres potentialités de l'ICAMCAT.....	168
1.2.1. Contrôler la qualité de l'onde conjuguée en fonction de la puissance de l'aberration.....	169
1.2.2. Tendre vers un contrôle systématique des échantillons à la production.....	169
2. VERS UN STANDARD DE CARACTÉRISATION SYSTÉMATIQUE DES MIROIRS À CONJUGAISON DE PHASE AUTOPOMPÉS PHOTORÉFRACTIFS.....	169
2.1. Description des différentes versions de l'ICAMCAT.....	170
La source optique.....	171
Les éléments optiques.....	172
Le support de cristal.....	172
Le cristal de démonstration.....	172
Les tables motorisées.....	172
L' acquisition.....	172
Les obturateurs.....	172
L'ordinateur.....	172
Les cartes à insérer.....	173
Le logiciel et l'utilisation.....	173
La source optique.....	174
Les éléments optiques.....	175
Le support de cristal.....	175
Les tables motorisées.....	175
L' acquisition.....	175
Les obturateurs.....	176
L'ordinateur.....	176
Les cartes à insérer.....	176
Le logiciel et l'utilisation.....	176
La video de surveillance.....	177
L'interféromètre.....	177
La source optique.....	178
Les éléments optiques.....	179
Le support de cristal.....	179
Les tables motorisées.....	179
L' acquisition.....	179
Les obturateurs.....	179
L'ordinateur.....	180
Les cartes à insérer.....	180
Le logiciel et l'utilisation.....	180

La video de surveillance	181
L'interféromètre	181
SÉRIES DE COURBES EXPÉRIMENTALES	191
R = 5° 191	
R = 6° 192	
CONNECTIONS DES CARTES.....	193
AFFECTATION DES CONNECTIONS DE LA CARTE LABNB.	194
Le projet : CRISTAL.PRJ.....	195
Le programme principal : CRISTAL.C	195
La commande de la carte : DT2801.C.....	211
La commande des obturateurs : SHUT.C.....	213
MYOWN.H	216
SHUT.H	218
DT2801.H.....	218
MAKEFILE	219
L'AUTOMATE SUR MAC	221
Cristal.c.....	221
Inconnu.c.....	243
Shut.c 244	
Moteur.c.....	247
SCANFICH 2.0	249
COEFFICIENT DE COUPLAGE EN FONCTION DES ANGLES.....	257
RÉFLECTIVITÉ DU MIROIR EN FONCTION DES ANGLES	263
CHAMP ÉLECTRIQUE D'ESPACE EN FONCTION DU PAS DU RÉSAU	269
MODÈLE STATISTIQUE DU COMPORTEMENT TEMPOREL.....	272

Le présent travail a été réalisé au Service Électronique du Campus de Metz de Supélec, dans le cadre d'une collaboration entre ce dernier et le groupe Matériaux Optiques à Propriétés Spécifiques (MOPS) du Centre Lorrain d'Optique et d'Électronique du Solide (CLOES).

Je remercie vivement Jean-Marc Vanzo, Chef du Service Électronique et Directeur Adjoint du Campus de Metz de Supélec qui a accepté d'assurer la codirection de ma thèse et d'accueillir mon activité de recherche dans son Service en mettant à ma disposition une infrastructure matérielle et humaine dont je mesure l'importance déterminante pour le succès de l'opération.

Il m'est agréable d'exprimer ici toute ma gratitude et toute ma reconnaissance à Godefroy Kugel, Professeur à l'Université de Metz, qui m'a fait l'honneur de me proposer un sujet de thèse sous sa direction et qui m'a encadré tout au long de ces années de travail en me faisant profiter autant de sa compétence scientifique que de ses conseils amicaux.

Je voudrais également remercier très chaleureusement Jo Etchepare, Directeur de Recherche CNRS au LOA (ENSTA - École Polytechnique) et Pierre Jullien, Docteur d'Etat et Maître de Conférences à l'Université de Dijon d'avoir accepté la lourde tâche d'être les rapporteurs de ce travail. Leurs remarques, critiques et suggestions m'ont permis d'améliorer considérablement la présentation de ce mémoire.

Gérald Roosen, Directeur de Recherche CNRS et Chef du Groupe Non-linéarités photoréfractives au IOTA ainsi que Jean-Claude André, Directeur de Recherche CNRS et Directeur Scientifique Adjoint (SPI) au CNRS, m'ont fait l'honneur de s'intéresser à mon travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je suis particulièrement heureux que Daniel Rytz ait accepté de faire partie de mon jury de thèse malgré ses nombreuses occupations et préoccupations. Je tiens aussi à le remercier pour son aide précieuse et pour la mise à ma disposition d'un échantillon de titanate de baryum.

Mes remerciements vont également à tous mes collègues et amis de Supélec et du CLOES avec qui j'ai eu plaisir à travailler. Il ne me sera malheureusement pas possible de les citer tous ici. Cependant je tiens tout particulièrement à souligner le remarquable travail de conception et de réalisation mécanique que Mario a effectué pour équiper l'ICAMCAT : je pense qu'il a amplement mérité le label "*MarioContrôle*". Je voudrais également remercier Jean Louis Gutzwiller pour avoir mis à ma disposition divers logiciels écrits par ses soins.

J'ai eu la chance de pouvoir mener à bien ce travail de thèse dans un environnement familial particulièrement favorable. Et je voudrais remercier ici celle qui tant donné, bien souvent dans l'ombre, pour que cet équilibre et cette harmonie restent possibles : merci Dali, pour tout.

SYMBOLES UTILISÉS

$BaTiO_3$	titanate de baryum
KTN	$KTa_{1-x}Nb_xO_3$
BGO	$BI_{12}GeO_{20}$
BSO	$BI_{12}SiO_{20}$
BTO	$BI_{12}TiO_{20}$
$SBN:60$	$Sr_{0,6}Ba_{0,4}Nb_2O_6$
$BSKNN$	$Ba_{2-x}Sr_xK_{1-y}Na_yNb_5O_{15}$
Λ	pas du réseau d'illumination
N_D	densité des donneurs
N_D^i	densité des donneurs ionisés (impuretés ionisées susceptibles de capturer un électron)
N	densité d'électrons
s	section efficace de photoexcitation
β	taux de génération thermique d'électrons
I	intensité lumineuse
γ_R	recombinaison des trous.
$-q$	charge électrique de l'électron : $1,602 \times 10^{-19} C$
μ	mobilité des électrons
k_B	constante de Boltzmann
T	température absolue
E	champ électrique
$[\epsilon]$	tenseur diélectrique
N_A	densité d'accepteurs
Φ_δ	déphasage entre réseau d'illumination et réseau d'indice

INTRODUCTION GENERALE

Labor omnia vincit improbus

VIRGILE

Le miroir à conjugaison de phase autopompé (en configuration CAT¹) réalisé à l'aide d'un cristal photoréfractif de titanate de baryum $BaTiO_3$, a été découvert par Feinberg en 1982 [FEINBERG 1982].

Depuis lors, un grand nombre de publications ont fait état d'observations expérimentales, d'analyses et de tentatives de modélisation visant à comprendre et à expliquer la réflectivité du dispositif et notamment le comportement temporel de l'onde conjuguée ainsi obtenue.

La complexité du problème de la conjugaison de phase autopompée réside essentiellement dans la grande quantité et la diversité des paramètres physiques pouvant intervenir :

des paramètres relatifs au faisceau lumineux incident :

- longueur d'onde
- focalisation
- modulation spatiale
- diamètre du rayon²
- polarisation
- puissance incidente
- type de faisceau : continu ou impulsionnel

des paramètres relatifs au faisceau d'effacement préalable :

- longueur d'onde
- polarisation
- puissance
- durée d'effacement

des paramètres relatifs à l'échantillon :

- type de cristal
- propriétés physiques du cristal (absorption, conductivité, etc.)
- nature et concentration des dopants
- dimensions
- proportions géométriques
- orientations cristallines par rapport aux faces de l'échantillon
- température
- traitement de surface

des paramètres relatifs à la position du cristal par rapport au faisceau incident :

- altitude
- position transversale
- angle d'incidence.

Par ailleurs, il n'est actuellement pas possible de synthétiser des échantillons de cristaux photoréfractifs donnant de manière prévisible et reproductible les comportements physiques souhaités. Ceci provient du fait qu'il est extrêmement difficile de contrôler parfaitement les impuretés et les dopants ; or ceux-ci sont connus pour jouer un rôle primordial au niveau de l'effet photoréfractif.

La compréhension théorique du phénomène de conjugaison de phase autopompée fait encore l'objet de multiples discussions dans la mesure où elle a des difficultés à tenir compte et à intégrer les différents paramètres

¹ Il s'agit d'une configuration particulière que nous étudierons dans le détail aux Chapitres I et IV.

² On utilise en général le terme anglais "waist", ce que nous ferons dans la suite.

expérimentaux mentionnés précédemment. La mise au point d'une modélisation théorique doit se fonder sur une étude aussi systématique que possible de l'influence des différents paramètres expérimentaux sur le comportement du dispositif et notamment son comportement temporel.

L'objectif de notre travail est de mettre au point un dispositif expérimental permettant de faire de façon totalement automatisée :

- une systématique de mesure du comportement temporel du miroir compte tenu d'un choix préalable des paramètres dans le champs précédemment défini
- une systématique de stockage et de traitement des mesures permettant d'obtenir, selon le jeu de paramètres expérimentaux, une évaluation de la qualité du miroir, qualité pouvant être définie par différents critères, en fonction de l'utilisation du dispositif.

La première phase de notre travail a consisté en une étude bibliographique complète portant sur les miroirs à conjugaison de phase autopompés de manière à recenser et à analyser toutes les observations déjà effectuées sur le comportement temporel de l'onde conjuguée ainsi obtenue, avec quels types d'échantillons, dans quelles conditions expérimentales ainsi que les diverses interprétations physiques avancées, parfois contradictoires ainsi que les différents modèles proposés.

Nous avons conçu et réalisé un banc entièrement piloté par un PC dans un premier temps, ensuite étendu à un MacIntosh Quadra 950, et permettant de réaliser des mesures systématiques des caractéristiques de l'onde conjuguée obtenue dans des cristaux photoréfractifs. Le banc est constitué d'une chaîne d'acquisition permettant d'observer l'évolution temporelle de l'intensité de l'onde conjuguée (pendant des durées pouvant être très longues). Les acquisitions sont enregistrées sous forme de fichiers contenant à la fois des tableaux de points mais aussi du code généré en langage Pascal permettant de d'exécuter des tracés automatisés sur écran ou sur imprimante.

A l'aide de cet appareil, nous avons effectué des caractérisations systématiques de plusieurs échantillons de titanate de baryum, notamment un provenant de l'Institute of Physics (Chinese Academy of Sciences) de Beijing en Chine et un autre provenant de Sandoz Optoelectronics à Huningue. Nous avons étudié l'influence de différents paramètres sur le comportement temporel de l'onde conjuguée :

- la température, dans un intervalle allant de 10°C à 70°C
- l'intensité de l'onde incidente
- la polarisation
- l'angle d'incidence
- la position transversale du point d'incidence sur le cristal

Certains essais ont mis en évidence la bonne reproductibilité des résultats. Nous avons pu retrouver les différents comportements décrits dans la littérature, mais surtout établir une cartographie d'utilisation des échantillons, permettant

d'indiquer les zones de qualité, après définition de critères de qualité. Il a été mis en évidence l'existence de zones d'utilisation permettant d'optimiser ces différents critères.

Afin d'interpréter les résultats issus de ces expérimentations systématiques, nous avons adapté deux modèles théoriques.

Le premier, développé à partir du modèle de MacDonald et Feinberg à deux régions couplées de mélange à quatre ondes, permet de calculer la réflectivité en régime permanent en fonction de la position du point d'incidence sur le cristal, de l'angle d'incidence et de la température. Ce modèle, supposant un fanning¹ concentré en un seul rayon [MACDONALD and FEINBERG 1983], effectuant une boucle avec deux réflexions internes totales dans un coin du cristal, a été étendu en introduisant un paramétrage géométrique des différents rayons par une distribution continue de fanning. Pour ce faire, nous avons au préalable étudié la formation du beam fanning à partir des équations de comportement de la matière et des équations de propagation dans les milieux inhomogènes.

Le second modèle a été développé à partir d'une idée originale et vise à interpréter le comportement temporel de l'onde conjuguée. C'est un modèle temporel statistique permettant de schématiser, à partir de paramètres à relier aux constantes physiques de l'échantillon, le temps de réponse, la stabilité et la valeur à saturation de l'intensité de l'onde conjuguée.

Ce travail a été mené en étroite collaboration entre le groupe Matériaux Optiques à Propriétés Spécifiques du Centre Lorrain d'Optique et d'Électronique des Solides (CLOES-MOPS) de l'Université de Metz et le Service Électronique de l'École Supérieure d'Électricité (SUPÉLEC-Service Électronique). C'est pourquoi il présente un caractère mixte :

- ingénierie instrumentale
- physique des photoréfractifs et conjugaison de phase.

De plus, des contacts scientifiques ont été établis avec P. Jullien de l'Université de Dijon, P. Hribeck de l'Université de Prague (Tchécoslovaquie), D. Rytz de Sandoz Optoelectronics, M. Garrett de Deltronic Crystal Industries (USA) et M. Carrascosa de l'Université de Madrid.

¹ Ce terme anglais est délicat à traduire dans notre contexte, c'est pourquoi nous l'utiliserons tel quel. Le verbe "to fan out" signifie en anglais "se déployer en éventail". Le beam fanning, qui sera étudié en détail dans le premier paragraphe du Chapitre IV, repose en fait sur cette image d'un éventail que l'on déploie ; les rayons de fanning s'écartent progressivement du rayon incident pour se diriger dans la direction de l'axe c du cristal.

CHAPITRE I

LES MIROIRS A CONJUGAISON DE PHASE

Nous présentons tout d'abord dans ce chapitre la conjugaison de phase ainsi que divers phénomènes physiques permettant de la mettre en œuvre : l'holographie statique, la diffusion Brillouin stimulée, autopompée ou non, le mélange à quatre ondes dans les milieux de type Kerr, le mélange à quatre ondes dans les photoréfractifs et enfin les systèmes autopompés. Puis nous nous intéressons plus particulièrement au miroir à conjugaison de phase autopompé en configuration CAT, souvent réalisé à l'aide d'un cristal de titanate de baryum, et dont le comportement temporel complexe laisse encore la place à de nombreuses discussions.

*Forget about having
and think about beeing.*

Erich FROMM

1. La conjugaison de phase.

1.1. Définition et propriétés d'une onde conjuguée

Une onde électromagnétique de pulsation ω et se propageant dans la direction de l'axe Oz peut être décrite par son champ électrique sous la forme suivante :

$$\vec{E} = \text{Re}[\vec{\psi}(x, y, z)\exp(i\omega t)] = \text{Re}[\vec{A}(x, y)\exp(i(\omega t - kz + \varphi(x, y)))] \quad (\text{Eq. I.1.1})$$

où A est réel et $\varphi(x, y)$ est une fonction des coordonnées transversales (x, y) . On appelle onde conjuguée de E l'onde dont les dépendances spatiales sont conjuguées (ce qui laisse la dépendance temporelle inchangée) de telle sorte que l'on ait :

$$\vec{E}_{PC} = \text{Re}[\vec{\psi}^*(x, y, z)\exp(i\omega t)] = \text{Re}[\vec{A}(x, y)\exp(i(\omega t + kz - \varphi(x, y)))] \quad (\text{Eq. I.1.2})$$

Le signal conjugué correspond à une onde se propageant vers les z négatifs, donc revenant en arrière, et avec une phase spatiale $\varphi(x, y)$ inversée par rapport à l'onde initiale. Tout comme (Eq. I.1.1), on peut facilement montrer que l'onde définie par (Eq. I.1.2) est solution de l'équation d'onde relative aux champs électriques.

Les deux ondes ont exactement les mêmes fronts d'onde, mais se propagent en sens opposés. On peut montrer l'intérêt de pouvoir obtenir la conjuguée d'une onde donnée sur l'exemple suivant : considérons une onde plane traversant un milieu déphasant ; elle ressort avec un front d'onde qui n'est plus plan (voir figure I.1.1.a).

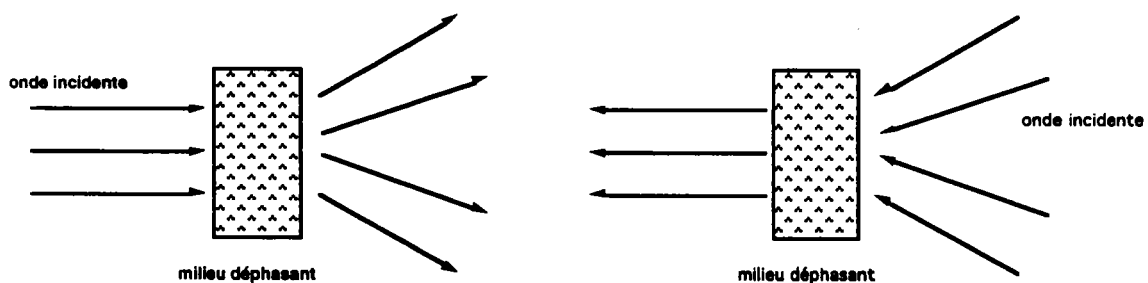


Figure I.1.1.a. Passage d'une onde plane dans un milieu déphasant.
b. Restauration du front d'onde initial

Si l'on génère la conjuguée de cette onde émergente, qui va par suite retraverser le milieu perturbateur, mais dans l'autre sens (voir figure I.1.1.b), on retrouve le front d'onde plan initial.

On a alors restauré le front d'onde perturbé par le milieu déphasant.

1.2. Le miroir à conjugaison de phase

La fonctionnalité d'un miroir à conjugaison de phase consiste à générer l'onde conjuguée de l'onde incidente sur le miroir. Lorsque l'onde à conjuguer est constante et est connue à l'avance, un miroir traditionnel peut jouer le rôle de miroir à conjugaison de phase. Dans le cas de l'onde plane, un miroir plan fera l'affaire ; de même qu'un miroir sphérique permet d'obtenir le même résultat avec une onde sphérique (voir figure I.1.2).

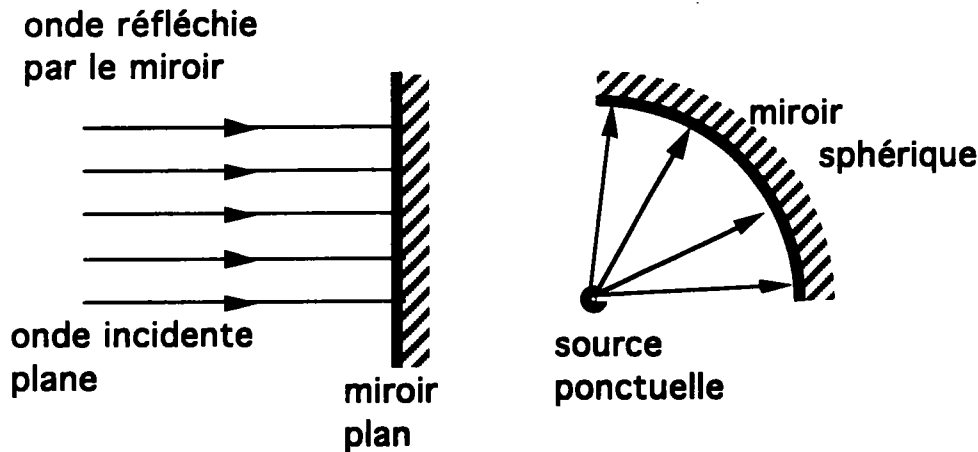


Figure I.1.2. Conjugaison de fronts d'onde simples.
a. Front d'onde plan. B. Front d'onde sphérique.

Pour la généralisation à des fronts d'onde de forme plus complexe, il suffirait de réaliser un miroir dont la forme épouserait exactement celle du front d'onde à conjuguer. Dans la pratique, toutefois, cette méthode s'avère irréaliste. D'une part parce qu'il est impossible de réaliser un miroir dont la face réfléchissante ait une forme géométrique parfaitement précise (surtout si elle est complexe). D'autre part parce que, quand bien même ce problème fût résolu, il resterait encore à positionner correctement le miroir par rapport au faisceau conjugué (dans le cas général, cette contrainte s'avère être quasiment impossible à respecter). Il faut enfin remarquer que ce dispositif nécessite de connaître a priori la forme d'onde (qui plus est, statique) que l'on veut conjuguer.

1.3. Méthodes d'obtention de la conjugaison de phase

Dans les années 70, il y eut des tentatives de réalisation de miroirs dont la forme pouvait être adaptée à celle d'un front d'onde donné à l'aide d'actionneurs commandés électriquement [HAYES et al. 1977]. Mais l'encombrement des actionneurs limitant la résolution, le temps de réponse assez élevé ne permettant pas de dépasser quelques kHz, ainsi que la complexité des dispositifs ont constitué des handicaps au développement de cette technique¹.

¹ On retrouve toutefois un peu cette technique actuellement au niveau des télescopes de conception

Mais dès 1965, Kogelnik montrait que l'on pouvait effectuer de la restauration de fronts d'ondes perturbés par des milieux dont l'indice de réfraction est inhomogène - mais statique - au moyen de l'holographie traditionnelle [KOGELNIK 1965].

La notion d'holographie dynamique (ou temps-réel est apparue avec les travaux de Gerritsen [GERRITSEN 1967], Woerdman [WOERDMAN 1971], Amodei [AMODEI 1971] et Stepanov [STEPANOV et al. 1971] qui montrèrent que l'on pouvait écrire un hologramme¹ à l'aide d'un faisceau laser que l'on sépare en deux, et le relire en même temps à l'aide d'un second laser. Cette technique fut surtout mise à profit au départ pour étudier la dynamique des processus physiques (non-linéaires) de la formation des hologrammes. Les modèles de l'époque ne prenaient pas en compte l'interaction des faisceaux d'écriture avec le faisceau de lecture.

Puis, sans rapport apparent toutefois avec l'holographie dynamique, Zel'dovich met en évidence, en 1972, la ressemblance entre l'onde incidente et l'onde réfléchie dans un dispositif à rétro diffusion Brillouin stimulée [ZELDOVICH et al. 1972]. Cette découverte sera à l'origine de nombreux travaux sur la conjugaison de phase par diffusion Brillouin stimulée.

Une autre manière d'obtenir une onde conjuguée est le mélange à quatre ondes dégénéré. Il a été mis en évidence en 1977 par Hellwarth [HELLWARTH 1977] puis formalisée par Yariv et Pepper [YARIV and PEPPER 1977]. L'analogie entre le mélange à quatre ondes dégénéré et l'holographie dynamique est apparue alors rapidement [YARIV 1978].

Les miroirs à conjugaison de phase travaillant en mélange à quatre ondes dégénérées utilisent des matériaux présentant une non-linéarité. L'exemple type est le milieu de susceptibilité diélectrique d'ordre trois² (χ^3) mais d'autres non-linéarités peuvent être exploitées. En particulier l'effet photoréfractif, sensible à l'énergie accumulée et non à l'intensité lumineuse, comme d'autres effets non-linéaires, permet d'obtenir par mélange à quatre ondes dégénéré une onde conjuguée à l'aide de faisceaux de très faible puissance : de l'ordre du milliwatt [HUIGNARD et al. 1979] [FEINBERG et al. 1980] [FEINBERG and HELLWARTH 1980] et même microwatt [WHITE et al. 1982].

récente dont le miroir principal est constitué, soit de multiples facettes hexagonales, soit d'une seule pièce (8m de diamètre pour le Very Large Telescope de l'Agence Spatiale Européenne) mais d'épaisseur faible pour permettre sa déformation, le tout monté sur des vérins.

¹ L'hologramme est sous forme d'un réseau d'une grandeur physique que l'on est capable de moduler : soit l'indice de réfraction, soit l'absorption ou autre.

² Kerr-like medium.

2. L'hologramme statique

L'holographie statique permet de construire un miroir adapté à un front d'onde complexe [KOGELNIK 1965]. Il suffit d'enregistrer l'hologramme (voir figure I.2.1.a) de ce front d'onde en utilisant une référence plane. L'onde de lecture, plane, va diffracter sur l'hologramme et donner dans l'ordre un de diffraction la conjuguée de l'onde signal du départ (voir figure I.2.1.b).

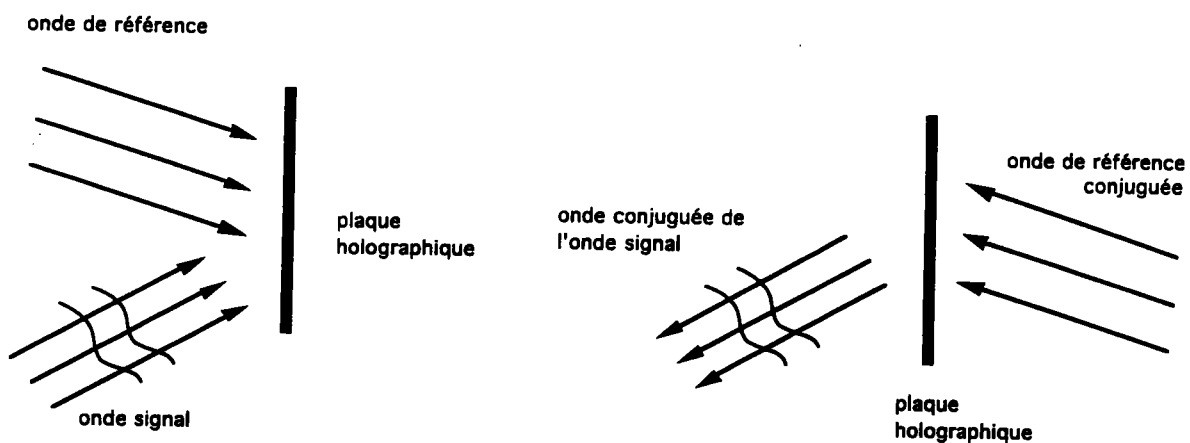


Figure I.2.1.a. Enregistrement de l'hologramme avec une référence plane.
b. lecture de l'hologramme et obtention de la conjuguée de l'onde signal

Pourtant cette méthode reste limitée par le fait que cet hologramme est statique, c'est à dire que s'il convient parfaitement pour conjuguer une onde signal quelconque, il ne convient que pour conjuguer celle-là : il faut autant d'hologrammes différents que de fronts d'onde différents. La réalisation d'hologrammes enregistrables, effaçables, ré-enregistrables et pouvant évoluer en temps réel est possible par application du concept du mélange à quatre ondes soit dans les milieux non-linéaires du troisième ordre (Kerr) soit dans les cristaux photoréfractifs. [STAEBLER and AMODEI 1972] [VON DER LINDE and GLASS 1975] [FISCHER et al. 1981].

3. Le mélange à quatre ondes dans les milieux de type Kerr (χ^3)

3.1. Principe du mélange à quatre ondes

Le principe du mélange à quatre ondes¹ dans un milieu non-linéaire est le suivant : en faisant interagir trois ondes dans le milieu, une onde signal et deux pompes, on en génère une quatrième, qui est la conjuguée de l'onde signal. Le

¹ En anglais, on utilise l'abréviation FWM (Four Wave Mixing).

schéma général est décrit à la figure I.3.1. Les deux faisceaux pompes (faisceaux 1 et 2) sont contre-propageants et de forte intensité. Le faisceau 4 est le faisceau signal, d'intensité lumineuse faible, et faisant un angle 2θ avec les pompes. Le mélange est dit dégénéré lorsque les trois ondes incidentes sont à la même pulsation ω . Les ondes sont toutes les trois polarisées rectilignement dans la même direction. Avec ces hypothèses, le champ électrique complexe total a pour expression :

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \sum_{j=1}^4 A_j(\mathbf{r}) \exp(i\omega t - i\mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r})$$

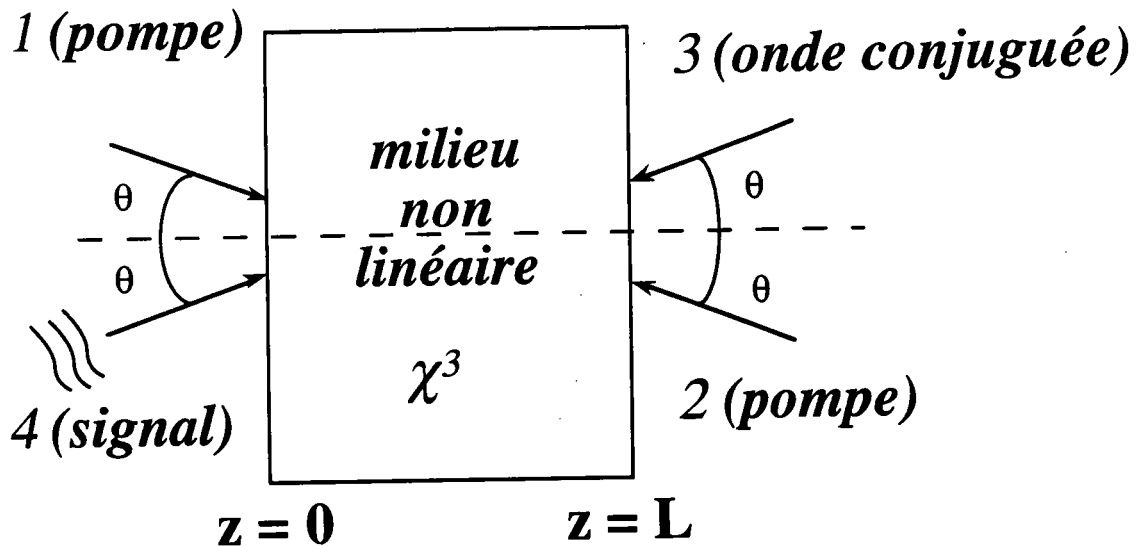


Figure I.3.1. Schéma du mélange à quatre ondes.

3.2. Les équations couplées du mélange à quatre ondes

Le développement de la polarisation diélectrique en fonction du champ électrique s'écrit sous la forme suivante :

$$\mathbf{P} = \chi^{(1)}\mathbf{E} + \chi^{(2)}\mathbf{E}^2 + \chi^{(3)}\mathbf{E}^3 + \dots \quad (\text{Eq. I.3.1})$$

dans laquelle $\chi^{(n)}$ représente le tenseur de susceptibilité diélectrique du n-ième ordre. Nous nous intéressons ici uniquement à l'influence du terme d'ordre 3. La prise en compte, dans l'équation de propagation, de l'ensemble des phénomènes physiques, conduit à des équations complètes complexes : en effet, outre les phénomènes d'absorption, il conviendrait d'inclure la modulation de phase (automodulation et intermodulation), les réseaux par réflexion, les réseaux par transmission ainsi que l'interaction à deux photons : chacune de ces contributions conduisant à une constante de couplage spécifique. Dans le cas où l'absorption est négligée, et où toutes les autres contributions citées ci-avant peuvent se résumer à une unique constante de couplage κ , l'équation d'onde conduit à un système d'équations couplées tel que :

$$\frac{dA_1}{dz} = -3i\kappa A_1 (|A_1|^2 + 2|A_2|^2) \quad (\text{Eq. I.3.2})$$

$$\frac{dA_2}{dz} = 3i\kappa A_2 (|A_2|^2 + 2|A_1|^2) \quad (\text{Eq. I.3.3})$$

$$\frac{dA_3}{dz} = 6i\kappa (A_3 (|A_1|^2 + |A_2|^2) + A_1 A_2 A_4^*) \quad (\text{Eq. I.3.4})$$

$$\frac{dA_4}{dz} = -6i\kappa (A_4 (|A_1|^2 + |A_2|^2) + A_1 A_2 A_3^*) \quad (\text{Eq. I.3.5})$$

La constante de couplage κ est proportionnelle à la susceptibilité non-linéaire d'ordre trois et à la fréquence des ondes [YARIV 1989]. La résolution de ces équations couplées peut se faire de manière simplifiée en négligeant l'affaiblissement des faisceaux pompes au cours de la propagation dans le milieu non-linéaire¹. On obtient alors :

$$A_3(0) = -i \left(\frac{\kappa^*}{|\kappa|} \tan|\kappa|L \right) A_4^*(0) \quad (\text{Eq. I.3.6})$$

On voit clairement que l'on obtient sur la face $z=0$ du cristal l'onde conjuguée de l'onde signal.

La résolution dans le cas général (c'est à dire en ne négligeant ni l'absorption ni l'affaiblissement des pompes) est plus délicate mais a été menée à bien numériquement par Guha et Conner en 1992 [GUHA and CONNER 1992].

4. Le mélange à deux ondes dans les photoréfractifs

Le mélange à deux ondes², détaillé dans ce paragraphe, est une configuration réalisant un transfert d'énergie entre deux faisceaux optiques, ce qui constitue en fait une amplification optique : la pompe apporte l'énergie au faisceau signal qui conserve sa phase et se trouve être amplifié. [GUNTER 1982] [KLEIN and VALLEY 1985] [BECKWITH et al. 1989] [FAINMAN et al. 1986].

Il ne s'agit pas d'une configuration qui permet, en tant que telle, de générer une onde conjuguée. Toutefois, il nous paraît important de la présenter ici pour deux raisons : tout d'abord parce que l'on peut, dans certaines conditions, combiner le mélange à quatre ondes dégénéré (dans les milieux photoréfractifs) et le mélange à deux ondes de manière à obtenir des réflectivités de miroirs à conjugaison de phase dépassant l'unité [FEINBERG and HELLWARTH 1980] ; et ensuite parce que Lam utilise le mélange à deux ondes pour expliquer le fonctionnement du miroir CAT [LAM 85].

¹ Dans la littérature cette hypothèse porte le nom suivant : the undepleted pump approximation.

² En anglais, on utilise l'abréviation TWM (Two Wave Mixing)

4.1. Principe du mélange à deux ondes

Le montage du mélange à deux ondes est décrit à la figure I.4.1 : deux faisceaux cohérents interfèrent dans un cristal photoréfractif. Le premier est de forte puissance, on l'appelle le "faisceau pompe" car il apporte l'énergie ; il est incliné d'un angle $-\theta$ (à l'intérieur du cristal). Le second, de puissance plus faible, contient une information sous forme d'une modulation de la phase, c'est le "faisceau signal", incliné d'un angle $+\theta$ (à l'intérieur du cristal). Les interférences constituent un réseau d'illumination.

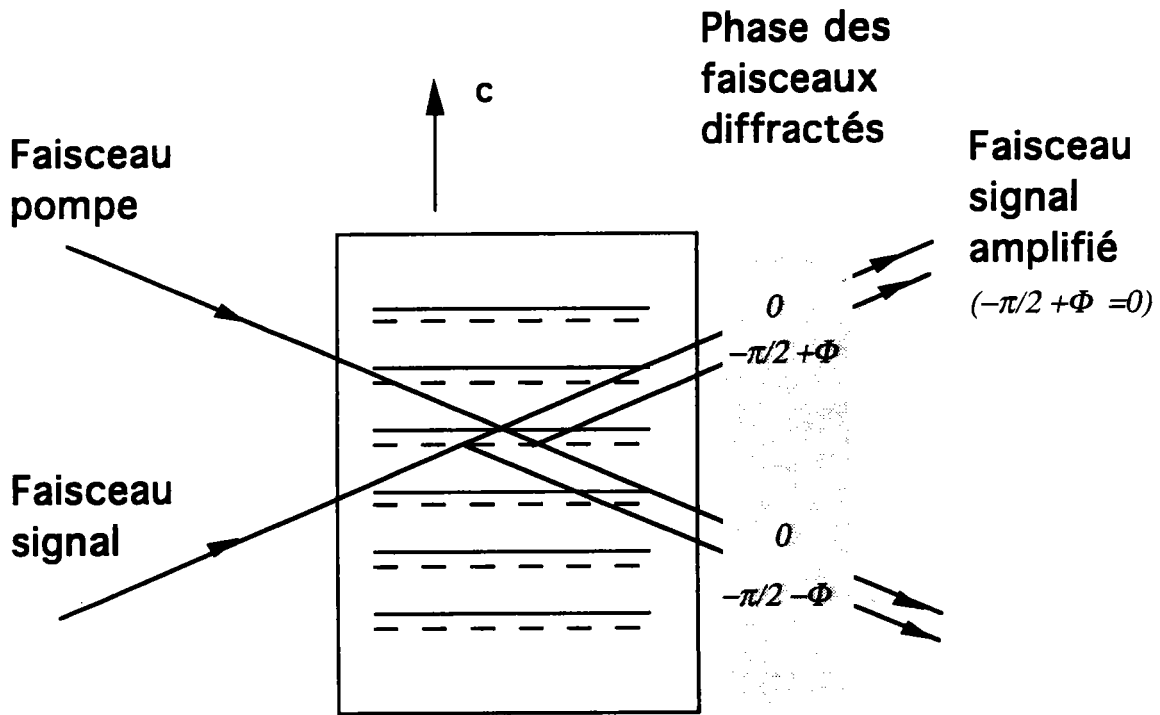


Figure I.4.1. Mélange à deux ondes ; Φ est le déphasage entre le réseau d'indice et le réseau d'illumination

Ce réseau d'illumination induit par effet photoréfractif un réseau d'indice. On appellera Φ le déphasage entre le réseau d'indice et le réseau d'illumination. Ce réseau est alors lu par le faisceau pompe qui transfère une partie de son énergie sur le faisceau signal.

La figure I.4.1 explique qualitativement pourquoi le transfert est unidirectionnel : le déphasage Φ joue ici un rôle fondamental ; en effet, les faisceaux diffractés subissent un déphasage de $-\pi/2$ (dû à la diffraction en elle-même), auquel il faut ajouter $+\Phi$ (pour la pompe diffractée) ou $-\Phi$ (pour le signal diffracté). Lorsque $\Phi = \pi/2$ (ce que l'on obtient lorsque les charges se sont déplacées sous l'effet de la seule diffusion, sans entraînement¹ ni effet photovoltaïque, comme dans le cas du titanate de baryum par exemple), le

¹ On trouvera souvent dans la littérature "drift" à la place d'"entraînement".

couplage est optimal car la pompe diffractée dans la direction du signal se retrouve en phase avec ce dernier et les deux interfèrent de manière constructive.

En revanche, sur l'autre sortie, on est en présence d'interférences destructrices. D'où la dissymétrie du transfert [GUNTER and HUIGNARD 1988].

4.2. Gain du mélange à deux ondes

L'amplification est caractérisée par le gain [GUNTER and HUIGNARD 1988] :

$$G = \frac{I_s^{ump}}{I_s} = \frac{(1 + R)\exp((\Gamma - \alpha)L)}{R + \exp(\Gamma L)}$$

avec :

- Γ : le facteur de gain en cm^{-1}
- α : le coefficient d'absorption du cristal en cm^{-1}
- L : la longueur d'interaction des faisceaux dans le cristal
- I_s : l'intensité du faisceau signal incident
- I_s^{ump} : l'intensité du faisceau signal amplifié
- R : rapport des intensités du faisceau pompe et du faisceau signal

5. Le mélange à quatre ondes dégénéré dans les photoréfractifs

5.1. Les débuts du FWM

Hellwarth a été un pionnier du mélange à quatre ondes dégénéré, qu'il a mis en évidence en 1977 [HELLWARTH 1977] et qui a été formalisée par Yariv et Pepper [YARIV and PEPPER 1977]. L'analogie entre le mélange à quatre ondes dégénéré et l'holographie dynamique est apparu alors rapidement [YARIV 1978]. L'effet photoréfractif, sensible à l'énergie accumulée et non à l'intensité lumineuse, comme d'autres effets non-linéaires, permet d'obtenir par mélange à quatre ondes dégénéré une onde conjuguée à l'aide de faisceaux de très faible puissance : de l'ordre du milliwatt [HUIGNARD et al. 1979] [FEINBERG et al. 1980] et même microwatt [WHITE et al. 1982]. En 1980, Feinberg et Hellwarth [FEINBERG and HELLWARTH 1980], publient les premières observations de génération d'une onde conjuguée en continu avec une réflectivité supérieure à l'unité. L'expérience a été faite à la température ambiante avec un cristal de titanate de baryum en configuration de mélange à quatre ondes dégénéré¹. Un premier

¹ Le qualificatif "dégénérées" signifie ici que toutes les ondes sont à la même pulsation ω .

faisceau pompe génère un hologramme de volume et de phase avec le faisceau d'écriture, tandis qu'un second faisceau pompe, ou faisceau de lecture, conjugué du premier, diffracte sur l'hologramme et produit le conjugué du faisceau signal. De plus, en prenant tous les faisceaux en polarisation extraordinaire, il est possible d'ajouter au phénomène de mélange à quatre ondes celui du mélange à deux ondes (transfert d'énergie) de manière à augmenter encore la réflectivité.

5.2. La mise en équation du FWM

En 1981, Baruch Fischer et al. [FISCHER et al. 1981], sur la base des travaux de Yariv et Pepper [YARIV and PEPPER 1977], proposent les équations couplées de mélange non-linéaire (à quatre ondes) correspondant à l'holographie "temps réel". Il s'agit en fait d'un mélange à quatre ondes dégénérées dont la géométrie est décrite à la figure I.6.1. Toutes les ondes sont supposées avoir la même polarisation et seul le régime permanent est étudié. En prenant le champ électrique des ondes sous la forme [FISCHER et al. 1981] :

$$\mathbf{E}_j(\mathbf{r}, t) = A_j(\mathbf{r}) \exp(i(\mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r} - \omega t)) \quad (\text{Eq. I.5.1})$$

l'indice de réfraction résultant de la superposition des différentes ondes peut s'écrire sur la base des indices n_j et des déphasages Φ_j des réseaux inscrits :

$$\begin{aligned} n = n_0 &+ \frac{n_I e^{i\Phi_I}}{2} \frac{A_1^* A_4 + A_3^* A_2}{I_0} \exp(i\mathbf{k}_I \cdot \mathbf{r}) + c.c. \\ &+ \frac{n_{II} e^{i\Phi_{II}}}{2} \frac{A_2^* A_4 + A_3^* A_1}{I_0} \exp(i\mathbf{k}_{II} \cdot \mathbf{r}) + c.c. \\ &+ \frac{n_{III} e^{i\Phi_{III}}}{2} \frac{A_2^* A_1}{I_0} \exp(i\mathbf{k}_{III} \cdot \mathbf{r}) + c.c. \\ &+ \frac{n_{IV} e^{i\Phi_{IV}}}{2} \frac{A_3^* A_4}{I_0} \exp(i\mathbf{k}_{IV} \cdot \mathbf{r}) + c.c. \end{aligned} \quad (\text{Eq. I.5.2})$$

où :

$$\begin{aligned} \mathbf{k}_I &= \mathbf{k}_4 - \mathbf{k}_1 = \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_3 \\ \mathbf{k}_{II} &= \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_3 = \mathbf{k}_4 - \mathbf{k}_2 \\ \mathbf{k}_{III} &= 2\mathbf{k}_I \\ \mathbf{k}_{IV} &= 2\mathbf{k}_4 \end{aligned} \quad (\text{Eq. I.5.3})$$

Les constantes complexes $n_j e^{i\Phi_j}$ où les n_j sont réels positifs et les déphasages Φ_j sont réels, représentent les hologrammes de volume générés par les différents faisceaux grâce à l'effet photoréfractif. Ils sont calculés en cherchant la solution des processus physiques responsables de la formation d'hologrammes.

Les processus physiques donnant naissance à des réseaux photoréfractifs

trouvent leur origine dans la modulation spatiale de la distribution de charges électriques produite par illumination. Cette distribution inhomogène de charges induit un champ électrique d'espace modulant spatialement, via l'effet électrooptique l'indice de réfraction du milieu.

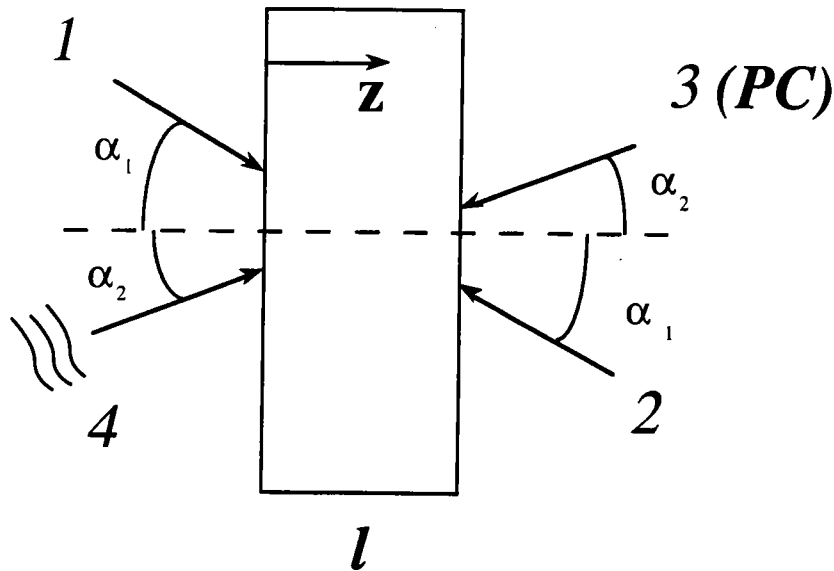


Figure I.5.1. Modèle de Fischer et al. de mélange à quatre ondes.

En accord avec les modèles de Kukhtarev et al. [KUKHTAREV et al. 1979] et de Feinberg et al. [FEINBERG et al 1980] les grandeurs n_I et Φ_I s'écrivent :

$$n_I = -r_{eff} n_0^3 \mathbf{E}_p \left[\frac{(\mathbf{E}_0^2 + \mathbf{E}_d^2)}{\mathbf{E}_0^2 + (\mathbf{E}_d + \mathbf{E}_p)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Eq. I.5.4})$$

$$\tan(\Phi_I) = \frac{\mathbf{E}_d (\mathbf{E}_d + \mathbf{E}_p) + \mathbf{E}_0^2}{\mathbf{E}_0 \mathbf{E}_p}$$

r_{eff} est le coefficient électrooptique efficace intervenant dans le réseau I,
 $\mathbf{E}_p = e p_d / (\epsilon k_I)$ est le champ de charge d'espace maximal avec p_d densité de pièges
 et ϵ la permittivité diélectrique,
 \mathbf{E}_d est le champ de diffusion,
 \mathbf{E}_0 un champ électrique appliqué dans la direction de \mathbf{k}_I .

On en déduit, à partir de l'équation scalaire des ondes et en faisant l'hypothèse des variations lentes des champs, les quatre équations couplées suivantes :

$$\frac{2c}{\omega} \cos(\alpha_1) \frac{dA_1}{dz} = -\frac{in_I e^{i\Phi_I}}{I_0} (A_4^* A_1 + A_2^* A_3) A_4 - \frac{in_{II} e^{i\Phi_{II}}}{I_0} (A_3^* A_1 + A_2^* A_4) A_3 - \frac{in_{III} e^{i\Phi_{III}}}{I_0} (A_2^* A_1) A_2 \quad (\text{Eq. I.5.5})$$

$$\frac{2c}{\omega} \cos(\alpha_1) \frac{dA_2}{dz} = \frac{in_I e^{-i\Phi_I}}{I_0} (A_1^* A_4 + A_3^* A_2) A_3 + \frac{in_{II} e^{-i\Phi_{II}}}{I_0} (A_1^* A_2 + A_4^* A_2) A_4 + \frac{in_{III} e^{-i\Phi_{III}}}{I_0} (A_1^* A_2) A_1 \quad (\text{Eq. I.5.6})$$

$$\frac{2c}{\omega} \cos(\alpha_2) \frac{dA_3}{dz} = \frac{in_I e^{i\Phi_I}}{I_0} (A_4^* A_1 + A_2^* A_3) A_2 + \frac{in_{II} e^{-i\Phi_{II}}}{I_0} (A_1^* A_3 + A_4^* A_2) A_1 + \frac{in_{IV} e^{-i\Phi_{IV}}}{I_0} (A_4^* A_3) A_4 \quad (\text{Eq. I.5.7})$$

$$\frac{2c}{\omega} \cos(\alpha_2) \frac{dA_4}{dz} = -\frac{in_I e^{-i\Phi_I}}{I_0} (A_1^* A_4 + A_3^* A_2) A_1 - \frac{in_{II} e^{i\Phi_{II}}}{I_0} (A_3^* A_1 + A_2^* A_4) A_2 - \frac{in_{IV} e^{i\Phi_{IV}}}{I_0} (A_3^* A_4) A_3 \quad (\text{Eq. I.5.8})$$

avec :

$$I_0 = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \quad (\text{Eq. I.5.9})$$

Lorsque A_3 et A_2 sont nuls, on retrouve le mélange à deux ondes. Le sens du transfert d'énergie dépend alors du déphasage Φ_1 . Dans le cas du mélange à quatre ondes, une simplification va permettre de mener à bien le calcul : seule la modulation d'indice n_1 sera supposée non-nulle (prédominance d'un réseau d'indice pour le mélange d'ondes).

5.3. La résolution des équations du FWM

Compte tenu des hypothèses précédentes, on peut mettre ces équations couplées sous la forme suivante :

$$\frac{dA_1}{dz} = -\gamma \frac{(A_4^* A_1 + A_2^* A_3) A_4}{I_0} \quad (\text{Eq. I.5.10})$$

$$\frac{dA_2^*}{dz} = -\gamma \frac{(A_4^* A_1 + A_2^* A_3) A_3^*}{I_0} \quad (\text{Eq. I.5.11})$$

$$\frac{dA_3}{dz} = \gamma \frac{(A_4^* A_1 + A_2^* A_3) A_2}{I_0} \quad (\text{Eq. I.5.12})$$

$$\frac{dA_4^*}{dz} = -\gamma \frac{(A_4^* A_1 + A_2^* A_3) A_1^*}{I_0} \quad (\text{Eq. I.5.13})$$

avec :

$$I_0 = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \quad \text{et} \quad \gamma = \frac{i\omega n_1 \exp(-i\Phi_1)}{2c \cos(\alpha_1)} = ia \exp(i\Phi) \quad (\text{Eq. I.5.14})$$

Fischer a résolu ces équations en faisant l'approximation qui consiste à négliger l'affaiblissement des faisceaux pompes¹ dans le processus de transfert d'énergie

¹ "The undepleted pump approximation"

[FISCHER et al. 1981]. Les équations précédentes se résument alors en :

$$\frac{2c}{\omega} \cos(\alpha_2) \frac{dA_3}{dz} = \frac{in_1 e^{i\Phi_1}}{I_0} \left(|A_2|^2 A_3 + (A_1 A_2) A_4^* \right) \quad (\text{Eq. I.5.15})$$

$$\frac{2c}{\omega} \cos(\alpha_2) \frac{dA_4^*}{dz} = \frac{in_1 e^{i\Phi_1}}{I_0} \left(|A_1|^2 A_4^* + (A_1 A_2)^* A_3 \right) \quad (\text{Eq. I.5.16})$$

En utilisant les conditions aux limites $A_3(l) = 0$ et $A_4(0) = 0$, où l est la dimension longitudinale de l'échantillon, les champs A_3 et A_4 s'écrivent :

$$A_3(z) = A_4^*(0) \frac{A_1}{A_2^* (r^{-1} e^{-\gamma} + 1)} (e^{-\gamma(z-l)} - 1) \quad (\text{Eq. I.5.17})$$

$$A_4^*(z) = A_4^*(0) \frac{1}{r^{-1} e^{-\gamma} + 1} (r^{-1} e^{-\gamma(z-l)} + 1)$$

où r est le rapport des intensités des pompes $I_2 / I_1 = A_2 A_2^* / A_1 A_1^*$ et $\gamma = i\omega n_1 e^{i\Phi_1} / 2c \cos(\alpha_2)$.

On peut ainsi calculer la réflectivité de ce miroir à conjugaison de phase :

$$R = \left| \frac{A_3(0)}{A_4^*(0)} \right|^2 = \left| \frac{\sinh\left(\frac{\gamma l}{2}\right)}{\cosh\left(\frac{\gamma l}{2} + \frac{\ln r}{2}\right)} \right|^2 \quad (\text{Eq. 1.5.18})$$

On peut aussi calculer le pouvoir de transmission du dispositif :

$$T = \left| \frac{A_4(l)}{A_4^*(0)} \right|^2 = \left| \frac{\exp\left(\frac{\gamma l}{2}\right) \cosh\left(\frac{\ln(r)}{2}\right)}{\cosh\left(\frac{\gamma l}{2} + \frac{\ln r}{2}\right)} \right|^2 \quad (\text{Eq. 1.5.19})$$

On constate que dans ces expressions n'interviennent que la quantité γl , qui est indépendante de l'intensité, et r qui est le rapport entre les intensités de pompe.

Dans le cas où il n'y a pas de drift, le déphasage Φ vaut $\pi/2$ et dans ce cas, une réflectivité supérieure à l'unité ne peut être atteinte qu'avec des pompes d'intensités très différentes l'une de l'autre.

En 1982, Cronin-Golomb propose une résolution des équations qui ne néglige plus l'affaiblissement des faisceaux pompes [CRONIN-GOLOMB et al. 1982]. Il remarque qu'il est possible de découpler les équations grâce à la conservation des quantités suivantes :

$$d_1 = I_1 + I_4 \quad (\text{Eq. I.5.20})$$

$$d_2 = I_2 + I_3 \quad (\text{Eq. I.5.21})$$

$$c = E_1 E_2 + E_3 E_4 \quad (\text{Eq. I.5.22})$$

l'on obtient alors :

$$\frac{E_1(z)}{E^*_2(z)} = - \frac{(\Delta-r)D \exp(\mu z) - (\Delta+r) \exp(-\mu z)}{2c^*(D \exp(\mu z) - \exp(-\mu z))} \quad (\text{Eq. I.5.23})$$

$$\frac{E_3(z)}{E^*_4(z)} = \frac{(\Delta-r)E \exp(\mu z) - (\Delta+r) \exp(-\mu z)}{2c^*(E \exp(\mu z) - \exp(-\mu z))} \quad (\text{Eq. I.5.24})$$

avec :

$$\Delta = d_2 - d_1 \quad (\text{Eq. I.5.25})$$

$$r = \sqrt{\Delta^2 + 4cc^*} \quad (\text{Eq. I.5.26})$$

$$\mu = \frac{\gamma r}{2I_0} \quad (\text{Eq. I.5.27})$$

D et E sont des constantes d'intégration.

En appliquant les conditions aux limites adéquates, on parvient à la solution exacte des équations du mélange à quatre ondes dégénérées dans les milieux photoréfractifs. En particulier, la réflectivité du miroir a pour expression :

$$R = \left| \frac{-2c \tan(\mu L)}{\Delta \tan(\mu L) + (\Delta^2 + 4|c|^2)^{\frac{1}{2}}} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Eq. I.5.28})$$

5.4. Variantes du système à quatre ondes photoréfractif

On trouve une vue d'ensemble des différentes variantes du miroir à conjugaison de phase dans les photoréfractifs dans la référence [GUNTER and HUIGNARD 1988] ; on les retrouve schématisées à la figure I.5.2.

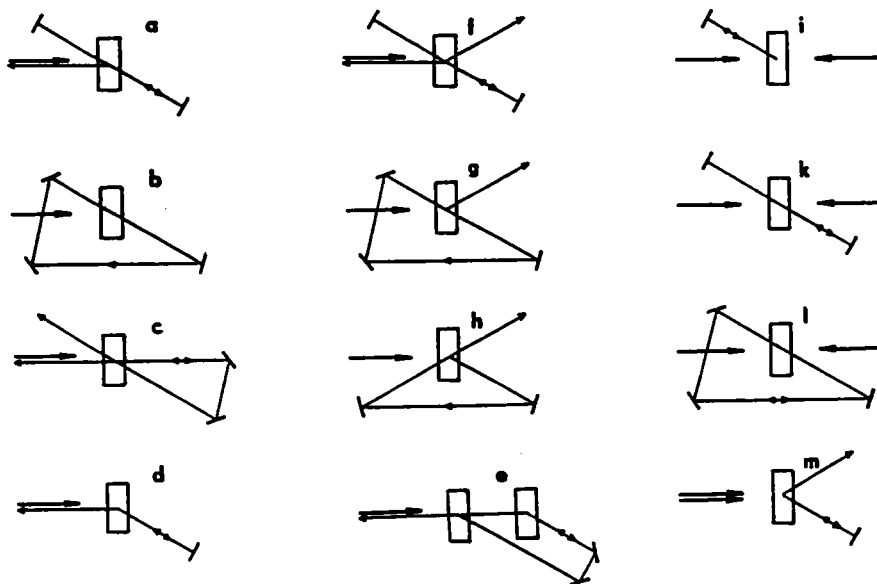


Figure I.5.2. Différentes variantes de miroir à conjugaison de phase photoréfractif.

5.5. TWM dans les milieux de type Kerr et dans les photoréfractifs : analogies et différences.

Les équations couplées du mélange à quatre ondes dans les milieux de type Kerr (χ^3) présentent une analogie formelle avec celles du mélange à quatre ondes dans les photoréfractifs. Toutefois, dans le cas du χ^3 , la constante de couplage est réelle, ce qui indique que le réseau d'indice est en phase avec le réseau d'illumination [YARIV 1977] [GOWER and PROCH 1994] ; dans le cas des photoréfractifs, la constante de couplage est complexe et la partie imaginaire contribue, par le biais du mélange à deux ondes, à amplifier le signal au détriment de la pompe. De plus les photoréfractifs sont sensibles à l'énergie accumulée et non pas à la puissance incidente, ce qui permet de les utiliser avec des puissances incidentes beaucoup plus faibles que celles nécessaires pour exploiter d'autres non-linéarités.

6. La conjugaison de phase par Diffusion Brillouin Stimulée

Ainsi que nous l'avons mentionné précédemment, la diffusion Brillouin permet aussi d'obtenir de la conjugaison de phase ; Zel'dovich a été l'un des pionniers dans ce domaine puisqu'il mit en évidence cette propriété dès 1972 [ZELDOVICH et al. 1972]. Deux manières différentes sont possibles : soit par mélange à quatre ondes (dans un schéma très proche de celui présenté à la figure I.3.1. mais avec tous les angles nuls, c'est à dire que les quatre faisceaux sont colinéaires), soit de manière autopompée par diffusion Brillouin Stimulée¹. La première méthode a l'avantage de permettre de travailler avec des faisceaux de relativement faible puissance tandis que la seconde, si elle nécessite des puissance élevées, ne requiert en revanche pas de faisceaux pompes : il s'agit bien de conjugaison de phase autopompée.

Dans le cas du mélange à quatre ondes, pour que l'interaction Brillouin se mette en place, il faut deux faisceaux laser à des fréquences légèrement différentes (mélange non dégénéré), ce qui donne naissance à des ondes acoustiques dans le milieu (à une fréquence qui est la différence des deux fréquences optiques). Le processus est instable et l'onde acoustique augmente exponentiellement au cours du temps ; aussi obtient-on des réflectivités énormes (10^7 ! Voir par exemple [ACKERMAN and LEBOW, 1989]) de cette manière.

¹ SBS en anglais : Stimulated Brillouin Scattering.

7. Les miroirs autopompés utilisant des cristaux photoréfractifs

7.1. Oscillateurs à conjugaison de phase photoréfractifs autopompés

Dans le cas du mélange à quatre ondes de base, le miroir ne peut fonctionner sans la participation de deux faisceaux pompes additionnels. On appelle miroir à conjugaison de phase autopompé un miroir qui ne nécessite plus les pompes externes. Différentes configurations sont rappelées à la figure I.7.1. [GUNTER and HUIGNARD 1988].

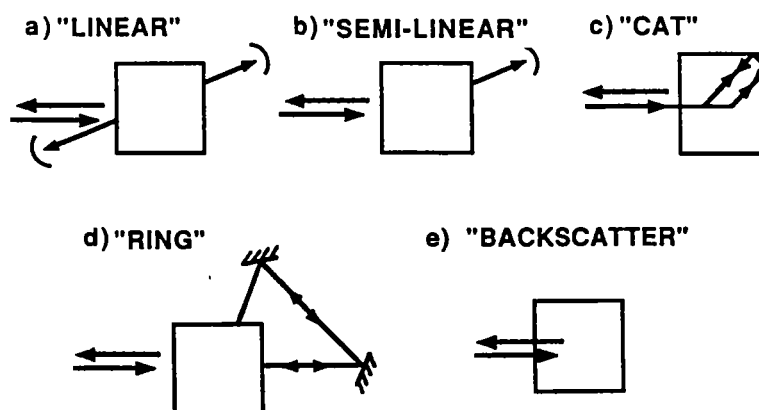


Figure I.7.1. Différentes géométries de miroirs autopompés.

D'une manière ou d'une autre, une partie de la lumière incidente est réfléchie, soit à l'aide d'un (ou plus) miroir externe, soit par réflexions internes dans l'échantillon, soit par rétrodiffusion sur un hologramme par réflexion inscrit par modulation d'indice de réfraction à l'intérieur du cristal.

7.2. Les débuts du miroir CAT avec le titanate de baryum

En 1981 Feinberg [FEINBERG 82-1] observe sur un échantillon de titanate de baryum monodomaine un phénomène de défocalisation asymétrique ; il

l'appelle à l'époque "asymétric self defocusing"¹ mais plus tard, on utilisera l'expression "beam fanning"². Un phénomène du même genre (mais ne présentant pas ce caractère fortement asymétrique) avait déjà été observé dans des diélectriques, mais pour des valeurs très élevées de l'intensité du faisceau lumineux. Dans le titanate de baryum, cette défocalisation très asymétrique est nouvelle. Feinberg a modélisé le phénomène en supposant une photoexcitation des porteurs de charge, plus intense dans les régions les plus éclairées que dans les régions les plus sombres, provoquant la génération d'un champ électrique de charges d'espace décentré par rapport au faisceau incident. La variation d'indice de réfraction induite par effet Pockels est elle-même décentrée, ce qui provoque une courbure du rayon lumineux vers les zones d'indice élevé.

En 1982 Feinberg, sur la base du phénomène de fanning, réalise le premier miroir à conjugaison de phase autopompé utilisant un cristal de titanate de baryum en configuration CAT³ [FEINBERG 1982-2]. La géométrie du dispositif est représentée à la figure I.7.2. Le miroir ne nécessite plus les deux faisceaux pompes comme dans la configuration traditionnelle mais fonctionne avec le seul faisceau incident (faisceau signal).

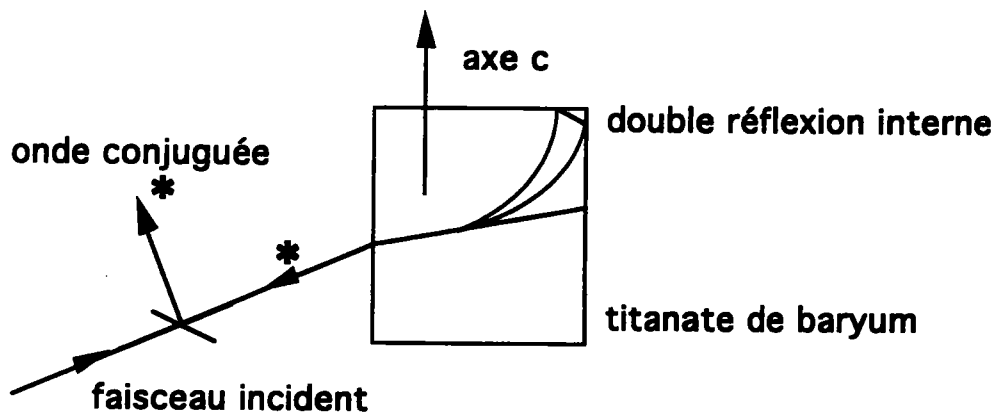


figure 7. Le miroir à conjugaison de phase autopompé en configuration CAT.

Le faisceau incident entre dans l'échantillon et une partie de la lumière "fanne" vers le coin +c de la face arrière, ce qui crée, après une double réflexion à l'intérieur de ce coin, une boucle de lumière à l'intérieur de l'échantillon. L'onde conjuguée se superpose à l'onde incidente et une lame séparatrice permet de la mettre en évidence.

¹ Ce qui signifie que le faisceau incident se défocalise de manière asymétrique au passage dans le cristal.

² Même en français !

³ Cette configuration est restée dans la littérature sous le nom de CAT car Feinberg l'aurait testée, pour la première fois, avec une image représentant un chat.

7.3. D'autres cristaux fonctionnent en miroir CAT

Quatre ans plus tard, Salamo et al. réalisent un miroir CAT à base de SBN60¹. Ils obtiennent à 442nm des réflectivités de l'ordre de 60% avec un cristal pur et de 30% avec un cristal dopé au cérium [SALAMO et al. 1986]. Puis, la même équipe réitère avec un cristal de SBN75 dopé au cérium [MILLER et al. 1987]. La réflectivité obtenue est de l'ordre de 6% avec un temps de réponse de 8s pour une puissance incidente de 200 mW/cm² à 442 nm (HeCd). Toujours en 1987, ils obtinrent des réflectivités de l'ordre de 30% avec un montage utilisant un cristal de BSKNN:Ce [RODRIGUEZ et al. 1987].

Rytz et De Zhong mettent au point un miroir à conjugaison de phase autopompé avec deux miroirs externes mettant en œuvre un cristal de niobate de potassium [RYTZ and DE ZHONG 1989]. La réflectivité dépend de la température et sa valeur maximale est de 26% à 124°C. La variation du temps de réponse en fonction de la température est de la forme $1/(T-56^{\circ}\text{C})$.

Zhang et al. obtiennent en 1990 des réflectivités de 74% (pour un temps de réponse de l'ordre de 30s) avec un échantillon de niobate de potassium dopé au fer [ZHANG et al. 1990]. L'échantillon est taillé de manière toute particulière de manière à obtenir des réflexions internes générant un réseau photo-induit à 45° par rapport à l'axe c. L'évolution du temps d'établissement (entre 30 et 500s) de l'onde conjuguée est étudiée expérimentalement en fonction de la puissance incidente.

Yue et al. mettent en évidence de la conjugaison de phase autopompée obtenue à l'aide d'un cristal de KNSBN à 633nm [YUE et al. 1990]. Des réflectivités maximales de 40% ont été observées. Les auteurs étudient l'influence de l'angle d'incidence sur la réflectivité et de l'intensité incidente sur le temps de réponse.

En 1992, Yu et al. présentent les résultats expérimentaux d'un miroir à conjugaison de phase autopompé obtenu avec un cristal de KNSBN:Co [YU et al. 1992]. Ils obtiennent une réflectivité maximale de 73%. Le temps de réponse dépend de l'intensité incidente. En 1993, Yue et al. proposent une variante avec un cristal de SBN éclairé par la face -c [YUE et al. 1993].

En 1994, He et al. publient des résultats obtenus avec un cristal de niobate de potassium dopé au fer. La taille toute particulière de l'échantillon permet d'obtenir à l'intérieur de ce dernier un anneau de lumière, qui génère un réseau de diffraction par réflexion [HE et al. 1994].

¹ On trouvera au début de ce rapport un rappel des symboles utilisés, en particulier pour désigner les différents cristaux.

7.4. Autres configurations de miroirs autopompés

White et al. [WHITE et al. 1982] proposent d'autres nouvelles configurations mettant en œuvre un cristal de titanate de baryum :

- un oscillateur utilisant 2 miroirs normaux et pompé par 2 faisceaux fournissant le gain
- un oscillateur utilisant 2 miroirs normaux mais 1 seul faisceau pompe
- un oscillateur constitué d'un anneau unidirectionnel pompé par un seul faisceau
- un oscillateur en anneau pompé par deux faisceaux contre-propageants.

En 1991, Vainos et Gower mettent au point un dispositif permettant de retrouver en temps réel une image orthoscopique de haute qualité et très stable. Le montage utilise un miroir à base de titanate de baryum dans lequel s'effectue deux conjugaisons de phase simultanées et sur deux ondes qui sont elles mêmes conjuguées entre elles [VAINOS and GOWER 1991].

En 1994, des chercheurs japonais [HONDA and MATSUMOTO 1994] réalisent un miroir à conjugaison de phase basé sur un anneau d'un nouveau type intégrant un cristal de niobate de potassium dans lequel est créé un réseau de réflexion.

8. Le miroir CAT en titanate de baryum

8.1. Comportement temporel : "chaos" et instabilités

Le comportement temporel de l'onde conjuguée générée par un miroir de type CAT avec un cristal de titanate de baryum est, selon les paramètres et la configuration expérimentale, très surprenant. Les expériences données dans la suite cernent les principales caractéristiques.

Dès 1984, Valley et Dunning observent un comportement de type chaotique [VALLEY and DUNNING 1984]. Ils font mention du soin tout particulier dont ils ont fait preuve pour s'assurer que le chaos n'a pas pour origine un bruit thermique ou autre mais provient bien du résonateur lui-même.

En 1985, Günter et al. rapportent également des oscillations et des comportements chaotiques dans le fonctionnement d'un miroir CAT à base d'un cristal de titanate de baryum [GUNTER et al. 1985]. La fréquence des oscillations peut varier dans de grandes proportions en faisant varier la puissance du faisceau incident. Des essais ont été faits d'ajouter un faisceau

supplémentaire près de l'entrée, ce qui permet de diminuer le temps d'établissement du phénomène autopompé d'un facteur cinq ou plus.

Smout et al. remarquent que la fréquence des oscillations, ainsi que leur forme, dépend fortement de la position transversale du point d'incidence ainsi que de l'angle d'incidence [SMOUT et al. 1986]. De plus, un décalage en fréquence de quelques Hertz entre l'onde incidente et conjuguée est mis en évidence.

En 1990, Dunning et al. étudient l'influence d'un faisceau d'effacement (incohérent à 488 nm) sur le fonctionnement d'un miroir CAT réalisé à l'aide d'un cristal de titanate de baryum, dopé au cobalt d'une part, et pur d'autre part, illuminé à 514.5nm [DUNNING et al. 1990]. Il a été possible de jouer ainsi sur la stabilité de l'onde conjuguée.

L'équipe de Tchudi (Darmstadt) met en évidence que l'angle d'incidence ainsi que l'intensité du faisceau incident avaient une grande influence sur le comportement temporel [DENZ et al. 1990] [RAUSCH et al. 1992]. Ils mettent en œuvre une méthode qualitative d'analyse de dynamique non-linéaire (méthode de Grassberg-Procaccia) pour étudier et caractériser ces fluctuations ; les résultats indiquent qu'il s'agit d'un comportement de type chaos déterministe.

Hribeck et Gower présentent à leur tour une contribution expérimentale à l'étude de la stabilité de l'onde conjuguée obtenue par un miroir CAT à base d'un échantillon de titanate de baryum [HRIBECK and GOWER 1991]. La stabilité est étudiée en fonction des paramètres suivants : la puissance incidente, la position transversale du point d'incidence ainsi que l'angle d'incidence. On voit ainsi apparaître pour la première fois la notion de "cartographie" du comportement de l'échantillon.

8.2. Amélioration des performances du miroir CAT en BaTiO₃

Duning et al. ont montré en 1990 qu'il est possible d'améliorer la réflectivité du miroir CAT à l'aide d'un faisceau d'effacement incohérent à 488nm [DUNNING et al. 1990]. Le miroir est constitué d'un cristal de titanate de baryum travaillant lui à 514.5nm.

Suzuki et al. présentent en 1993 une manière d'améliorer le temps de réponse d'un miroir CAT [SUZUKI and SATO 1993]. Elle consiste à obtenir une amplification optique à l'intérieur du cristal à l'aide d'un faisceau additionnel.

La même année, Garrett et al. obtiennent à la fois une amélioration du temps de réponse et de la réflectivité d'un miroir réalisé à l'aide d'un cristal de titanate de baryum dopé au cobalt et taillé à 45° [GARRET et al. 1993].

9. La modélisation du miroir à conjugaison de phase autopompé de type CAT

9.1. Position du problème

Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction, le comportement du miroir à conjugaison de phase autopompé, et plus spécialement celui fonctionnant en configuration CAT, dépend d'un grand nombre de paramètres à la fois internes et externes.

Contrairement à ce qui se passe dans le miroir à conjugaison de phase avec des pompes contre-propageantes (voir figure I.5.1) dans lequel le concept de mélange à quatre ondes (FWM) est communément accepté pour expliquer l'origine de la conjugaison de phase photoréfractive, les systèmes autopompés font encore l'objet de nombreuses discussions quant à l'origine et aux mécanismes de la conjugaison d'une part, comme des comportements temporels d'autre part.

Deux modèles principaux sont utilisés pour expliquer la conjugaison de phase autopompée :

- Le modèle de Lam [LAM 1985] fondé sur un mécanisme de mélange à deux ondes qui présente des analogies avec le modèle de Zel'dovich [ZELDOVICH et al. 1972] de mélange stimulé à deux ondes contre-propageantes¹
- Le modèle de Mac Donald et Feinberg [MACDONALD and FEINBERG 1982] impliquant fanning du faisceau incident, double réflexion interne dans le coin opposé et création de deux régions couplées d'interaction où se produit un mélange à quatre ondes entraînant conjugaison.

Dans la suite, nous proposons de développer ces deux principaux modèles. Le lecteur plus curieux pourra trouver des informations complémentaires à celles des publications d'origine dans les deux ouvrages de Günter et Huignard [GUNTER and HUIGNARD 1988].

9.2. Modèle de mélange à deux ondes de Lam

Le point de départ de Lam s'appuie sur le modèle de transport de charges couplées proposé par Kukhtarev et al. [KUKHTAREV et al. 1979] dans lequel est apporté une modification essentielle dans le terme correspondant au transport photovoltaïque. L'injection dans l'équation de Kukhtarev d'un terme de la forme :

¹ "Stimulated Backward Scattering" ou "Stimulated Backward Two Wave Mixing".

$$\mathbf{j}_{ph} = pnN^+\hat{e} \quad (\text{Eq. I.9.1})$$

(où p est le coefficient photovoltaïque n et N^+ sont les densités de porteurs de charges et d'ions accepteurs \hat{e} est un vecteur unitaire le long de l'axe ferroélectrique c du cristal) correspond à un courant photovoltaïque de type Fridkin [FRIDKIN 1977].

J.F. Lam met en évidence que cet effet photoréfractif intervient, via le champ de charges d'espace E_{sc} , dans l'interaction entre les champs électriques E_p du faisceau incident et E_s du faisceau diffusé :

$$-\frac{\partial E_s}{\partial y} - \frac{i}{2k_s} \nabla^2 E_s = -\bar{g}|E_p|^2 E_s - \alpha_s E_s \quad (\text{Eq. I.9.2})$$

$$\frac{\partial E_p}{\partial y} - \frac{i}{2k_p} \nabla^2 E_p = -\bar{g}^*|E_s|^2 E_p - \alpha_p E_p \quad (\text{Eq. I.9.3})$$

où α_p et α_s sont les coefficients linéaires d'absorption de E_p et E_s , k_p et k_s sont les vecteurs d'onde des champs E_p et E_s et \bar{g} est un coefficient de couplage d'onde complexe tel que :

$$\bar{g} = \left(\frac{w}{2c}\right) \frac{ecs_e [N_D - N^+(0)]}{2\epsilon_0 \epsilon \Delta k} G(\theta) \frac{[\Gamma_{De}^2 + (\delta_p + \delta_n)^2]^{1/2}}{\left[(\delta^2 - \delta\delta_p - B)^2 + (\delta A - \delta_p \Gamma_{le} + \delta_n \Gamma_{Re})^2\right]^{1/2}} \exp(i(\sigma + \Phi)) \quad (\text{Eq. I.9.4})$$

avec :

$$G(\theta) = (n_e^4 r_{33} - 2n_0^2 n_e^2) \sin \theta \cos^2 \theta + n_0^4 r_{23} \sin^3 \theta \quad (\text{Eq. I.9.5})$$

$$(\sigma + \Phi) = \tan^{-1} \left(\frac{\delta_p + \delta_n}{\Gamma_{De}} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{\delta A - \delta_p \Gamma_{le} + \delta_n \Gamma_{Re}}{\delta^2 - \delta\delta_p - B} \right) \quad (\text{Eq. I.9.6})$$

$\delta_p = pN^+(0)\hat{c}\Delta k/e$ et $\delta_n = 2p\Gamma_p N_D \hat{c}P\Delta k/e\Gamma_{Re}$ sont les déphasages induits par l'effet photovoltaïque. Les autres notations sont celles du modèle de Kukhtarev [KUKHTAREV et al. 1979] [HUIGNARD and GUNTER 1988].

Les équations de couplage entre les champs E_p et E_s présentent exactement la même structure que celle trouvée dans :

- la diffusion Brillouin stimulée (SBS)
- la diffusion Raman stimulée (SRS)

[ZELDOVICH et al. 1985] [YARIV 1988] à la nuance près que le coefficient de couplage dépend des intensités des deux ondes contre-propageantes. Conformément aux explications de Zel'dovich, et comme cela est largement utilisé, même industriellement, dans les systèmes à conjugaison de phase SBS et SRS, l'interaction précédente donne lieu à la conjugaison de phase.

Deux facteurs importants plaident en faveur de ce modèle :

- la longueur d'interaction est maximisée à cause de la contre-propagation des deux ondes
- la sensibilité photoréfractive est considérablement augmentée compte tenu du très faible pas du réseau.

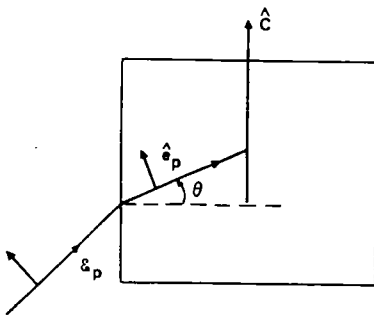


Figure I.9.1.

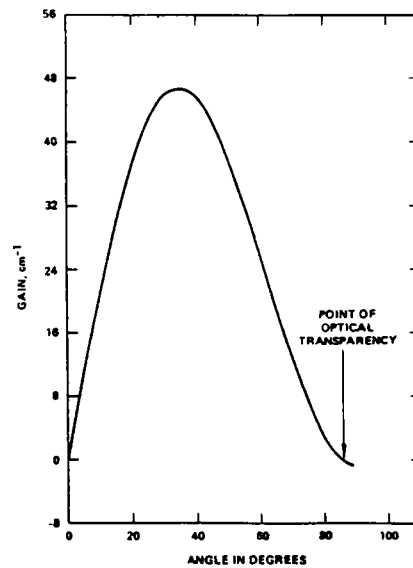


Figure I.9.2.

De plus, Chang et Hellwarth ont prouvé expérimentalement qu'il était possible d'obtenir dans du titanate de baryum une rétrodiffusion stimulée¹ générant une onde conjuguée, dans un schéma analogue à celui de la diffusion Brillouin stimulée SBS [CHANG and HELLWARTH 1985].

9.3. Le modèle de MacDonald et Feinberg

Le modèle de MacDonald-Feinberg est fondé sur les hypothèses suivantes :

- la conjugaison de phase prend naissance dans un processus de mélange à quatre ondes (FWM) conformément aux équations de couplage (Eq. I.5.11-14) données au paragraphe I.5.
- le phénomène de beam fanning, parfaitement visualisable dans l'échantillon, donne naissance à un faisceau (faisceau de fanning) subissant une double réflexion totale à l'intérieur d'un coin de

¹"Stimulated Back Scattering" : rétrodiffusion stimulée, à ne pas confondre avec la diffusion Brillouin stimulée (dont les initiales en anglais sont aussi SBS), bien que les deux présentent des analogies certaines. En effet, comme dans le cas de la diffusion Brillouin stimulée, il y a génération d'une structure périodique qui induit un réseau par réflexion dont le vecteur d'onde est colinéaire à la propagation). Toutefois, dans le cas du "Stimulated Back Scattering", la différence de fréquence entre le signal et son conjugué est inférieure à 1Hz [CHANG and HELLWARTH 1985] tandis que dans la diffusion Brillouin, la différence de fréquences est égale à la fréquence des ondes acoustiques stationnaires qui se créent dans le milieu [SCOTT and WAGGOTT 1987].

l'échantillon

– le parcours lumineux à l'intérieur de l'échantillon entraîne l'apparition de deux régions d'interaction dans lesquelles s'opère le mélange à quatre ondes photoréfractif, produisant la conjugaison de phase.

Ces différentes hypothèses sont résumées à la figure I.9.3 modélisant le trajet des faisceaux lumineux et mettant en évidence les deux régions d'interaction et de mélange à quatre ondes.

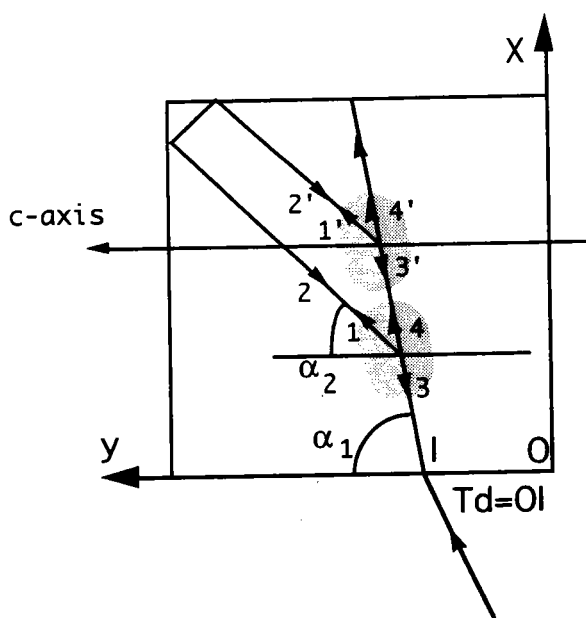


Figure I.9.3. Modèle du miroir à conjugaison de phase autopompé en configuration CAT. On y distingue les deux régions couplées dans lesquelles s'opère le mélange à quatre ondes.

Compte tenu des considérations simplificatrices suivantes :

- existence de deux régions d'interaction
- création par les ondes de deux réseaux équivalents dans les deux régions, donc de coefficients de couplage de même valeur dans les deux régions
- hypothèse d'angle de fanning identique et de valeur unique α_2 pour les deux faisceaux qui bifurquent
- équivalence des longueurs effectives d'interaction entre les deux régions
- indépendance et non interaction entre les deux régions ; le couplage n'intervient que par les faisceaux pompes qui sont commun aux deux régions

la réflectivité en régime permanent du miroir peut s'écrire de la façon suivante :

$$R = \left| \frac{A_3(0)}{A_4^*(0)} \right| = \frac{-a(r)b(r)}{4(1-r^2) \tanh^4\left(\frac{\gamma \cdot l \cdot r}{2}\right)} \quad (\text{Eq. I.9.7})$$

où :

$$a(r) = r^2 \left[1 - \tanh^2\left(\frac{\gamma \cdot l \cdot r}{2}\right) \right] \quad (\text{Eq. I.9.8})$$

$$b(r) = \left[r - 2 \tanh\left(\frac{\gamma \cdot l \cdot r}{2}\right) \right]^2 - r^2 \tanh^2\left(\frac{\gamma \cdot l \cdot r}{2}\right) \quad (\text{Eq. I.9.9})$$

avec :

$$r = (\Delta^2 - 4|c|^2)^{1/2} \quad (\text{Eq. I.9.10})$$

$$\Delta = I_2 + I_3 - I_1 - I_4 \quad (\text{Eq. I.9.11})$$

$$c = A_2 A_1 + A_3 A_4 \quad (\text{Eq. I.9.12})$$

γ est le coefficient de couplage :

$$\gamma = \frac{\omega}{2nc} \cdot \frac{Er_{eff}}{\cos\left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}\right)} \quad (\text{E. I.9.13})$$

avec r_{eff} qui est le coefficient électrooptique efficace.

Dans la mesure où nous proposons d'utiliser ce modèle dans l'interprétation de nos résultats expérimentaux, il sera explicité de manière plus approfondie au Chapitre IV.

Nous avons choisi de plutôt utiliser ce dernier modèle pour les raisons suivantes :

- les résultats expérimentaux obtenus montrent de fortes instabilités (de type chaos déterministe) ce qui est incompatible avec le modèle de Lam [DENZ et al. 1990]
- les taux de réflectivité sont supérieurs à ceux obtenus par le modèle de Lam
- la réflectivité dépend fortement du point d'incidence, favorisant dans certains cas les réflexions internes, donc une conjugaison issue d'un processus FWM
- des boucles de lumière ont été effectivement observées à l'intérieur d'échantillons de titanate de baryum
- contrairement au modèle de Lam, qui est global, le modèle de MacDonald et Feinberg nous a permis de servir de base à un modèle incluant la géométrie des rayons lumineux et en particulier la position transversale du point d'incidence Td.

9.4. Autres analyses

Gower et Hribeck proposent aussi une analyse des mécanismes mis en jeu dans le processus de création de l'onde conjuguée dans le montage du type CAT [GOWER and HRIBECK 1988] ; ils pensent que, soit un mélange à quatre ondes, renforcé par une diffusion stimulée le long de la boucle générée à l'intérieur du cristal, soit un mélange à quatre ondes dans plusieurs régions couplées sur une cavité en anneau s'installant entre deux coins opposés du cristal peuvent être à l'origine de l'onde conjuguée. Ils établissent la géométrie des rayons à l'intérieur de l'échantillon à l'aide d'agrandissements de photographies. En fonction de la position transversale du point d'incidence, plusieurs trajets différents peuvent se mettre en place. Dans certains cas, cela conduit à un comportement stable, parfois à un comportement instable.

Mais au préalable, ils font remarquer que :

"[...] la simplicité et la facilité avec lesquelles on peut obtenir des miroirs à conjugaison de phase autopompés efficaces pour des faisceaux lasers continus et de faible puissance contrastent avec la grande difficulté que l'on a à comprendre leur fonctionnement. Cette difficulté provient essentiellement du fait que, aussi bien la longueur (d'interaction) et la direction des faisceaux à l'intérieur du cristal s'optimisent elles-mêmes sous l'effet conjugué du beam fanning et des mélanges d'ondes, sans que l'expérimentateur puisse véritablement agir sur ces paramètres internes. On pourrait lever une partie du voile en testant de grandes quantités d'échantillons de géométries différentes mais de caractéristiques identiques par ailleurs. [...]"

Nous pensons également que le test d'un très grand nombre d'échantillons de géométries différentes mais aussi de natures différentes, et dans des conditions expérimentales variées, est plus que jamais nécessaire à l'élaboration d'un modèle complet pour le miroir CAT. C'est pourquoi nous nous proposons de créer un dispositif entièrement automatisé pour l'étude du comportement du miroir CAT.

Une nouvelle méthode de caractérisation des réseaux inscrits à l'intérieur d'un cristal photoréfractif a été mise au point par Lambelet et al. [LAMBELET et al. 1994]. Cette méthode de réflectométrie à basse cohérence est particulièrement intéressante car elle permet de mesurer (avec une précision du micron) le type, la position et la longueur des réseaux de diffraction à l'intérieur d'un cristal de titanate de baryum travaillant en miroir à conjugaison de phase autopompé. Ils ont mis en évidence, dans l'échantillon étudié, la présence simultanée de six réseaux par réflexion, d'un réseau par transmission (tous parfaitement localisés) ainsi qu'une boucle interne, obtenue grâce à des réflexions à l'intérieur du cristal.

CHAPITRE II

INSTRUMENT DE CARACTÉRISATION AUTOMATIQUE DE MIROIRS A CONJUGAISON DE PHASE AUTOPOMPÉS

Nous décrivons ici l'instrument expérimental que nous avons mis au point pour caractériser de manière automatique les miroirs à conjugaison de phase autopompés.

*Comme la nervure porte la feuille
du dedans, du fond de sa chair, les
idées sont la texture de
l'expérience.*

Merleau - Ponty.

1. Description fonctionnelle

Le dispositif expérimental a été conçu dans le but d'étudier de manière automatique le comportement temporel de l'onde conjuguée obtenue par autopompage (self-pumping) dans différents échantillons de titanate de baryum¹ en configuration CAT. Il comprend donc essentiellement une source laser, une lame séparatrice et un cristal (voir figure II.1.1).

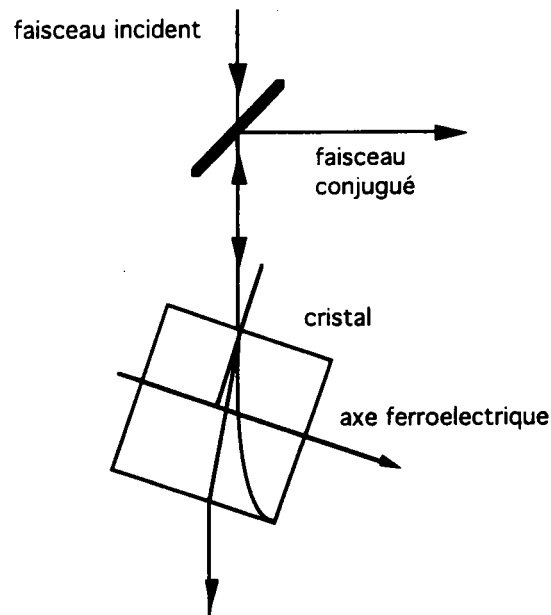


Figure II.1.1. Dispositif CAT donnant l'onde conjuguée.

Une acquisition de l'onde conjuguée est faite de manière à pouvoir tracer les courbes représentant l'évolution de son intensité en fonction du temps, pour différentes valeurs des paramètres expérimentaux.

L'ordinateur gère les opérations ; il a été programmé pour effectuer non seulement le séquençage des manipulations et l'acquisition des signaux mais également le dépouillement automatique et la présentation des résultats expérimentaux, en environnement "multitâches".

La source de lumière est un laser Argon, réglé de manière à fournir une forte puissance (500 mW) à la longueur d'onde $\lambda=514,5$ nm mais dont seule une petite partie (30mW) est prélevée² pour illuminer le cristal : de cette manière, on se prémunit contre les perturbations que pourrait occasionner le retour de l'onde conjuguée dans la cavité laser. Avant chaque acquisition un cycle d'effacement à l'aide d'un faisceau large de puissance élevée et de polarisation ordinaire permet de retirer tout réseau de phase résiduel dans l'échantillon.

¹ Ou autres.

² Le reste de la puissance est absorbée par un piège à lumière (voir figure II.1.2)

Nous avons conçu et réalisé un porte-échantillon permettant de placer le cristal dans une position parfaitement définie et permettant de laisser indépendantes la rotation et la position transversale du cristal. De plus, il est muni d'une régulation de température très précise utilisant une cellule Peltier ainsi qu'une sonde de température au platine. Le porte-échantillon est lui-même placé sur des tables de rotation et de translation motorisées avec des moteurs pas à pas pilotés par le MacIntosh.

Les principaux paramètres expérimentaux qui jouent un rôle important, dans le comportement temporel de l'onde conjuguée obtenue par un miroir CAT, sont les suivants :

- les paramètres relatifs au faisceau lumineux incident :
 - longueur d'onde
 - focalisation
 - modulation spatiale
 - waist du faisceau incident
 - polarisation
 - puissance incidente
 - type de faisceau : continu ou impulsionnel

- les paramètres relatifs au faisceau d'effacement :
 - longueur d'onde
 - polarisation
 - puissance
 - durée d'effacement

- les paramètres relatifs à l'échantillon :
 - type de cristal
 - propriétés physiques du cristal (absorption, conductivité, etc.)
 - nature et concentration des dopants
 - dimensions
 - proportions géométriques
 - orientations cristallines par rapport aux faces de l'échantillon
 - température
 - traitement de surface

- les paramètres relatifs à la position du cristal par rapport au faisceau incident :
 - altitude
 - position transversale
 - angle d'incidence.

Le grand nombre de ces paramètres ainsi que la plage étendue de leurs variations a imposé une automatisation de l'ensemble et une gestion par un ordinateur.

On a donc globalement adopté la structure représentée sur la figure II.1.2 :

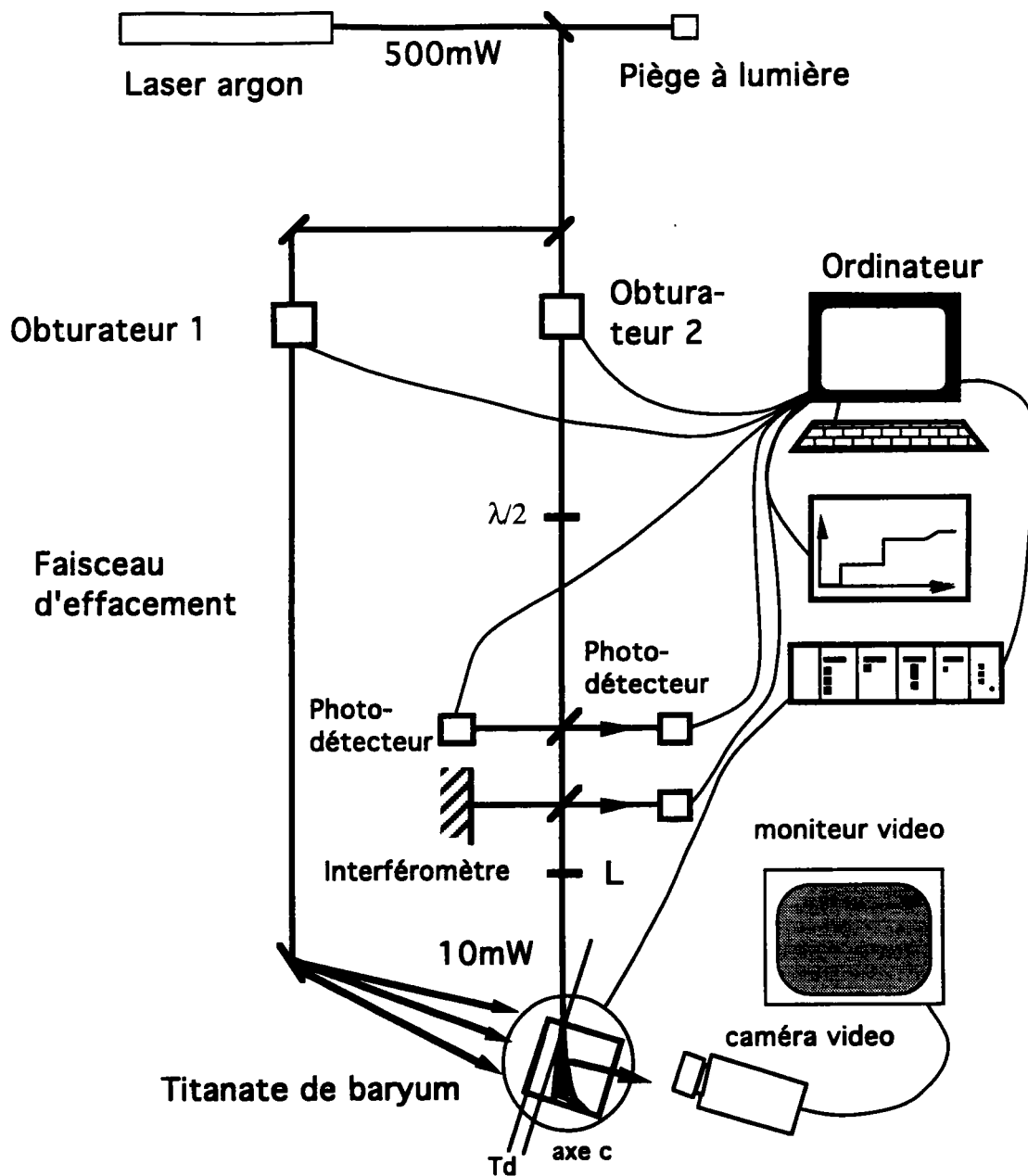


Figure II.1.2. Vue d'ensemble du dispositif expérimental.

2. La partie optique

2.1. La source laser

La source est un laser argon COHERENT INOVA 200 monomode pouvant travailler à différentes longueurs d'onde en émission continue. Le faisceau incident (10 à 30mW environ) est prélevé à partir d'un faisceau de forte

puissance (500mW) afin de minimiser les perturbations¹ que pourrait provoquer le retour de l'onde conjuguée dans la cavité du laser. Il est polarisé rectilignement.

La puissance du laser est réglable ; il est possible à priori de la piloter à distance par l'ordinateur à l'aide d'une liaison RS232. Toutefois, l'asservissement en puissance de notre laser étant mal conçu, toute consigne visant à modifier la puissance du laser entraîne un éclair dû à une pointe de courant (d'environ 50 ampères ou plus), la puissance se stabilisant ensuite à la valeur désirée. Outre le danger potentiel de ce genre d'incident (surtout lorsqu'il est inattendu) pour l'utilisateur, il y a risque d'endommagement du cristal. Un obturateur ne permet pas de résoudre le problème de manière satisfaisante car il ne joue pas le même rôle qu'un piège à lumière et ne peut pas absorber plusieurs watts sans réflexions intenses.

Le faisceau signal est polarisé de manière extraordinaire, c'est à dire que la direction de la polarisation de l'onde incidente est parallèle à la direction de l'axe c du cristal dans sa position de référence (horizontale en l'occurrence).

En revanche, le faisceau d'effacement est en polarisation ordinaire, c'est à dire perpendiculaire à l'axe c (verticale en l'occurrence).

2.3. Les éléments optiques

La polarisation extraordinaire que l'onde incidente doit avoir dans l'échantillon est obtenue par une lame demi-onde. Cette dernière est montée sur une table de rotation motorisée ; on peut ainsi étudier l'influence de la polarisation du faisceau incident sur la formation de l'onde conjuguée.

Une lame séparatrice suivie d'une lame demi-onde permettent d'obtenir un faisceau d'effacement en polarisation croisée.

Un jeu de lentilles, de différentes focales, permet d'obtenir des waists de tailles différentes à l'entrée du cristal.

2.4. L'interféromètre

Nous avons installé un interféromètre de Michelson, faisant interférer l'onde incidente et l'onde conjuguée. Ceci pour permettre de détecter et de mesurer une variation relative de phase ou de fréquence entre les deux ondes.

¹ Une acquisition continue de l'intensité du faisceau incident durant les expériences a permis de montrer la stabilité de ce dernier ; les éventuelles instabilités de l'onde conjuguée ne proviennent donc pas d'instabilités de la cavité laser.

2.5. La video de surveillance

Une caméra video, munie d'un objectif macro, située au dessus de l'échantillon permet de visualiser le beam fanning ainsi que le bouillonnement¹ optique à l'intérieur du cristal. Le MacIntosh étant muni d'une carte video, il est possible de faire des acquisitions d'images, en particulier pour étudier finement les boucles de lumière qui se forment à l'intérieur du cristal.

3. La partie mécanique

3.1. Les obturateurs

Deux obturateurs permettent de couper alternativement le faisceau d'écriture et le faisceau d'effacement. La conception et la réalisation tant de la partie mécanique et électromécanique que de la partie électronique de commande sont spécifiques à l'application. L'ensemble est relié à l'ordinateur par l'intermédiaire de la carte d'entrée sortie (voir plus loin).

3.1.1. Technologie

Les obturateurs ont été réalisés en technologie "MarioControle" à base de moteur pas à pas (voir figure II.3.1). Un disque, solidaire de l'arbre moteur, est mû en rotation et permet d'obturer ou non le faisceau.

Les moteurs pas à pas sont pilotés et alimentés par une carte de commande comprenant essentiellement un circuit PBD 3517, quatre diodes et deux résistances. Les quatre entrées logiques du PDB 3517 sont les suivantes :

- STEP** : tourne le moteur d'un pas sur front descendant
- DIR** : indique le sens de la rotation
- HSM*** : permet de travailler en demi-pas (entrée complémentée)
- INH** : permet d'inhiber les alimentations

¹ On voit très nettement une "activité", ressemblant fort à celle d'une ruche ; toutefois le terme "activité optique" ne peut pas être employé ici car il a une ~~une~~ acception différente en physique.

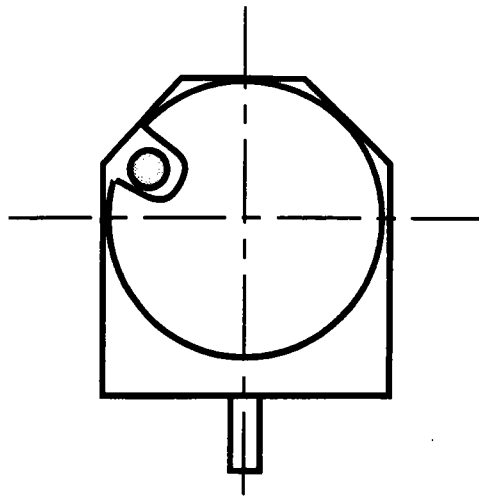


Figure II.3.1. Obturateur de faisceau laser

Les quatre sorties *PA1*, *PA2*, *PB1* et *PB2* du PBD3517 sont connectées ainsi qu'il est représenté sur la figure II.3.2. En revanche, *LA* et *LB* sont connectés directement à une alimentation de puissance dont le potentiel est ajusté entre 10 et 15 V.

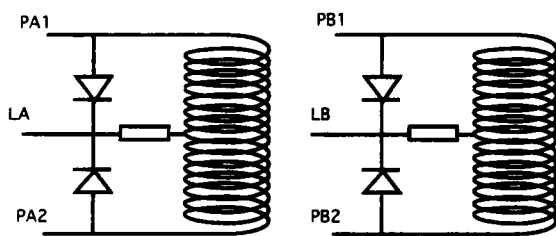


Figure II.3.2. Branchement des quatre phases

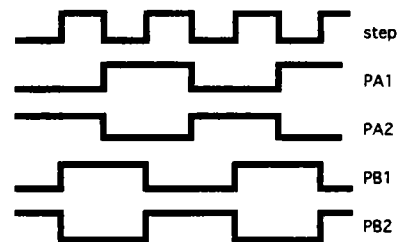


Figure II.3.3. Séquencement des phases

Le circuit PBD 3517 réalise le séquencement représenté à la figure II.3.3.

3.1.2. Connections

L'obturateur du faisceau principal sera appelé dans le programme informatique : `shutter_noir` ; et l'obturateur du faisceau d'effacement : `shutter_rouge`.

Dans un premier temps le calculateur utilisé pour gérer le dispositif expérimental est un PC de type Compaq 386 ; la carte d'entrées/sorties est alors une Data Translation DT2801.

Les deux obturateurs sont interfacés par l'intermédiaire du port 0 de la carte DT2801 comme indiqué à la figure II.3.4.

port de sortie	bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0
shutter_noir				INH	DIR	STEP		HSM*
shutter_rouge	HSM*	INH	DIR				STEP	
connecteur DB25	6	18	5	17	16	3	15	2

Figure II.3.4. Connections des shutters au port 0 de la carte DT2801

Puis la carte DT2801 sera remplacée par une carte LabNB, insérée dans un MacIntosh Quadra 950, mais le câblage restera inchangé, il suffira de lire port A au lieu de port 0.

3.1.3. Commande des moteurs des obturateurs (version PC)

Les procédures de bas niveau "void shutter_noir_on()" et "void shutter_noir_off()" contenues dans le fichier `shut.c` permettent d'envoyer par l'intermédiaire des cartes d'interfaces, les ordres binaires permettant de tourner les disques dans un sens ou dans l'autre du nombre de pas nécessaires pour obtenir l'ouverture ou la fermeture des obturateurs. Le code correspondant est reporté en annexe.

3.1.4. Ouverture et fermeture des obturateurs (version MacIntosh)

De la même manière, nous avons réécrit ces procédures en tenant compte des spécificités propres aux cartes d'interface du MacIntosh. C'est pourquoi, dans l'annexe correspondante, chaque fichier PC possède un homologue qui correspond à la traduction des mêmes commandes mais adaptées au Mac.

3.2. Le porte-échantillon régulé en température

Un porte-échantillon a été étudié et réalisé spécifiquement pour cet appareil en technologie *MarioControle* (voir figure II.3.5).

Il doit répondre au cahier des charges suivant :

- il doit permettre la fixation aisée de l'échantillon sur le support, en particulier, il faut que la position de l'échantillon soit indexée par rapport au support
- le support d'échantillon doit pouvoir être démonté et remonté aisément et rapidement du porte-échantillon, tout en retrouvant sa position initiale
- il faut rendre indépendants les deux degrés de liberté suivants : la position transversale du cristal par rapport au faisceau laser, et la rotation du cristal (angle d'incidence)
- il faut pouvoir régler une position de référence (position où tous les

paramètres sont à zéro)

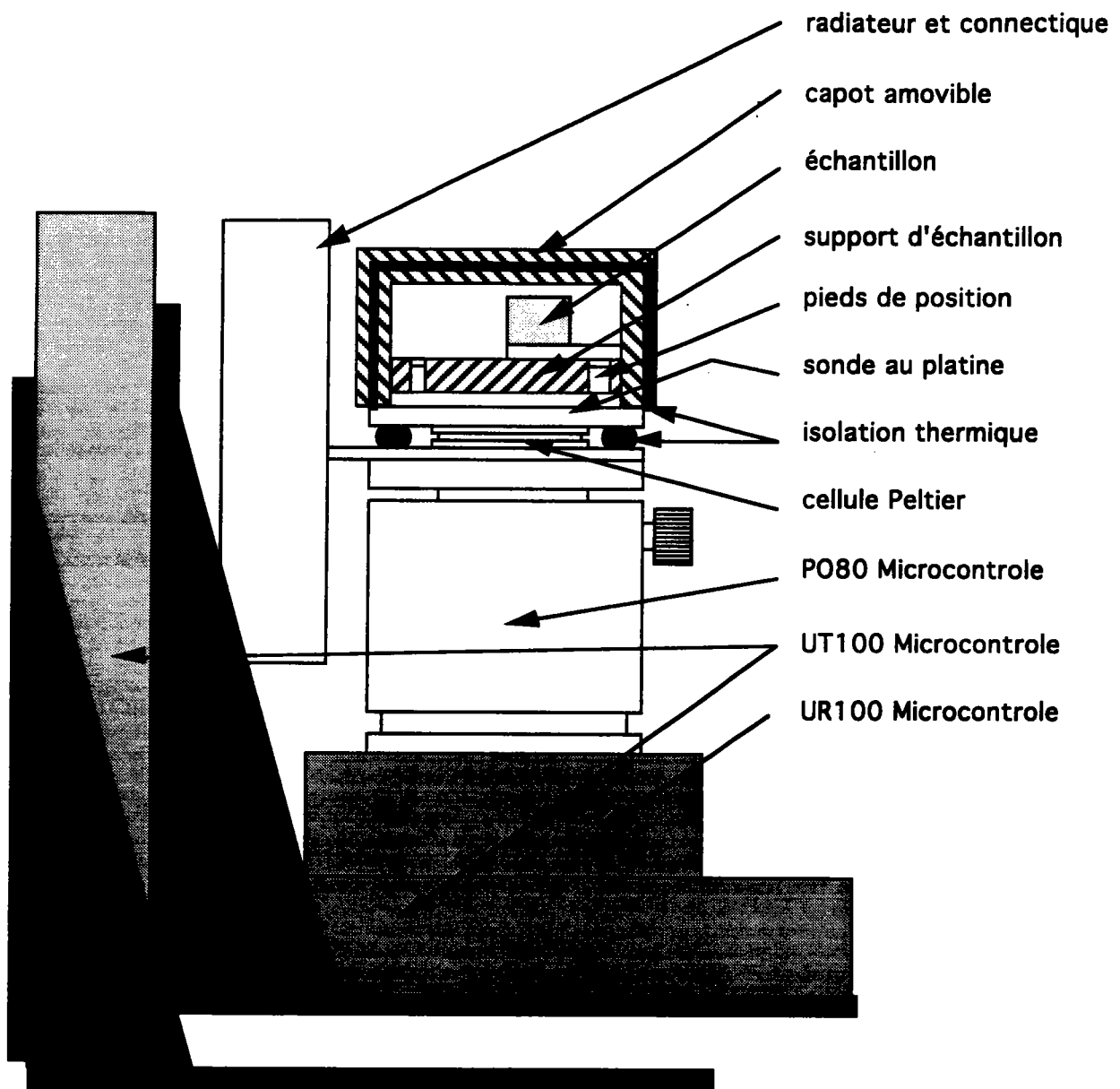


Figure II.3.5. Porte échantillon régulé en température.

Il est constitué d'un support d'échantillon fermé par un capot amovible, formant cavité régulée en température, monté sur un support de prisme MicroControlé (PO40), le tout monté sur une table de rotation MicroControlée UR100 motorisée (pour régler l'angle d'incidence) et une table de translation MicroControlée UT100 motorisée (pour régler la position transversale du point d'incidence). Un système de deux équerres et d'une table de translation MicroControlée UT100 motorisée permet de régler l'altitude du point d'incidence dans le cristal.

3.2.1. Orientation du cristal

Le cristal est collé sur le support d'échantillon, qui est lui-même monté sur une embase en aluminium ; l'indexage entre l'embase et le support d'échantillon est obtenu par deux pieds de position. L'embase est elle-même fixée sur un support de prisme PO80 Microcontrôle. Ce dernier donne trois degrés de liberté angulaires, ce qui permet d'ajuster la position de référence.

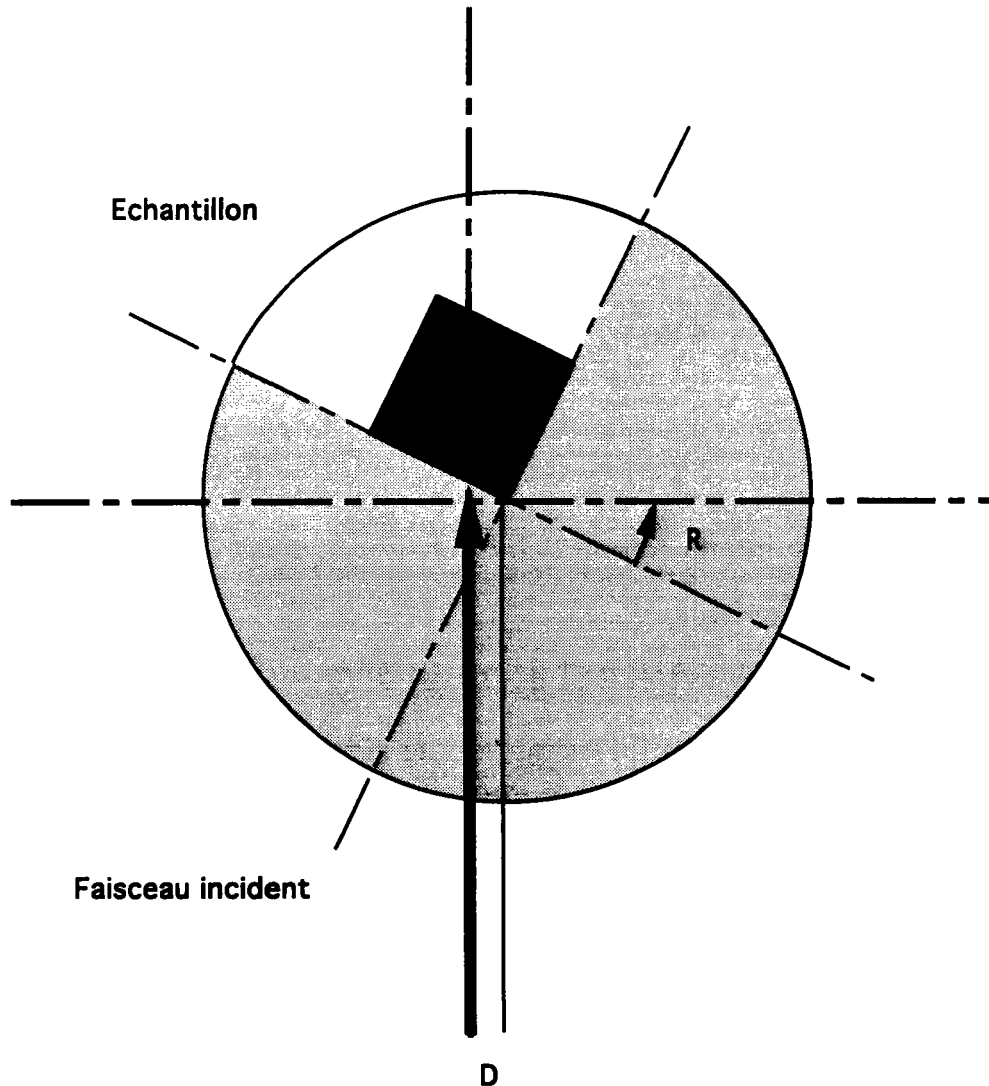


Figure II.3.6. Le paramètre D ne dépend pas de l'angle de rotation R.

La position de référence correspond à :

- une incidence normale ($R = 0$)
- un point d'incidence centré sur l'arête (-c) du cristal ($D = 0$)
- le faisceau incident normal à la face d'entrée du cristal

L'indépendance des deux degrés de liberté R et D est assurée en mettant l'arête -c

(c'est à dire correspondant à $D = 0$) de la face d'entrée sur l'axe de la rotation correspondant au paramètre R (voir figure II.3.6).

Le PO80 est fixé sur une platine de rotation UR100 motorisée ; l'angle de rotation R peut ainsi être ajusté au centième de degré.

Le tout est enfin monté sur une table de translation UT100 motorisée qui permet de déplacer transversalement le cristal par rapport au faisceau lumineux.

3.2.3. La régulation de température

La régulation de température est assurée par une platine de technologie "MarioControle" comprenant essentiellement :

- une enceinte thermostatique
- une cellule Peltier
- une sonde au platine de type PT100
- une électronique de type RTS100

L'électronique RTS100 réalise l'asservissement et la régulation (à 0.1 °C) de la température. La sonde au platine lui donne l'information de la température de l'enceinte, puis après avoir comparé avec la consigne entrée par l'expérimentateur, pilote la cellule Peltier en conséquence.

3.3. Les tables de translation et de rotation motorisées

Le support d'échantillon est lui-même monté sur trois tables MicroControle : 2 tables UT100 et 1 table UR100 munies d'un moteur pas à pas permettent respectivement de piloter la position transversale et l'"altitude" du point d'incidence (au 10000ème de mm) ainsi que l'angle d'incidence (au 100ème de degré). Une autre table de rotation UR100 motorisée permet de piloter, par le biais d'une lame quart d'onde, la polarisation du faisceau incident.

Un boîtier TL78S MicroControle contient l'électronique de puissance et une interface GPIB.

La procédure de bas niveau, moteur .c , permet de piloter les moteurs pas à pas Microcontrole par l'intermédiaire du bus GPIB ; elle est reportée en annexe.

On peut commander la position des moteurs en absolu (position absolue par rapport à un zéro mécanique), en relatif (c'est à dire un déplacement par rapport à la position précédemment occupée) : on a également la possibilité d'aller directement au zéro mécanique.

3.4. La table optique

L'ensemble est monté sur une table Newport RC pneumatique pour éviter les problèmes liés aux vibrations mécaniques venant du sol. Il reste toujours néanmoins une partie des vibrations liées à la circulation de l'eau dans le laser qui ne peuvent être totalement anihilées.

4. La mesure de l'onde conjuguée

4.1. Le matériel utilisé

Dans un premier temps, le photodétecteur utilisé est une photodiode SIEMENS du type SFH 202. Elle fournit un courant proportionnel à l'intensité lumineuse incidente (0,5 A/W).

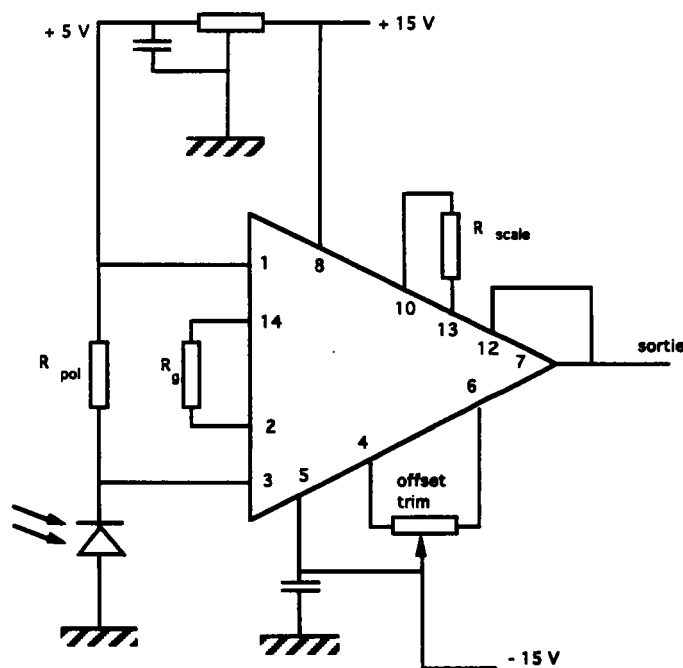


Figure II.4.1. Conversion courant-tension (ampli d'instrumentation AD 521)

Le détecteur sera ensuite remplacé par un UDT, plus sensible et de diamètre plus large, permettant une meilleure mesure de l'intensité de l'onde conjuguée.

Le courant traverse la résistance R_{pol} (dont la valeur est de 33 k Ω).

Le potentiel en sortie est égal à la tension différentielle aux bornes de la résistance R_{pol} multipliée par un facteur G (gain).

La résistance R_{scale} doit être égale à $100\text{k}\Omega$ ($\pm 15\%$) et dans ces conditions le gain G a pour valeur :

$R_g = 1\text{ M}\Omega$	$G = 0,1$
$R_g = 100\text{ k}\Omega$	$G = 1$
$R_g = 10\text{ k}\Omega$	$G = 10$

L'onde conjuguée est prélevée à l'aide d'une lame séparatrice (voir figure II.4.2).

On a alors la relation suivante entre la puissance prélevée par la lame séparatrice et la puissance totale de l'onde conjuguée :

$$I^*_m = \alpha I^*$$

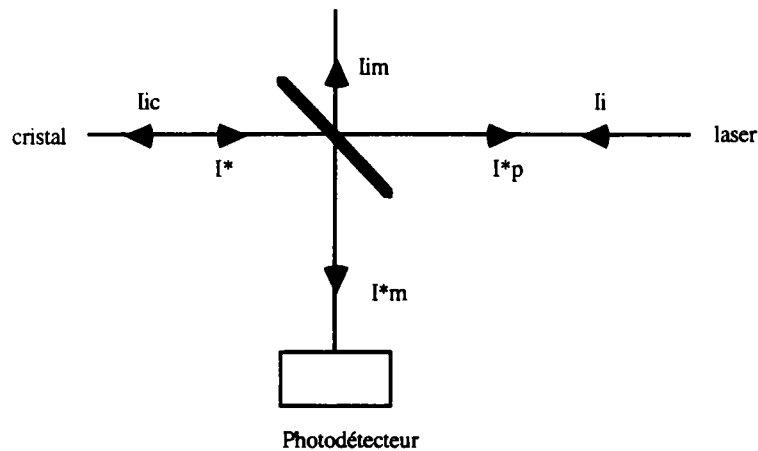


Figure II.4.2. Prélèvement d'une partie de l'onde conjuguée ,

4.2. Etalonnage du dispositif de mesure

Nous traçons expérimentalement la courbe de réponse du système d'acquisition (voir figure II.4.3), ce qui nous permet d'obtenir d'une part la valeur numérique du coefficient α et d'autre part de déterminer la zone de linéarité de la chaîne d'acquisition. On trouve :

$$\alpha = 0,364$$

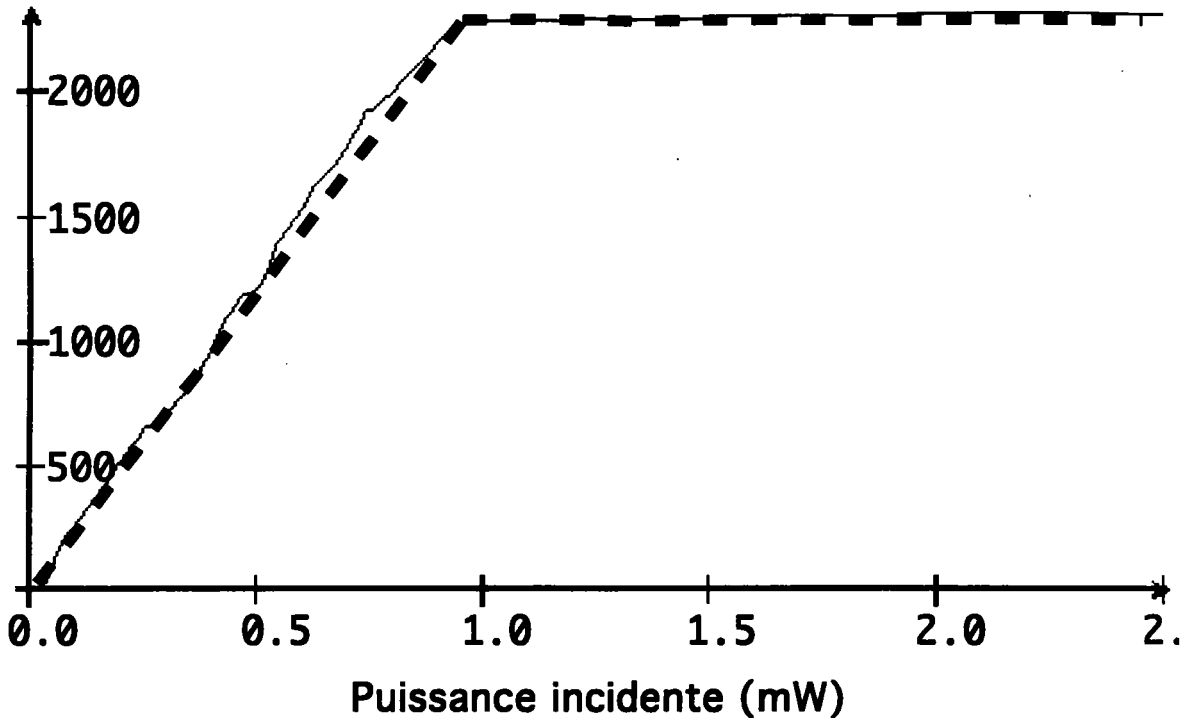


Figure II.4.3. Courbe d'étalonnage donnant la zone de linéarité du dispositif.

5. Automatisation du banc de mesure

L'ensemble peut être piloté indifféremment par un PC (programme "Cristal") ou un MacIntosh (programme "CristalMac"). Toutefois la version pour MacIntosh est plus sophistiquée ; de plus, elle s'intègre dans l'environnement MacIntosh et dialogue avec d'autres applications en temps réel (tracé des courbes avec le logiciel TraceCourbe¹, etc...), le tout en multitâches.

5.1. Version pour PC

Dans un premier temps, nous avons utilisé un ordinateur de type IBM PC (Compaq 386) pour automatiser le banc de mesure. C'est un calculateur qui gère l'ensemble des acquisitions et les déplacements des moteurs.

Ensuite les fichiers (de type TEXTE) contenant les résultats expérimentaux ainsi que les ordres de tracé sont envoyés à travers le réseau Ethernet sur des disques durs gérés par des SUN sous UNIX.

Enfin, depuis un MacIntosh, on récupère à distance ces fichiers, puis après les

¹ Logiciel écrit et mis gracieusement à notre disposition par Jean-Louis Gutzwiller.

avoir mis au format adéquat, on procède à l'édition des courbes expérimentales¹.

5.1.1. Les cartes d'interface

Les cartes d'interface (cartes que l'on place à l'intérieur de l'ordinateur) que l'on a utilisées sont les suivantes :

- la carte IND4 (Microcontrôle), qui permet de transmettre des ordres pour piloter les déplacements des tables motorisées, par l'intermédiaire du boîtier TL 78 (Microcontrôle) qui en contient l'électronique de puissance ;
- la carte DT2801 (Data Translation) qui autorise les entrées/sorties analogiques et numériques ; elle permet de faire l'interface entre l'ordinateur d'une part, et les capteurs d'intensité lumineuse et les obturateurs d'autre part.

5.1.2. Automate et programmation "modeless"

Les manipulations sont complètement automatisées et sont gérées par le calculateur, à l'intérieur duquel a été programmé un automate.

Un automate est une procédure, non bloquante, qui est appelée en permanence. La durée d'exécution de cette procédure est très courte, typiquement dans notre cas elle est de 1 ms. Au cours de cette procédure sont effectués divers tests sur les variables d'état, sur les sorties et sur les entrées, et, si besoin est, des calculs sont effectués de manière à faire évoluer les variables d'état ou les sorties.

L'intérêt d'un automate (plutôt qu'un programme séquentiel) déroulant successivement les différentes séquences) est double : tout d'abord il autorise une grande souplesse au niveau du séquençage lui-même, mais aussi permet de créer des procédures d'arrêt d'urgence (par appui sur n'importe quelle touche - sauf ESCAPE- ce qui a pour effet immédiat et quelque soit la séquence en cours de couper les faisceaux laser) ainsi que des procédures d'arrêt (par appui sur la touche ESCAPE) différé en fin d'acquisition permettant de reprendre les manipulations à l'endroit souhaité en sauvegardant l'état courant.

Nous avons finalement fini par réécrire le logiciel pour MacIntosh. Plusieurs raisons nous ont conduit à ce choix :

- Tout d'abord, c'est la possibilité de récupérer le signal d'horloge directement depuis le quartz du Mac, permettant une gestion précise et simple du temps et de la fréquence d'échantillonnage, alors qu'avec le PC, on avait eu recours à des artifices du type boucles de temporisation calibrées (procédures bloquantes par excellence !).

¹ Cette procédure longue et compliquée a été abandonnée par la suite. Il a été décidé de dédier un MacIntosh Quadra à la gestion complète du banc, depuis l'acquisition jusqu'au dépouillement automatique des résultats.

- Ensuite pour des raisons d'homogénéité et de simplicité : le traitement des résultats expérimentaux se faisant sur MacIntosh, par l'intermédiaire de TraceCourbe et d'autres applications (Excel, etc.).
- Enfin, pour des raisons de convivialité et de puissance de travail : l'application CristalMac a été écrite de manière à pouvoir travailler en multitâche, à être totalement compatible avec l'environnement MacIntosh et enfin à pouvoir dialoguer automatiquement avec d'autres applications.

5.2. Version pour MacIntosh Quadra

CristalMac permet de décrire les séquences des mesures à effectuer sur l'échantillon. On peut le faire soit directement au clavier, soit à l'aide de fichiers de configuration de type texte (un fichier de démonstration est fourni, il sert de paradigme).

5.2.1. Les cartes d'interface

Les tables motorisées MicroControle sont pilotées par l'électronique de puissance contenue dans le boîtier TL78S qui est lui même interfacé au MacIntosh par l'intermédiaire d'une carte National Instrument NI488 et d'un bus IEEE488. Les entrées/sorties analogiques et numériques nécessaires à l'acquisition et à la commande des obturateurs sont interfacées par l'intermédiaire d'une carte LabNB connectée comme indiqué en annexe.

5.2.2. Organisation de l'automate

Nous avons représenté graphiquement à la figure II.5.1 ce que nous appelons ici une acquisition : il s'agit d'un ensemble de points de mesure, pris à des instants successifs, et permettant de visualiser le comportement temporel de l'onde conjuguée dans des conditions expérimentales données.

Une manipulation représente un ensemble d'acquisitions faites dans des conditions expérimentales différentes. En général, un (ou plusieurs) paramètre est incrémenté d'une acquisition à l'autre, les autres paramètres restant fixes.

La fonction essentielle de l'automate est de gérer les manipulations.

r = 6° d = -2800μ T = 25000m°C Ii = 10mW Acqu de 240s Relax de 60s
_930306.006

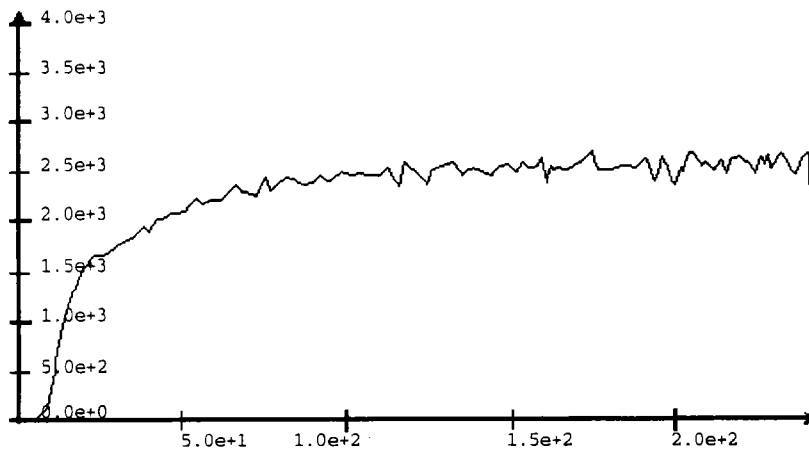


Figure II.5.1. Une acquisition (exemple)

Typiquement, une manipulation se déroule, vu de l'extérieur, de la manière suivante :

- initialisation de la manipulation
- initialisation de la première acquisition
- première acquisition
- clôture de la première acquisition
- passage de la première acquisition à la deuxième acquisition
- initialisation de la deuxième acquisition
- etc.
- clôture de la manipulation

L'initialisation de la manipulation comprend en particulier la prise en compte des paramètres expérimentaux, à fixer où à faire varier dans une certaine plage. L'initialisation d'une acquisition est une phase qui inclut le calcul du nombre de points de mesure, l'allocation de la mémoire nécessaire, la préparation du fichier qui contiendra les résultats de mesure, la détermination du nom de ce fichier, ainsi que l'effacement de tout réseau résiduel dans l'échantillon. L'acquisition contient le cadencement et l'acquisition en elle même, ainsi que l'écriture des résultats de mesure en mémoire. La clôture d'une acquisition est une phase au cours de laquelle est généré le fichier résultat ; dans ce fichier sont recopiés les résultats de mesure (initialement en mémoire) mais aussi le code en Pascal donnant les ordres de tracé automatique ; de plus, la mémoire précédemment allouée aux résultats expérimentaux est libérée.

Cela ressemble, extérieurement, à un déroulement séquentiel.

En fait, l'automate que nous avons développé ne travaille pas de manière séquentielle mais de la manière suivante :

- initialisation générale
- boucle :

- scrutation des variables d'entrées et des variables d'état
 - calculs (rapides !)
 - affectation des variables de sortie et actualisation des variables d'état
- la boucle est stoppée lorsque la fin de la manipulation est détectée : il peut s'agir soit d'une fin "normale" soit d'un arrêt d'urgence. Dans ce dernier cas une gestion de la reprise de la manipulation est prévue.

La boucle est exécutée très rapidement (<1ms) de manière à ne jamais bloquer l'ordinateur. C'est important pour pouvoir travailler en multitâche d'une part et pour pouvoir traiter les arrêts d'urgence en temps réel.

Nous allons détailler ci dessous les structures utilisées ainsi que les différentes procédures et fonctions contenues dans l'automate.

5.2.2.1. Variables et variables d'état

La plupart des variables sont rangées dans trois structures :

structure entrées
structure état
structure info

Variables d'entrées :

Ce sont les variables que l'utilisateur entre au début d'une manipulation et qui permettent à l'automate de fixer les conditions expérimentales de chaque acquisition de la manipulation. Ces variables restent constantes au cours d'une même manipulation. Ce sont par exemple : l'angle de départ, d'arrivée, etc.

Variables d'information :

Ce sont les variables que l'utilisateur entre au début d'une manipulation et qui doivent se trouver dans le fichier de résultat. Ces informations n'ont aucun effet sur l'acquisition elle-même.

Variables d'état :

Ce sont les variables qui définissent l'état d'avancement du système d'acquisition. Les variables définies ici sont modifiées par le déroulement de la manipulation elle-même.

5.2.2.2. Programme principal

Le programme principal commence par une phase d'initialisation générale, comprenant elle-même les étapes suivantes :

- mise à jour des variables d'entrées relatives à la carte d'entrées/sorties (numéro du port, numéro du slot, configuration du port)
- initialisation des variables d'état
- vérification du bon fonctionnement des obturateurs

- fermeture des obturateurs
- vérification du bon fonctionnement des moteurs Microcontrôle
- positionnement des moteurs Microcontrôle au zéro mécanique
- mise à jour des variables d'entrées relatives aux conditions expérimentales de la manipulation (ces données sont dans la pratique entrées sous forme d'un fichier texte, dont un exemple sert de paradigme)
(`get_manip_params()`)
- actualisation de la date et de l'heure de début de manipulation
- création d'un fichier "listing" qui contiendra la liste des acquisitions effectuées au cours de la manipulation et précisant les paramètres expérimentaux pertinents

Puis l'automate entre dans la boucle, de laquelle il ne sortira que si, soit la manipulation est terminée, soit un arrêt (d'urgence ou non) est demandé par l'utilisateur. Dans cette boucle, il effectue en permanence la procédure :

`do_manip()`
(voir plus loin).

5.2.2.3. Exécution d'une manipulation

L'exécution d'une manipulation (`do_manip`), au sens d'un automate, consiste à effectuer des tests sur les variables d'état et en fonction du résultat de ces tests, on procède d'une part à la réactualisation des variables d'état mais aussi au lancement d'autres procédures (généralisant des actions).

Les tests effectués sur les variables d'état correspondent aux questions suivantes :

- Faut-il commencer une phase d'effacement ?
- Faut-il démarrer une phase d'acquisition ?
- Est-on dans une phase d'acquisition ?
- Est-on dans une phase d'effacement ?
- Si on n'est ni en phase d'acquisition ni en phase d'effacement, doit-on effectuer des déplacements du cristal pour être prêt à lancer une nouvelle acquisition ?

De plus, à chaque passage dans cette boucle, on effectue une actualisation des variables temporelles.

- Si l'on détecte qu'il faut *démarrer* une phase d'effacement (par le fait que les deux obturateurs sont fermés et que `inst_relax > 0`) alors :
 - on ouvre l'obturateur rouge
 - on note à quel instant la phase d'effacement a débuté

Dans le cas contraire, on regarde si (par hasard)¹ on ne se trouve pas en fin

¹ L'ordre dans lequel les tests sont faits n'est pas anodin : il tient compte de la probabilité de la réponse d'une part et d'autre part de l'urgence de l'action à mener (au cas où).

d'effacement ((etat.inst_relax==0)&&(etat.rouge_on)) et s'il n'y a pas lieu de fermer l'obturateur rouge.

- Si l'on détecte qu'il faut *démarrer* une acquisition (par le fait que les deux obturateurs sont fermés et que instant>0) alors :

 - on ouvre l'obturateur noir

 - on note à quel instant la phase d'acquisition a débuté

Dans le cas contraire, on regarde si (par hasard) on ne se trouve pas en fin d'acquisition ((etat.instant==0)&&(etat.noir_on)) et s'il n'y a pas lieu de fermer l'obturateur noir.

- Si une acquisition doit être menée, on regarde si on se trouve à un instant où il y a lieu d'effectuer une mesure, si c'est le cas, on lance la procédure "acquisit()", on écrit le résultat de la mesure dans la case correspondante du tableau résultat et on actualise le numéro du point courant et on décrémente la borne fuyante. Sinon, on ne fait rien.

- Si on n'est ni en phase d'acquisition ni en phase d'effacement, on regarde s'il reste des acquisition à effectuer pour la manipulation en cours. Si c'est le cas, on donne des ordres : déplacement des moteurs Microcontrole, consignes de température, etc.

5.2.2.4. Initialisation de l'acquisition

La procédure "init_acquisit()" initialise l'acquisition : en particulier, elle calcule le nombre de points de la courbe, alloue dynamiquement de la mémoire à la structure résultat, initialise etat.instant à la valeur 0, initialise etat.instant_relax à la valeur entree.relax_time (on fait systématiquement une phase d'effacement avant toute acquisition).

5.2.2.5. Acquisition des deux voies

La fonction "acquisit(voie1,voie2)" effectue un nettoyage du port d'entrée puis réalise l'acquisition des deux voies en simultané.

5.2.2.6. Gestion de la reprise après arrêt d'urgence

Il est prévu diverses possibilités de reprises après arrêt demandé par l'utilisateur. Les arrêts provoqués peuvent être des arrêts d'urgence, mais aussi des arrêts motivés par d'autres considérations. Il est possible de reprendre alors la manipulation le lendemain, par exemple, en repartant du départ ou de là où l'on s'était arrêté.

5.2.2.7. Gestion de la création du nom des fichiers résultats

Cette procédure gère la création du nom complet des résultats de mesure. Les fichiers sont au format TraceCourbe et leur nom est de la forme : date.numero. Par exemple le fichier 940212.001 contient les résultats de la première courbe du

12 février 1994.

5.2.2.8. Fin d'une acquisition

Cette procédure gère la fin d'une acquisition, la création d'un fichier résultat (génération automatique du nom sous la forme 930217.001) et remplissage du fichier avec les points de mesure, le fichier est ensuite complété par les instructions pascal permettant à TraceCourbe de le traiter automatiquement.

5.2.2.9. Prise en compte des conditions expérimentales

On demande à l'utilisateur d'entrer les conditions expérimentales qu'il désire, soit au clavier, soit sous forme d'un fichier de configuration, soit encore en utilisant des valeurs par défaut (exemple de démonstration). Puis on remplit les structures `info` et `entrees`. Un fichier paradigme est reproduit ci-dessous :

```
Manip numéro 2
Michel GOETZ
Cristal BATIO3 D. RYTZ (Y1-2) RgainBOB = 47kohm

23000 39000 2000      valeurs début fin et incrément de r
-30000 -2000 2000    valeurs début fin et incrément de d pas positif
0 0 1                idem pour p
35000 35000 1        idem pour T
14400 3600 60        durée acquisition, d'effacement, période en 1/60s
1 2 2 gain LabNB     (1,2,5..100) / nombre de voies à acquérir / numéro
                        slot de LabNB
514.5nm 10mW 0.1mm   lambda / puissance et waist de laser
2.93mm 4.08mm 3.1mm  largeur / profondeur / hauteur du cristal
```

5.2.2.10. Ouverture et fermeture des obturateurs

L'état de chaque shutter est consigné dans une variable d'état, ici l'état (ouvert ou fermé) du shutter noir est représenté par la variable `etat.noir_on` (true ou false). Cette variable d'état est réactualisée en fonction de l'action exécutée. Voici à titre d'exemple la procédure d'ouverture du "shutter_noir".

5.2.2.11. Commande des moteurs MicroControle

La procédure "`set_r(long r, BOOLEAN physique)`" permet de positionner le moteur de rotation du support d'échantillon à la position absolue désirée. Le déplacement est physiquement effectué si le paramètre physique a la valeur true, sinon rien ne se passe.

Après le déplacement, physique ou non, la variable d'état $etat.r$ est actualisée : on lui affecte la valeur correspondant à la valeur que l'on a passé comme paramètre à la fonction.

CHAPITRE III

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Nous présentons dans ce chapitre une sélection d'un certain nombre de résultats expérimentaux que nous avons obtenus en faisant subir à deux échantillons de titanate de baryum une systématique de mesure. Ceci nous permet de cartographier les échantillons au niveau de critères de qualité que l'on peut définir en fonction de l'utilisation que l'on escompte faire du cristal.

Les résultats figurant ici ne représentent pas, il s'en faut, l'intégralité des mesures effectuées ; ils ont été choisis de façon à donner une illustration des possibilités de mesure et de traitement des résultats que permet notre appareil.

*Rien ne semble vrai qui ne puisse
sembler faux.*

MONTAIGNE.

1. Conditions expérimentales et cristaux

1.1. Échantillons testés

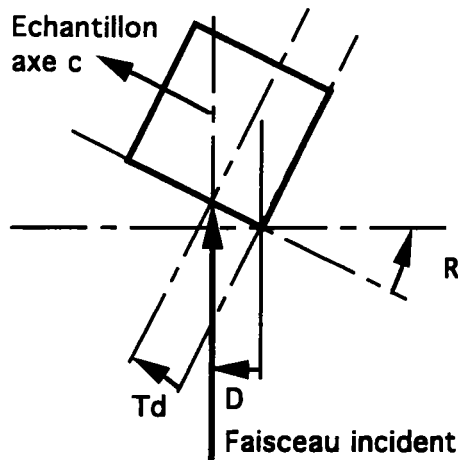


Figure III.1.1. Notations des paramètres géométriques

Nous avons effectué des caractérisations sur deux échantillons monodomains de titanate de baryum. Nous tenons à faire remarquer que ces échantillons ne sont pas des candidats exceptionnels pour la conjugaison de phase autopompée ; mais cela ne nous a pas gêné car notre objectif est ici de montrer, à l'aide de quelques exemples, la capacité et les potentialités d'un instrument conçu et réalisé, plutôt que d'exhiber des performances remarquables de tel ou tel échantillon.

Échantillon 1

Cristal de titanate de baryum synthétisé en Chine à l'Institut of Physics (Chinese Academy of Sciences) de Beijing. Ses dimensions sont :

- profondeur $L_x = 4.38$ mm
- largeur (// axe c) $L_y = 4.39$ mm
- hauteur $L_z = 3.02$ mm

Échantillon 2

Cristal de titanate de baryum Y1-2 de Sandoz Optoelectronics à Huningue fourni gracieusement par Daniel Rytz. Ses dimensions sont :

- profondeur $L_x = 4.08$ mm
- largeur (// axe c) $L_y = 2.93$ mm
- hauteur $L_z = 3.10$ mm

1.2. Conditions expérimentales de la première série de mesure

Dans un premier temps, le dispositif expérimental était à régler à la main et les acquisitions, analogiques, étaient visualisées à l'aide d'une table traçante. L'ensemble des courbes expérimentales est contenu dans un volume en annexe¹. La régulation de température n'était pas encore mise au point.

Les acquisitions sont typiquement de 280 ou 560 secondes.

Dans cette série de mesures, on fera varier R de 3000 (30 degrés) à 600 (6 degrés par pas de 300 incréments (3 degrés)). Un compteur incrémental relié à cette table UR100 permet l'affichage de ce paramètre R .

Le calibrage de la table traçante a été réalisé manuellement. L'axe des temps est gradué de telle manière que 1 mm corresponde à 1 seconde (sauf indication contraire). Le calibre de la table traçante est de 10 mV/cm et le calibre du mesureur de puissance optique est tel que 4 cm sur la table traçante représentent 1 mW mesuré par le photodétecteur, c'est à dire 2,56 mW d'onde conjuguée.

Dans toute cette campagne de mesures, l'intensité incidente sur le cristal (I_{ic}) est de 100 mW. D'autres mesures seront faites par la suite avec d'autres valeurs de I_{ic} .

Afin de rendre le faisceau incident plus fin, on l'a focalisé à l'aide d'une lentille convergente.

Dans toute cette campagne de mesures, le faisceau incident arrive à mi - hauteur du cristal.

Seul le premier échantillon a été soumis à cette première série de mesures.

1.3. Conditions expérimentales de la seconde série de mesure

Le dispositif expérimental est cette fois ci le dispositif régulé en température et automatisé. Les deux échantillons subiront la systématique de mesure.

2. Résultats de mesure de réflectivité

2.1. Réflectivité du miroir à conjugaison de phase en fonction du temps à température donnée

Dans les figures qui suivent (figures III.2.1 à 7.), nous reportons quelques résultats de mesure typiques observés sur les deux échantillons soumis à

¹ Résultats expérimentaux, volume N°1.

investigation. Ces mesures ont été faites dans les conditions expérimentales communes suivantes :

- température (régulée) ambiante : 25°C
- source : laser Argon continu
- longueur d'onde : 514.5 nm
- puissance incidente : 10 mW
- durée de l'acquisition : 240 s
- durée de l'effacement préalable : 60 s

Le temps est exprimé en secondes et la réflectivité à pleine échelle est de 20%. Les mesures présentées correspondent aux conditions géométriques suivantes :

Échantillon 1 :

- | | | |
|------------------|---------|------------|
| • figure III.2.1 | R = 6° | D = 2.8 mm |
| • figure III.2.2 | R = 6° | D = 2.0 mm |
| • figure III.2.3 | R = 9° | D = 2.4 mm |
| • figure III.2.4 | R = 24° | D = 2.6 mm |

Échantillon 2 :

- | | | |
|------------------|---------|------------|
| • figure III.2.5 | R = 5° | D = 1.8 mm |
| • figure III.2.6 | R = 13° | D = 1.4 mm |
| • figure III.2.7 | R = 19° | D = 1.2 mm |
| • figure III.2.8 | R = 21° | D = 1.8 mm |

Les résultats concernant l'échantillon 1 permettent de mettre en évidence quelques comportements typiques :

- à la figure III.2.1 : amorçage au bout d'une dizaine de secondes, augmentation rapide et stabilisation au bout de 50 secondes ;
- dans certains cas (par exemple à la figure III.2.4) l'activation, une fois amorcée, augmente rapidement vers des fortes valeurs (environ 20%) puis diminue et se stabilise à une valeur un peu plus réduite ;
- à la figure II.2.2, on peut remarquer un comportement plus ou moins chaotique, mais avec des réflectivités entre 0 et 20% ;
- à la figure III.2.3, on a cette fois un comportement relativement périodique, avec une période de l'ordre de la minute.

On remarque à la figure II.2.6, concernant l'échantillon 2, une réflectivité à la fois instable et de faible valeur : il s'agit typiquement d'un comportement de peu d'intérêt. En revanche, dans les figures III.2.5 - 7 - 8, on a représenté des comportements présentant des temps de réponse faibles, de bonnes réflectivités et stabilités.

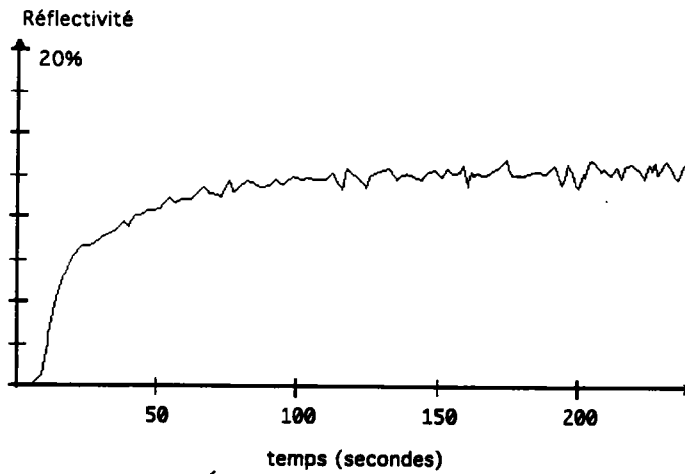


Figure III.2.1. Échantillon 1 ; $R = 6^\circ$; $D = 2.8 \text{ mm}$

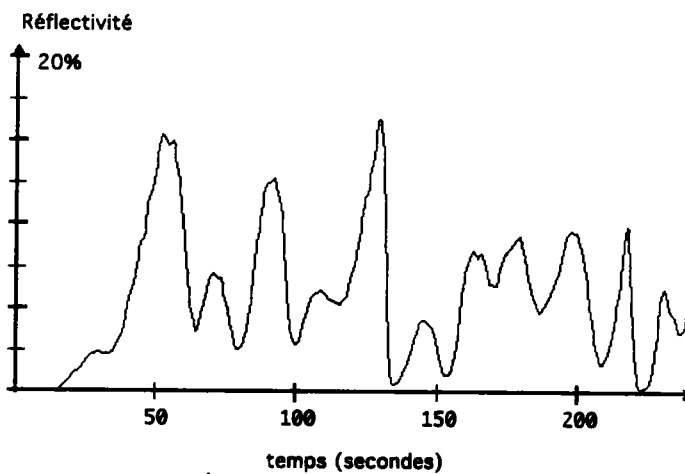


Figure III.2.2. Échantillon 1 ; $R = 6^\circ$; $D = 2.0 \text{ mm}$

Il apparaît à la figure II.2.7 un phénomène de saturation : il s'agit d'une saturation au niveau de la représentation graphique uniquement ; nous avons choisi en effet de présenter toutes ces courbes à la même échelle (plein échelle correspondant à 20%) de manière à pouvoir les comparer visuellement de manière aisée. La réflectivité atteint 30% dans les conditions géométriques en question.

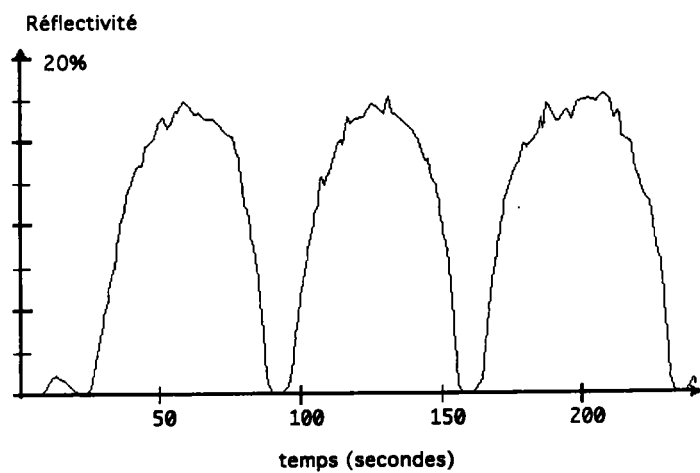


Figure III.2.3. Échantillon 1 ; $R = 9^\circ$; $D = 2.4 \text{ mm}$

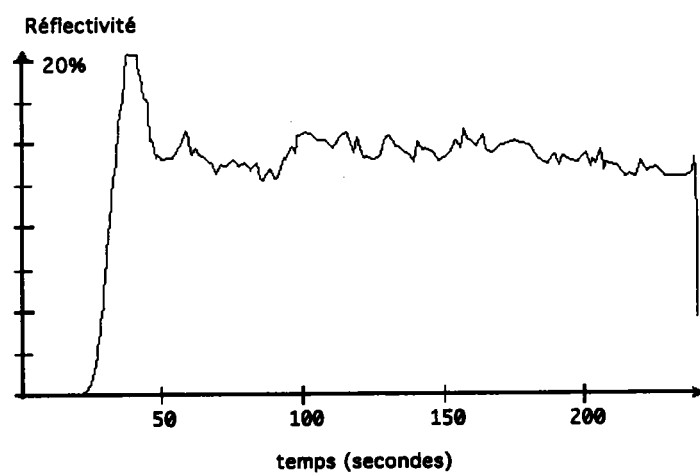


Figure III.2.4. Échantillon 1 ; $R = 24^\circ$; $D = 2.6 \text{ mm}$

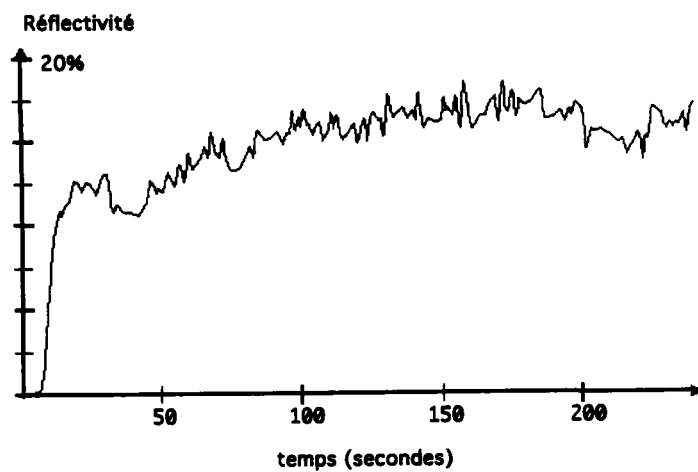


Figure II.2.5. Échantillon 2 ; $R = 5^\circ$; $D = 1.8 \text{ mm}$

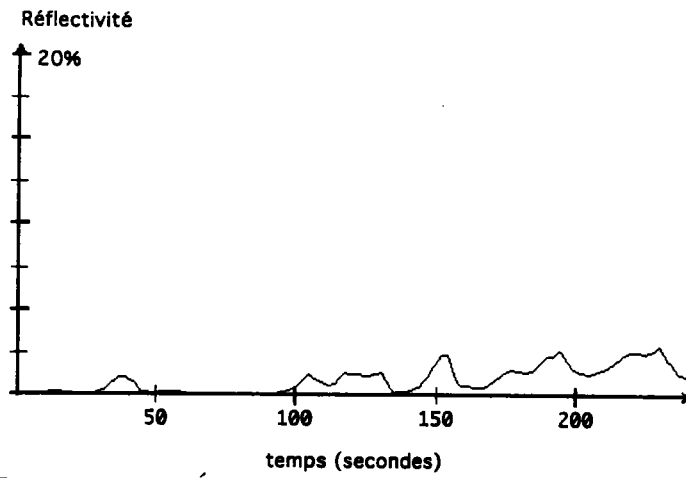


Figure III.2.6. Échantillon 2 ; $R = 13^\circ$; $D = 1.4$ mm

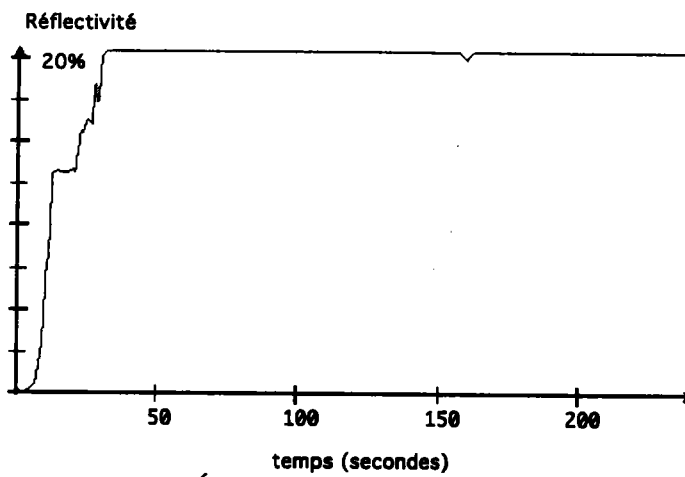


Figure III.2.7. Échantillon 2 ; $R = 19^\circ$; $D = 1.2$ mm

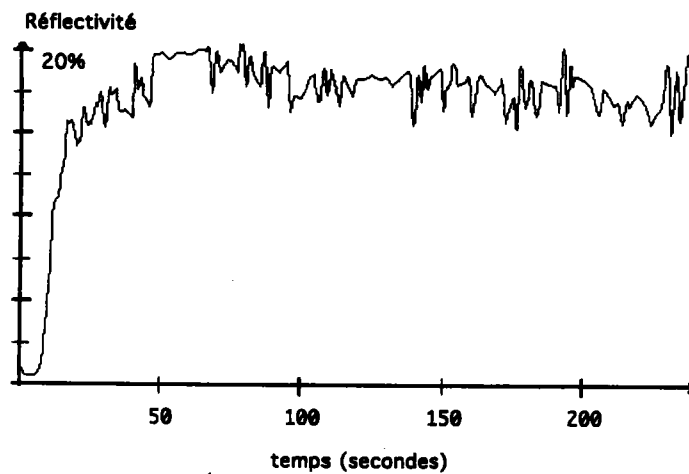


Figure III.2.8. Échantillon 2 ; $R = 21^\circ$; $D = 1.8$ mm

2.2. Influence de la température

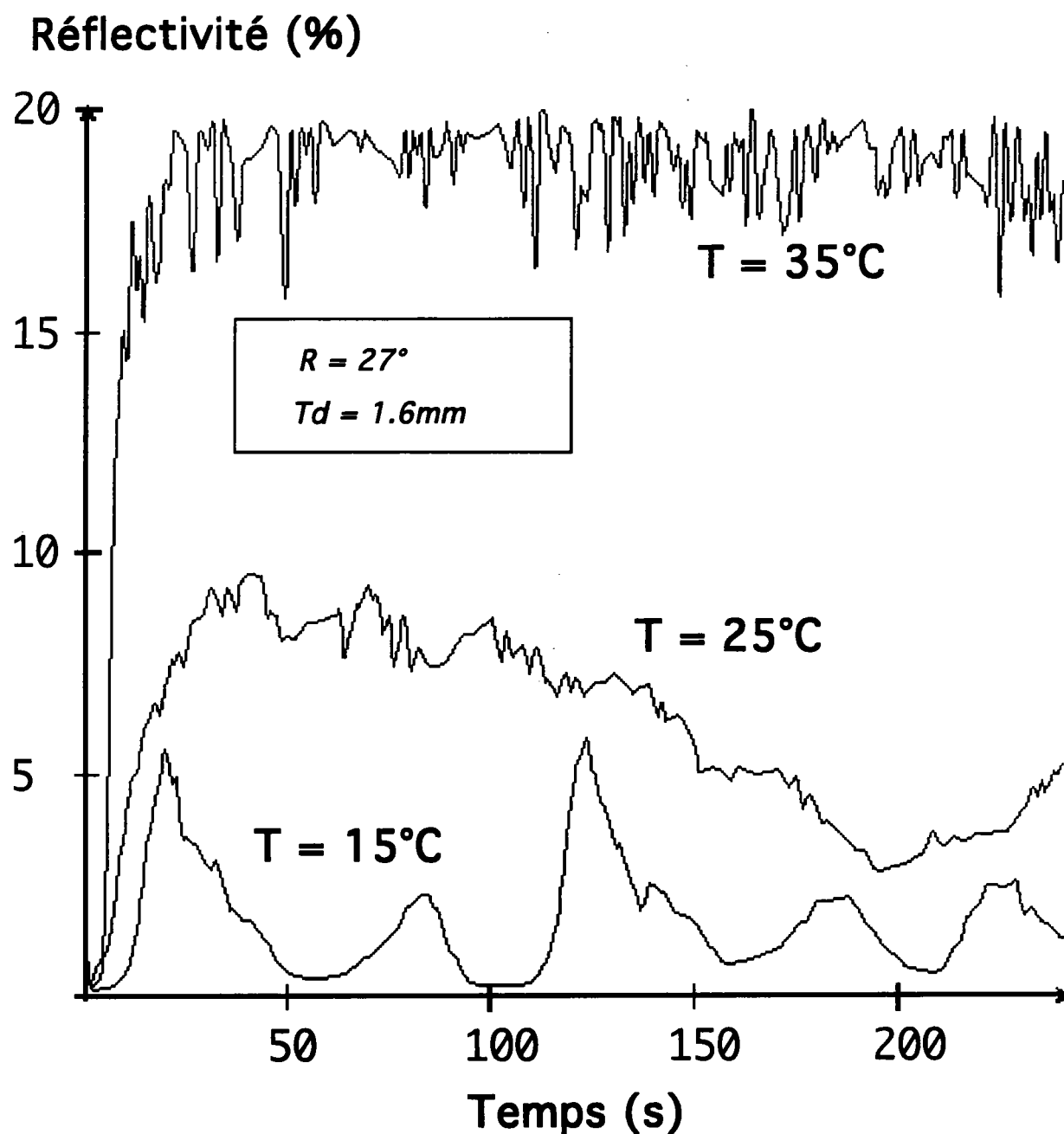


Figure III.2.9. Influence de la température sur le comportement temporel de l'onde conjuguée (Échantillon 1).

On a représenté à la figure II.2.9 la dépendance temporelle de l'onde conjuguée pour trois valeurs de la température : 35°C , 25°C et 15°C . L'angle d'incidence et l'abscisse du point d'incidence sont fixés pour les trois acquisitions ; ils ont respectivement pour valeur : $R = 27^\circ$ et $Td = 1.6\text{mm}$.

Cette figure met clairement en évidence l'influence de la température de l'échantillon sur le comportement temporel du miroir en particulier :

- sa stabilité
- sa réflectivité à saturation
- son temps de réponse

La meilleure réflectivité (de l'ordre de 20%) est obtenue pour une température de 35°C. Si l'on abaisse la température de l'échantillon, on remarque que la réflectivité diminue de manière significative et donne naissance à une forte instabilité.

2.3. Influence de la puissance d'illumination sur la réflectivité

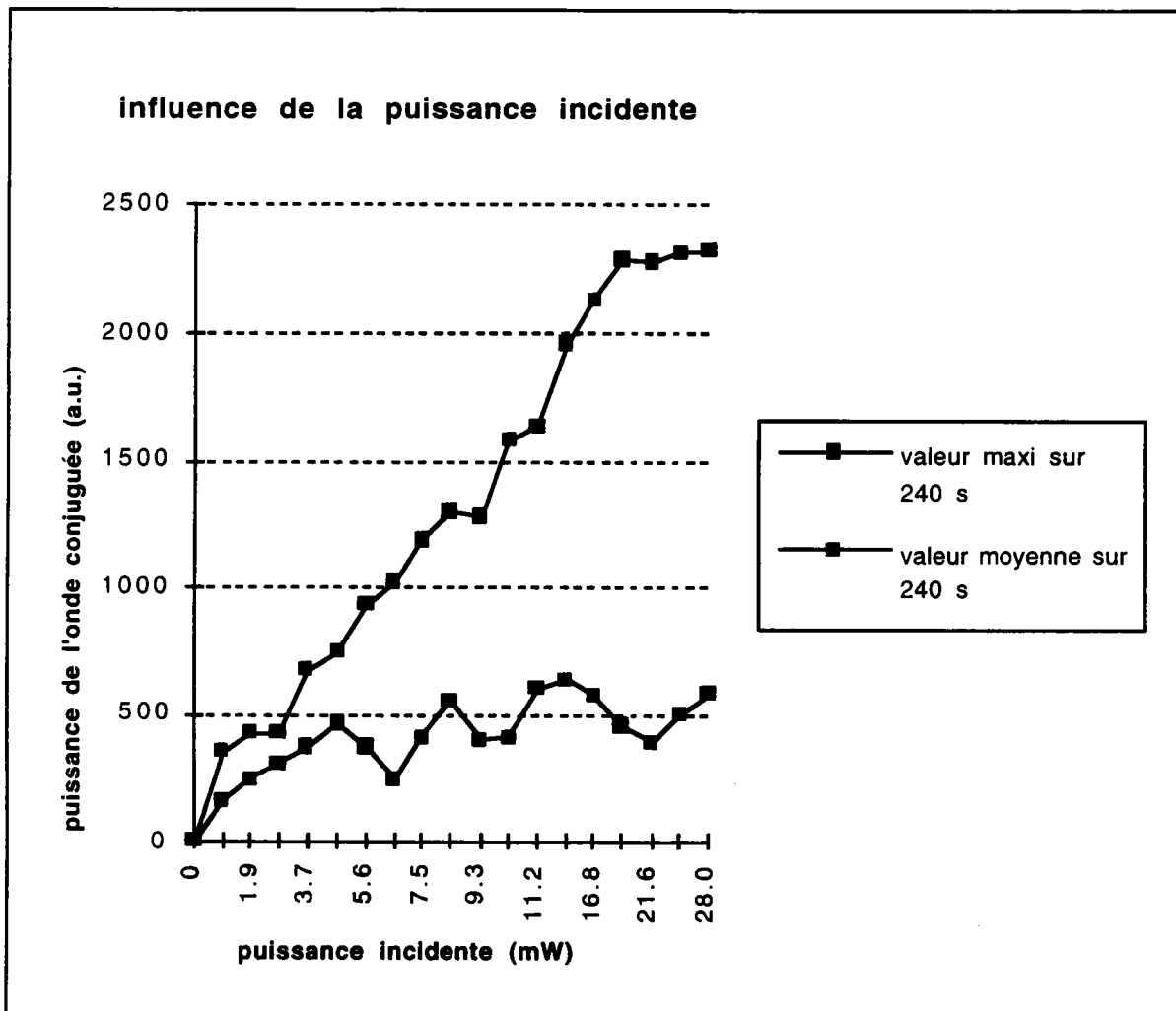


Figure III.2.10. Influence de la puissance incidente sur la valeur maximale de la réflectivité et sur sa valeur moyenne.

Nous avons représenté à la figure III.2.10 l'influence de la puissance incidente sur la valeur maximale de la réflectivité ainsi que sur sa valeur moyenne sur 240 secondes. Les mesures ont été effectuées sur l'échantillon 1.

En ce qui concerne la valeur maximale, on remarque une dépendance quasi-linéaire jusqu'à 20 mW, puis apparaît le phénomène de saturation de l'effet

photoréfractif.

En ce qui concerne la valeur moyenne, calculée à partir de l'instant initial, elle dépend beaucoup du temps de réponse du dispositif ainsi que de sa stabilité.

2.4. Reproductibilité des acquisitions

Nous avons cherché à savoir si les mesures effectuées étaient reproductibles. Étant donné le temps passé pour cartographier complètement un échantillon, il ne nous a pas paru raisonnable d'envisager d'effectuer toutes les acquisitions un grand nombre de fois.

Nous avons donc sélectionné deux séries de mesures, permettant de mettre en évidence la reproductibilité des acquisitions, dont présentons ci dessous des résultats .

Les conditions expérimentales de la première série sont les suivantes (voir figure III.2. 11) :

- échantillon 1
- $T = 25^{\circ}\text{C}$
- $R = 9^{\circ}$
- $D = 1.6 \text{ mm}$
- puissance incidente : 28 mW
- durée des acquisitions : 300 secondes
- durée de l'effacement : 60 secondes

Les conditions expérimentales de la deuxième série sont les suivantes (voir figure III.2. 12) :

- échantillon 1
- $T = 25^{\circ}\text{C}$
- $R = 21^{\circ}$
- $D = 0,8 \text{ mm}$
- puissance incidente : 28 mW
- durée des acquisitions : 300 secondes
- durée de l'effacement : 60 secondes

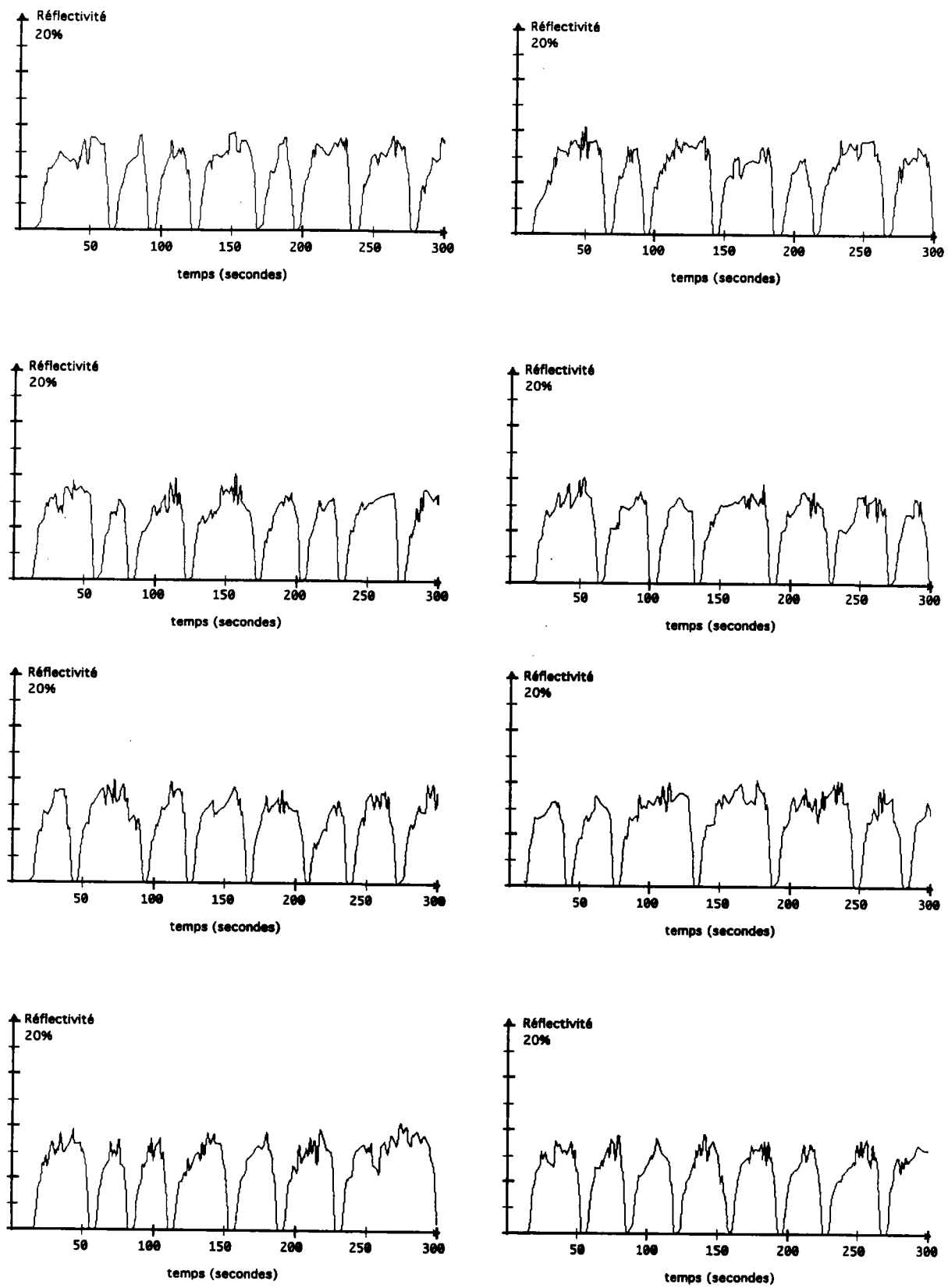


Figure III.2.11. Essais de reproductibilité des acquisitions

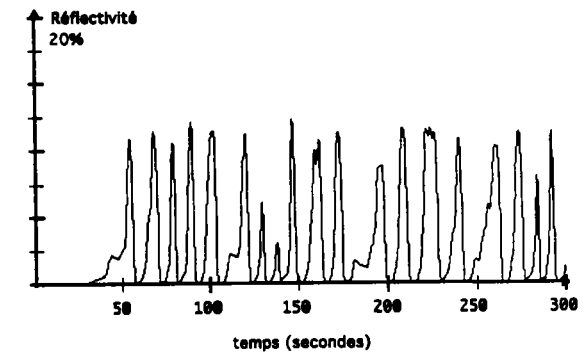
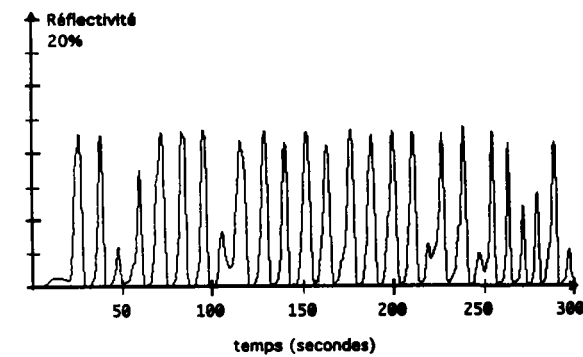
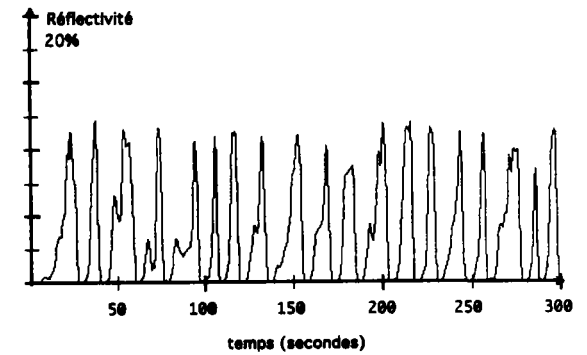
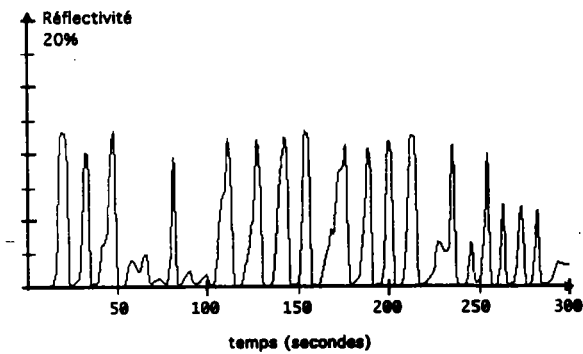
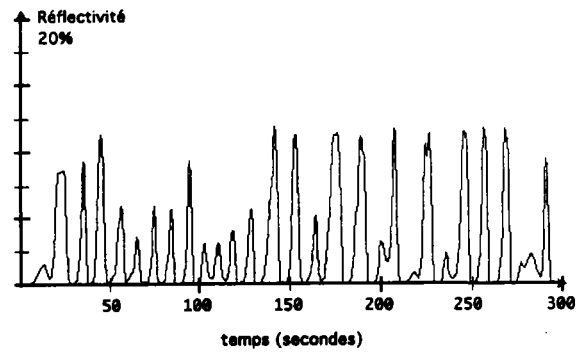
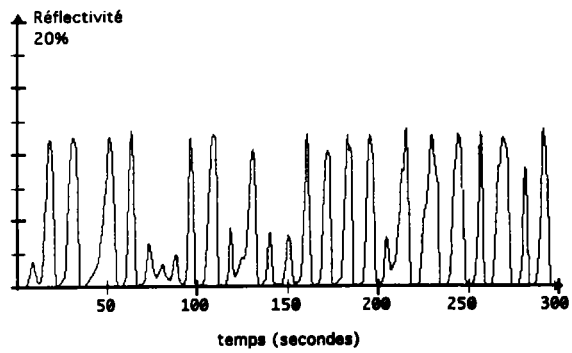
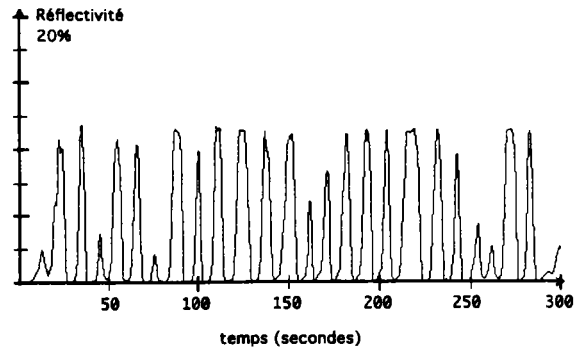
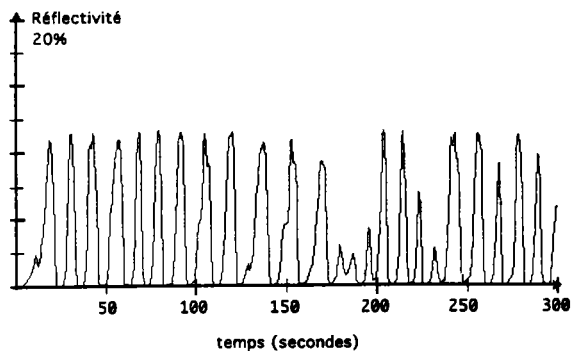


Figure II.2.12. Essais de répétabilité des acquisitions (deuxième série)

2.5. Etude d'un régime d'oscillations périodiques en fonction de la température

Nous avons observé précédemment (voir figure III.2.3) que dans certaines conditions, il est possible d'observer des comportements temporels présentant une périodicité. Afin de montrer une des potentialités de l'instrument que nous avons conçu, une étude en fonction de la température de ce comportement périodique est reporté sur les figure III.2. 13 - 14 - 15.

Les acquisitions ont été menées sur l'échantillon 1

- dans les conditions géométriques : $D = 1 \text{ mm}$; $R = 21^\circ$
- avec une puissance incidente de 28 mW
- une phase d'effacement de 60 secondes

et pour ces températures allant de 16°C à 60°C par pas de 2°C .

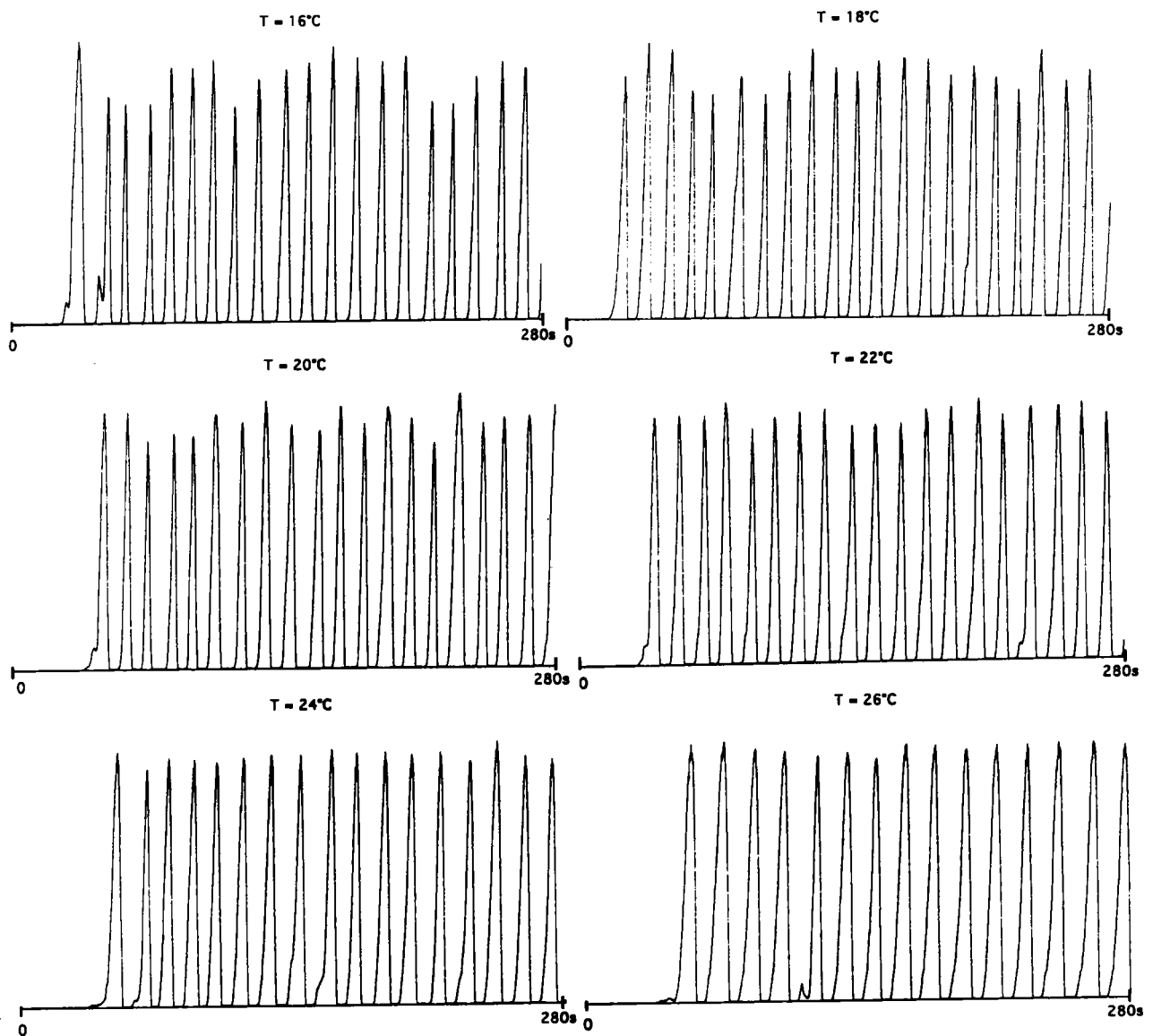


Figure III.2.13. Évolution d'un comportement oscillatoire en fonction de la température, pour des températures de 16°C à 26°C

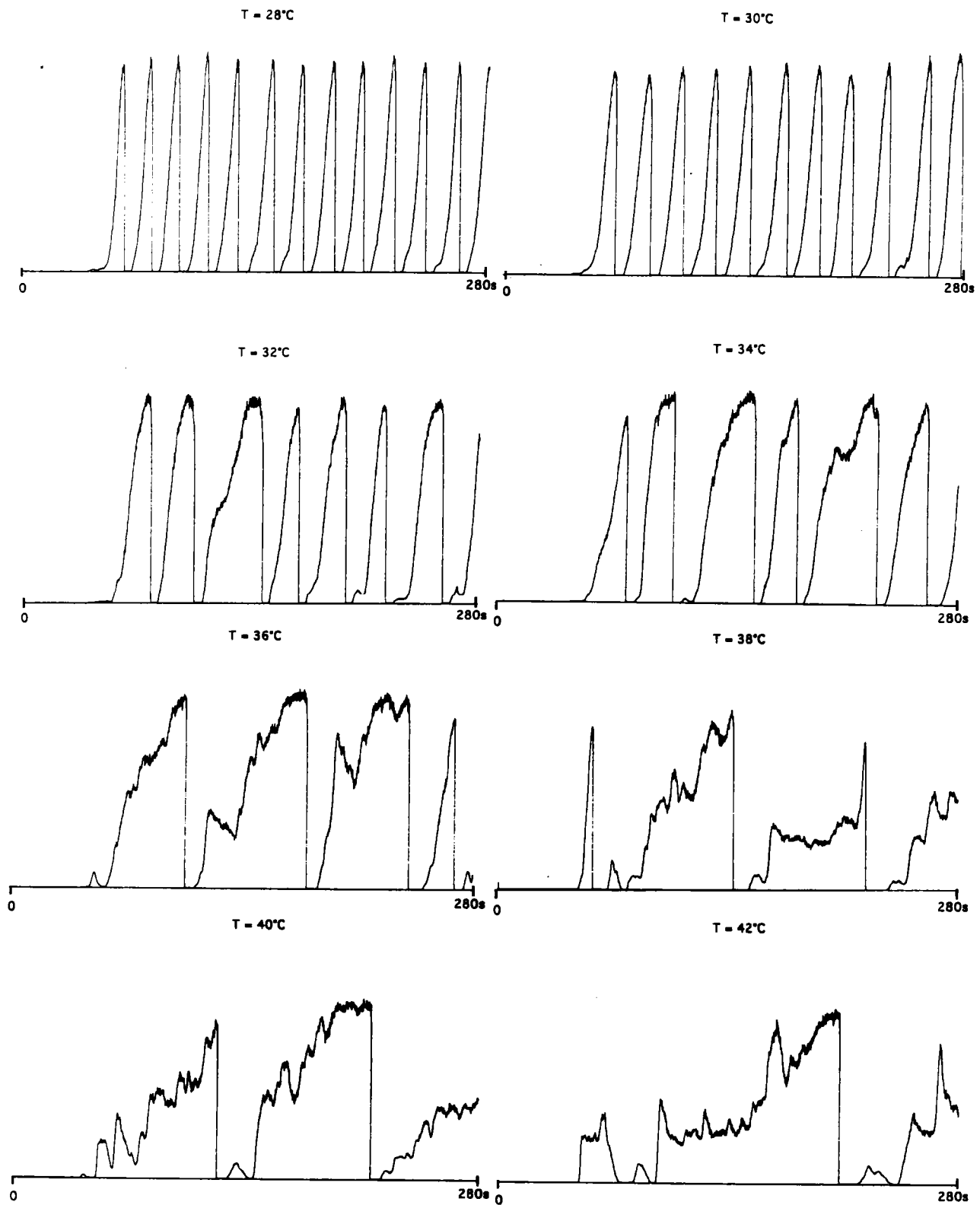


Figure III.2.14. Évolution d'un comportement oscillatoire en fonction de la température, pour des températures de 28°C à 42°C

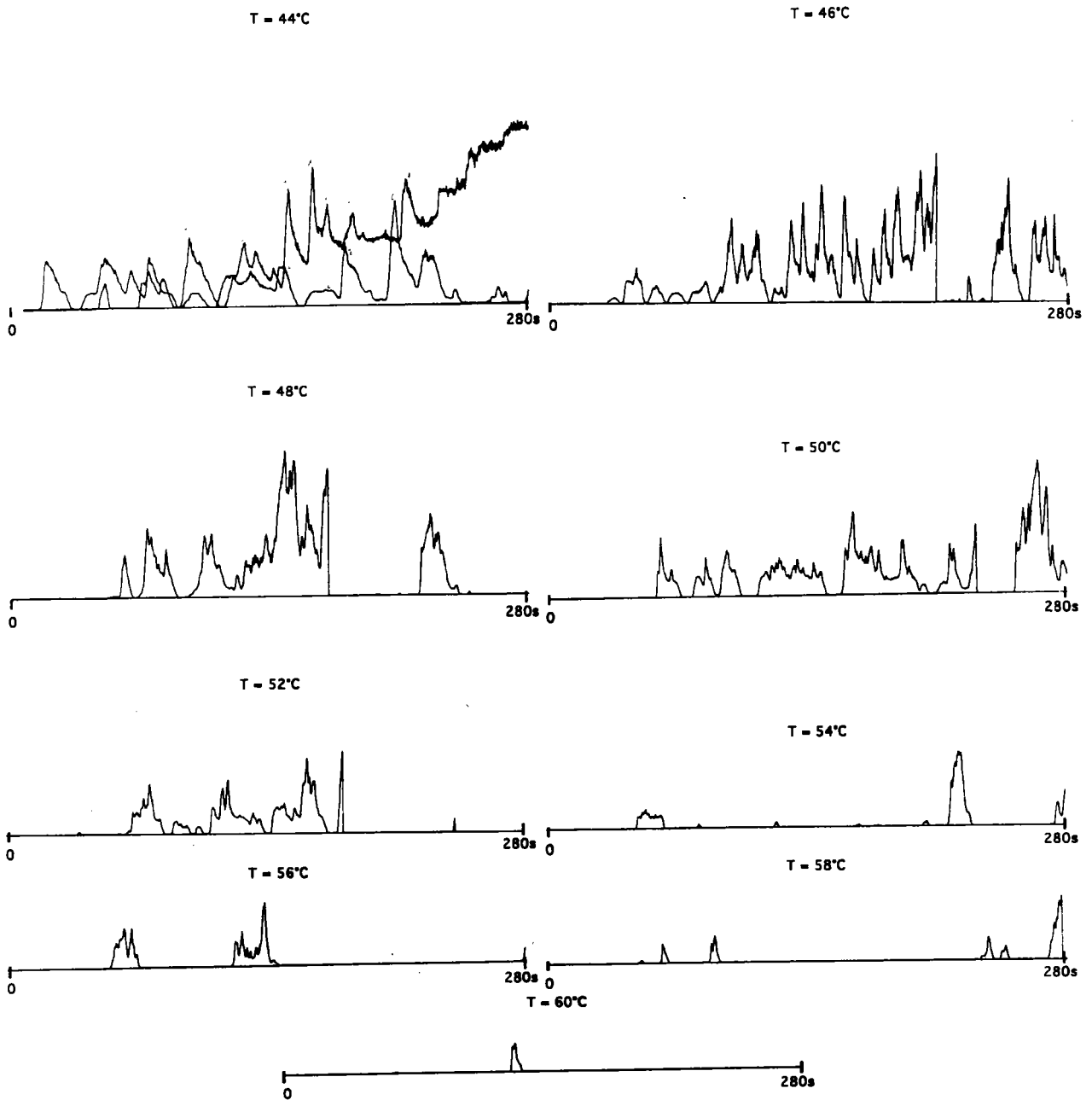


Figure III.2.15. Évolution d'un comportement oscillatoire en fonction de la température, pour des températures de 44°C à 60°C

On peut remarquer que la période du phénomène augmente avec la température. Elle commence à environ 10 secondes pour des températures de 16°C, puis atteint 25 secondes à 32 °C.

On observe ensuite une dégradation de la périodicité vers 32°C, avec apparition d'un décrochage brutal, extinction et activation chaotique (de 34°C à 42°C).

Au dessus de 40°C, le comportement est très peu stable ; et à partir de 50°C, l'onde conjuguée disparaît progressivement.

Nous avons représenté respectivement aux figures III.2.16 et III.2.17 l'évolution de la période des oscillations d'une part et du temps d'apparition de l'onde conjuguée d'autre part, en fonction de la température

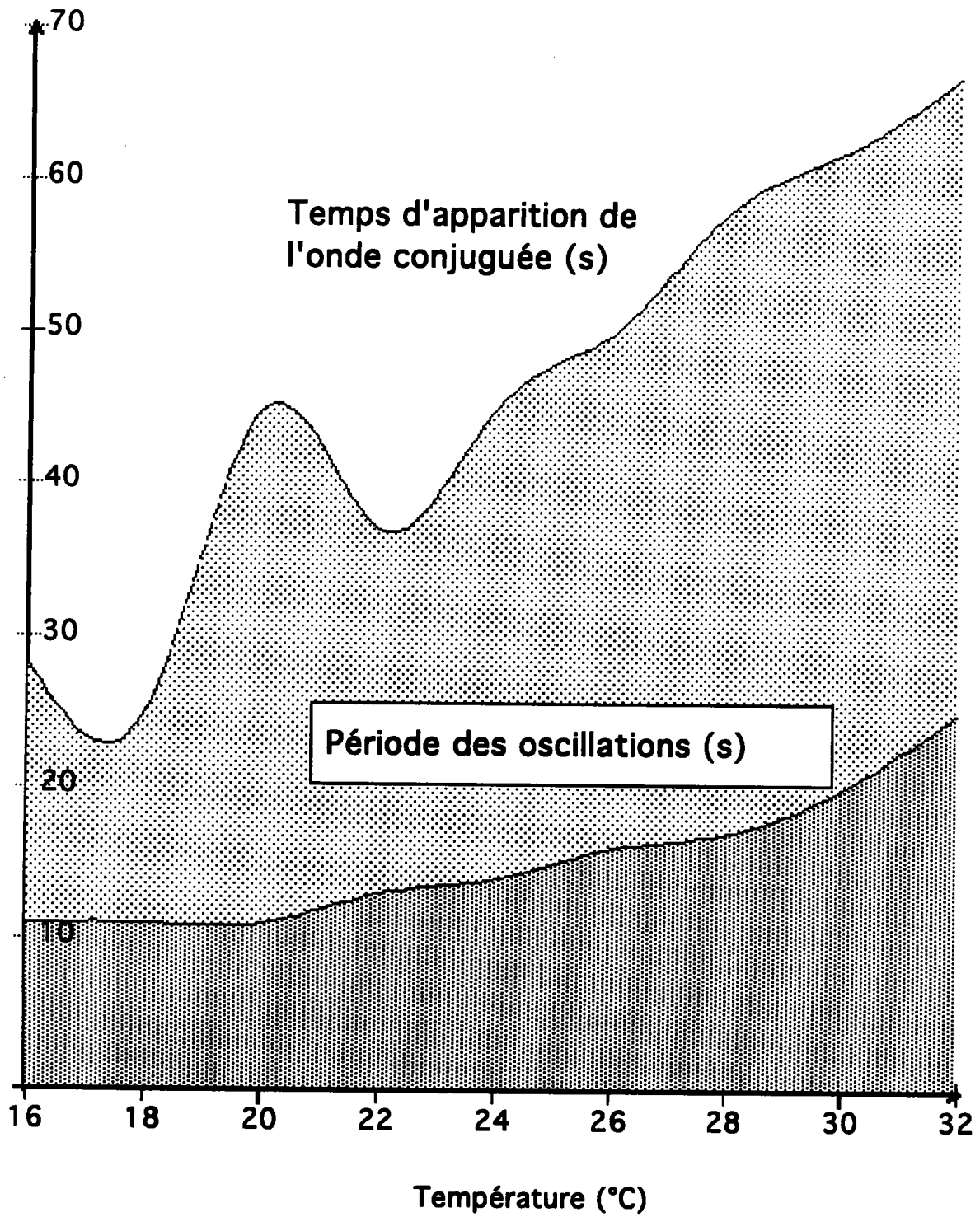


Figure III.2.16. Évolution du temps d'apparition de l'onde conjuguée et de la période des oscillations en fonction de la température.

3. Classification et analyse des résultats expérimentaux

Les quelques résultats expérimentaux donnés en illustration dans le paragraphe 2 du présent chapitre mettent en évidence la variété de la réponse temporelle du miroir à conjugaison de phase autopompé CAT.

Dans ce paragraphe, nous proposons de réaliser une classification de ces résultats selon des comportements types pour aboutir à une cartographie dans le plan (Td - R).

L'analyse proposée correspond à deux étapes de notre travail :

3.1. une analyse et une cartographie "manuelle" : c'est à dire qui a été faite avant l'automatisation de notre banc de mesure au niveau du traitement des données ; elle ne concerne que des données correspondant à l'échantillon 1.

3.2. une analyse et une cartographie utilisant "ScanFich", programme que nous avons mis au point et permettant un dépouillement automatisé des résultats expérimentaux ; les deux échantillons ont subi ce type d'investigation.

3.1. Analyse initiale avant automatisation

3.1.1. Classification des comportements en réflectivité

Nous avons pu mettre en évidence quatre types de comportement (voir figures III.3.1-2).

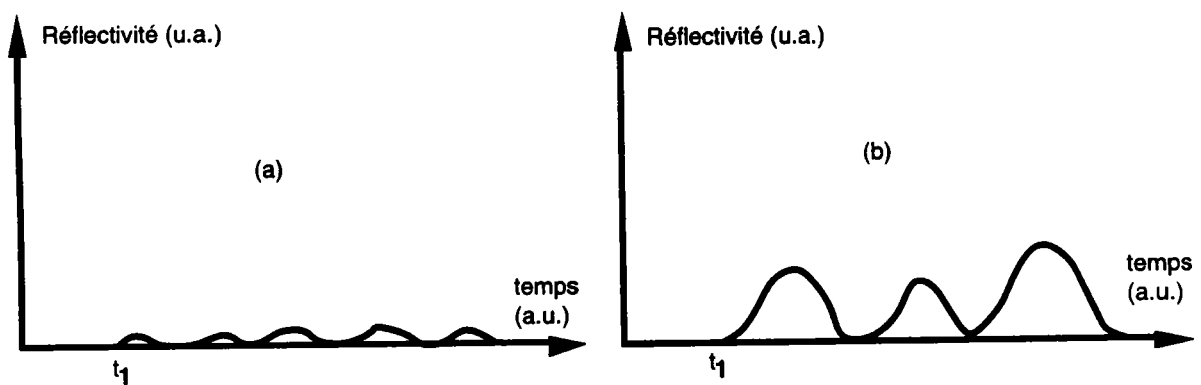


Figure III.3.1. Deux comportements types où l'onde conjuguée retombe à zéro.

Le premier type de comportement (figure III.3.1.a) correspond à la fois à de très faibles réflectivité et une très mauvaise stabilité. Nous nous retrouverons dans ce cas en bordure de zone utile (voir la cartographie de l'échantillon plus loin).

Dans le deuxième cas (figure III.3.1.b), l'intensité de l'onde conjuguée n'est plus forcément négligeable, sans toutefois atteindre des valeurs très élevées, mais elle est très instable et retombe à zéro très fréquemment.

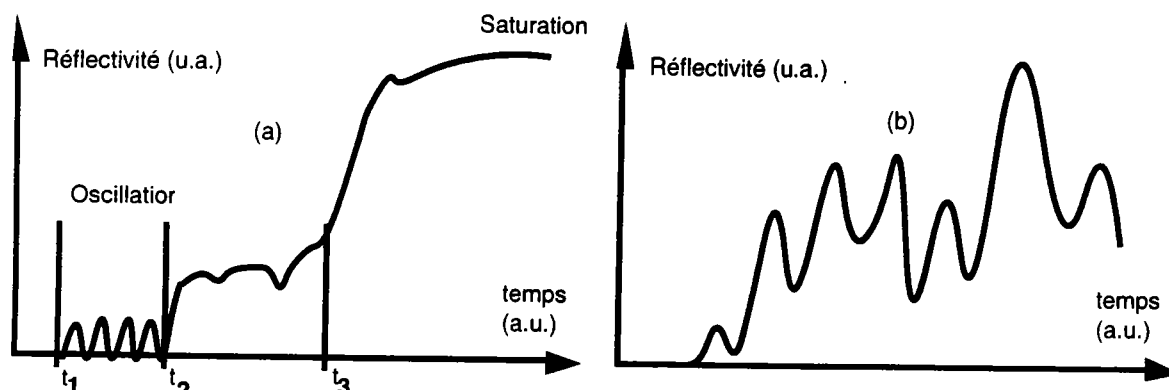


Figure III.3.2. Deux comportements types donnant de fortes réflectivités.

Dans le troisième cas (figure III.3.2.a), le plus intéressant en pratique, on distingue trois zones : dans un premier temps, rien ne se passe ($t < t_1$), puis entre t_1 et t_2 , l'onde apparaît, chute à zéro, réapparaît de façon régulière tout en atteignant des maxima allant croissant. Entre t_2 et t_3 , l'onde ne chute plus à zéro mais elle oscille encore. Ensuite, après t_3 , l'intensité augmente brusquement pour atteindre un régime permanent de saturation.

Dans le quatrième cas (figure III.3.2.b), l'intensité de l'onde effectue de grandes oscillations : on ne peut pas parler de régime permanent, toutefois, elle atteint des valeurs élevées.

3.1.2. Cartographie dans le plan Td - R du type de comportement

Nous avons regroupé sur la figure III.3.3. ces divers comportements, de manière à représenter synthétiquement lequel apparaît en fonction des paramètres expérimentaux que sont l'angle d'incidence (R) et la position transversale du point d'incidence (Td).

Nous appellerons ce type de représentation graphique une "cartographie" de l'échantillon, en l'occurrence de l'échantillon 1. D'autres cartographies seront présentées ci-après ; elles permettent d'une manière générale de donner une vue globale du comportement temporel de l'onde conjuguée obtenue par l'échantillon considéré, par rapport à un critère de qualité donné.

3.1.3. Cartographie dans le plan Td - R de la réflectivité maximale

A la figure III.3.4. est représentée la cartographie, dans le même système d'axes que pour la précédente, donnant la réflectivité maximale du miroir à conjugaison de phase utilisant l'échantillon 1.



Figure III.3.3. Cartographie donnant le type de comportement temporel pour l'échantillon 1 dans le plan (Td - R).

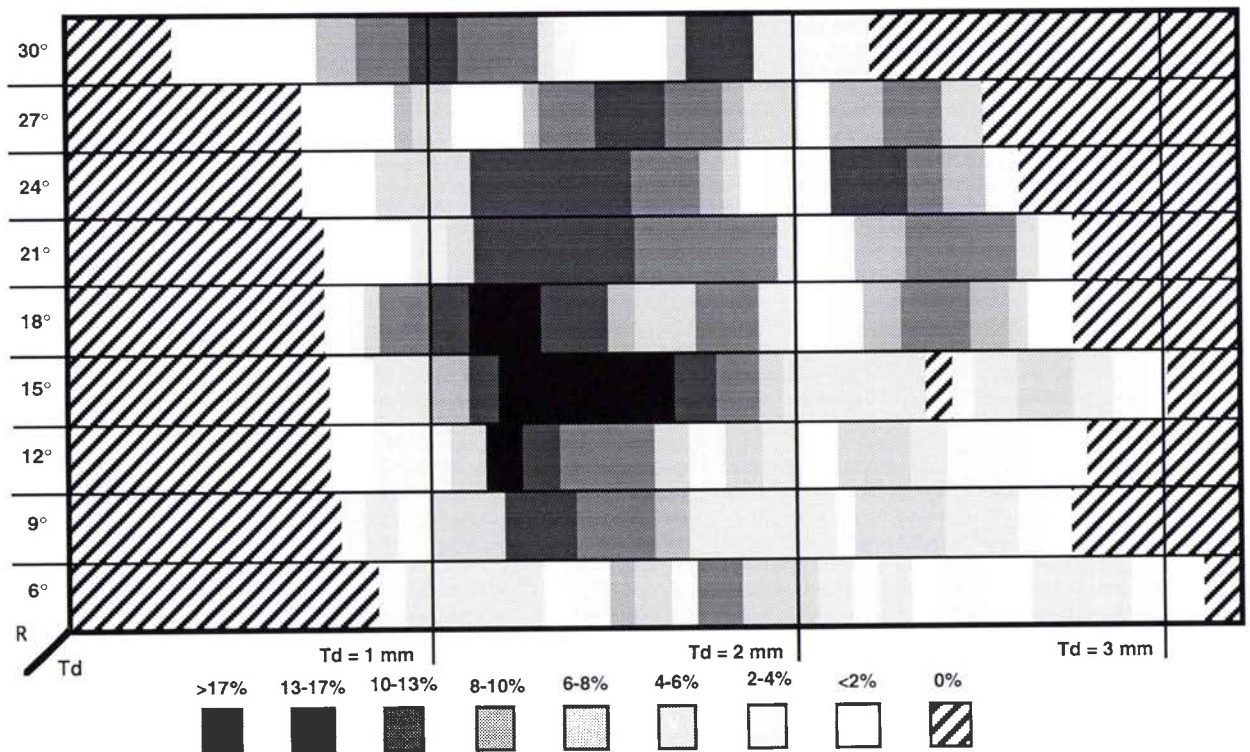


Figure III.3.4. Cartographie donnant la réflectivité maximale pour l'échantillon 1 dans le plan (Td - R).

3.1.4. Cartographie du temps d'apparition et de stabilisation de l'onde conjuguée

Il nous est apparu important, dans le cas du comportement n°3, c'est à dire celui donnant une bonne stabilisation à un niveau intéressant après une phase oscillante, de réaliser un autre type de cartographie.

A titre d'exemple, nous avons donné à la figure III.3.5. celle correspondant à l'échantillon 1 et à un angle d'incidence de 6 degrés.

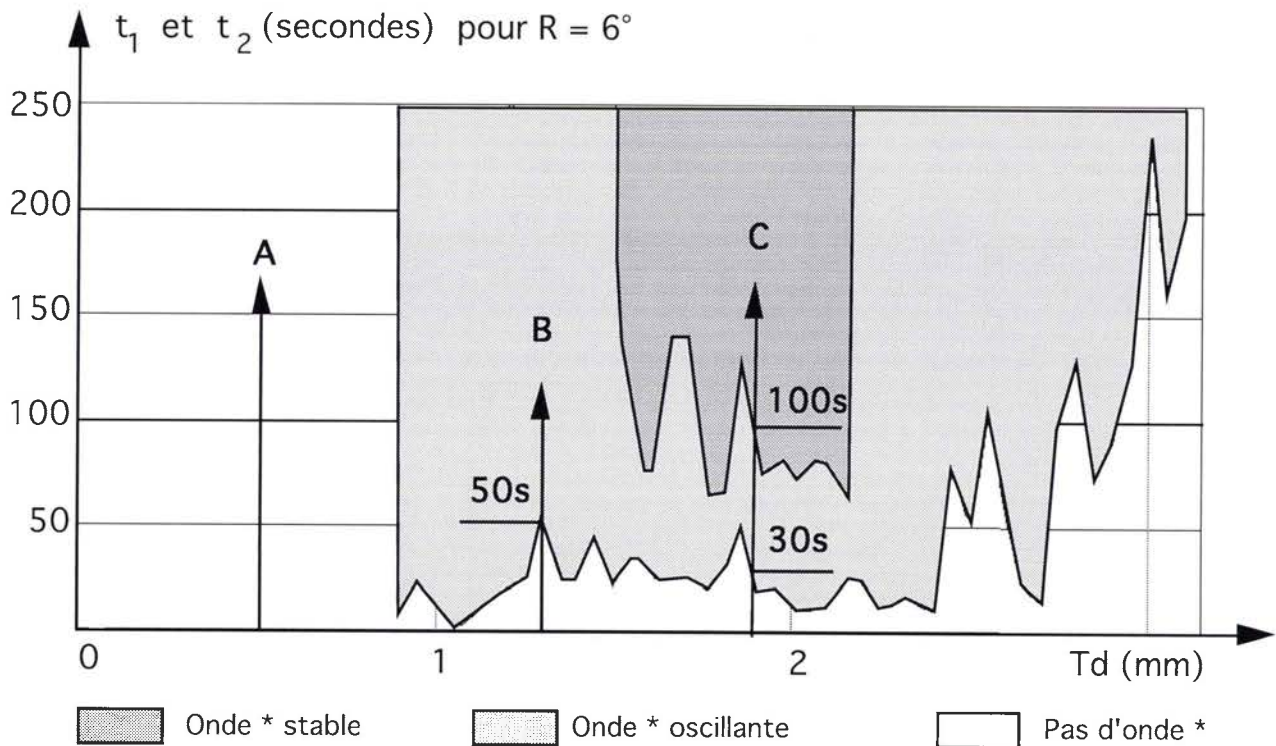


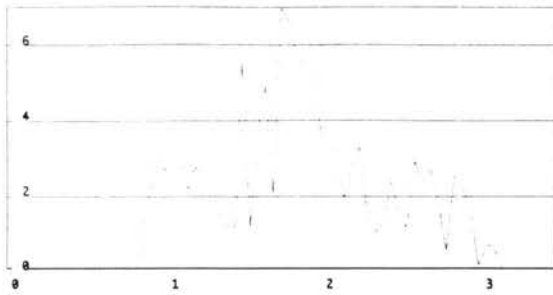
Figure III.3.5. Temps de réponse et de stabilisation en fonction de la position du point d'incidence

Pour expliquer l'intérêt de ce type de cartographie, nous avons représenté à la figure III.3.5. ce qui se passe pour trois positions successives du point d'incidence

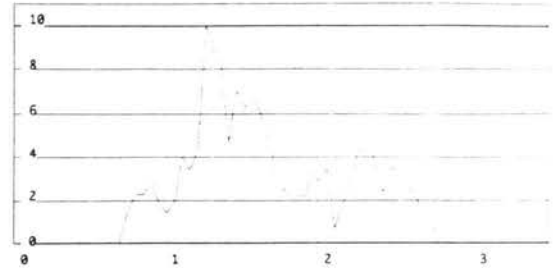
- en A ($T_d = 0.5$ mm) : l'onde conjuguée n'apparaît pas
- en B ($T_d = 1.3$ mm) : l'onde conjuguée apparaît au bout de 50 secondes mais ne se stabilise pas
- en C ($T_d = 1.8$ mm) : l'onde conjuguée apparaît au bout de 30 secondes et se stabilise au bout de 100 secondes.

3.1.4. Cartographie de l'intensité maximale de l'onde conjuguée sur la fenêtre temporelle

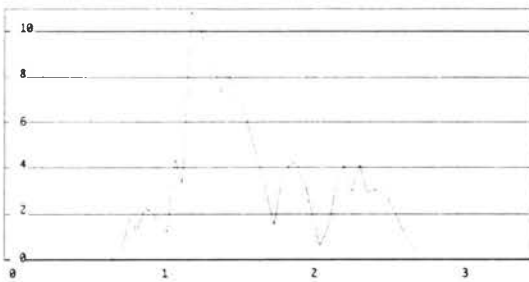
Maximum de l'onde conjuguée en fonction de Td (mm) ; R = 6°



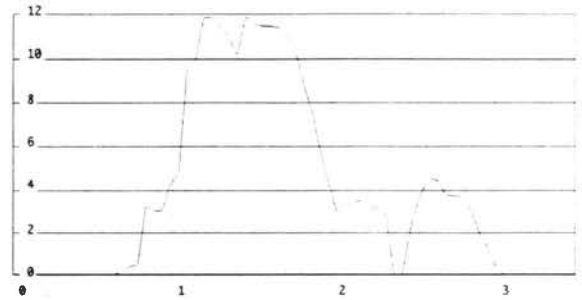
Maximum de l'onde conjuguée en fonction de Td (mm) ; R = 9°



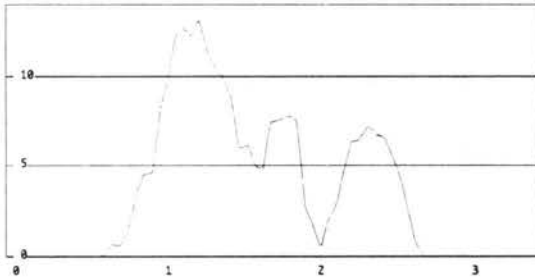
Maximum de l'onde conjuguée en fonction de Td (mm) ; R = 12°



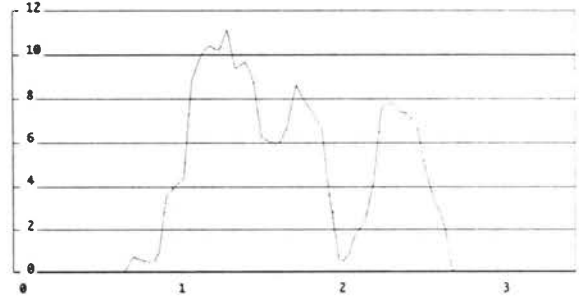
Maximum de l'onde conjuguée en fonction de Td (mm) ; R = 15°



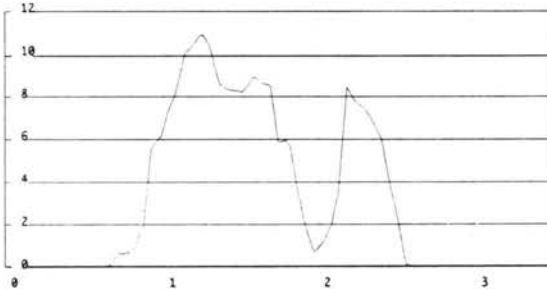
Maximum de l'onde conjuguée en fonction de Td (mm) ; R = 18°



Maximum de l'onde conjuguée en fonction de Td (mm) ; R = 21°



Maximum de l'onde conjuguée en fonction de Td (mm) ; R = 24°



Maximum de l'onde conjuguée en fonction de Td (mm) ; R = 27°

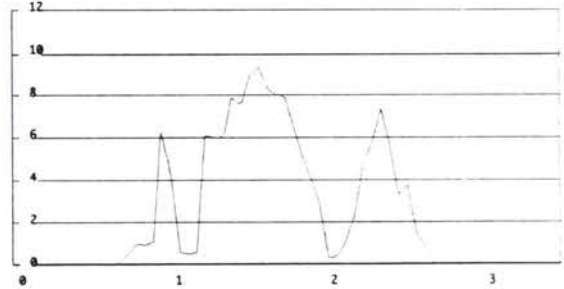


Figure III.3.6. Réflectivité maximale (en %) de l'onde conjuguée en fonction de la position transversale (Td) du point d'incidence, et pour des angles d'incidence donnés (de 6° à 27°).

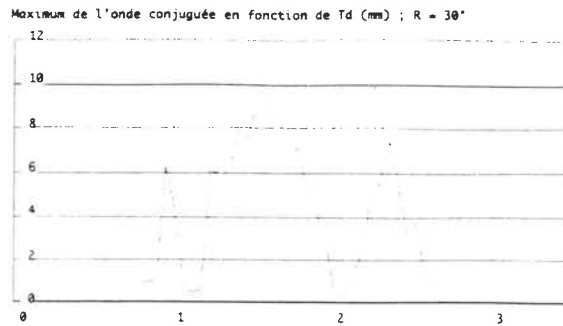


Figure III.3.7. Intensité maximale de l'onde conjuguée en fonction de la position transversale (Td) du point d'incidence, et pour un d'incidence de 30°.

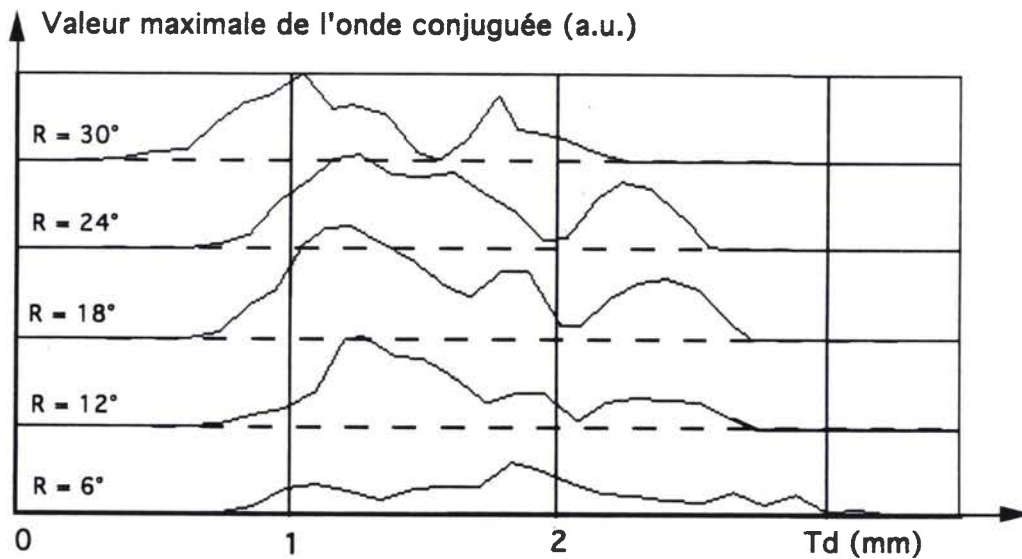


Figure III.3.8. Représentation synthétique de la valeur maximale de l'onde conjuguée en fonction de R et de Td.

Nous avons représenté à la figure III.5.8 une cartographie synthétique donnant la valeur maximale de l'onde conjuguée en fonction de R et de Td. Il apparaît clairement une "bande utile en Td", cette bande se déplaçant vers les faibles valeurs de Td lorsque l'angle d'incidence R augmente.

Nous proposerons au chapitre IV un modèle physique permettant de calculer la valeur maximale de l'onde conjuguée en fonction de Td et R (et de la température T) ; et cette modélisation donne également une "bande utile en Td" qui se déplace vers les Td décroissants lorsque R augmente.

3.2. Analyse automatisée

3.2.1. Introduction et objectifs

Nous nous sommes rendus compte assez rapidement qu'une cartographie complète d'un échantillon contenait un très grand nombre d'informations. Et une exploitation manuelle de l'ensemble s'avère être très fastidieuse et très longue. De nombreuses erreurs peuvent de plus se glisser subrepticement.

Nous avons donc mis au point un programme (ScanFich) de dépouillement automatique des résultats expérimentaux. Ce programme a été conçu pour un environnement de type MacIntosh. Il nécessiterait certainement quelques petits aménagement pour fonctionner en environnement de type PC.

L'utilité de ce logiciel est de rechercher automatiquement, parmi un très grand nombre d'acquisitions, une information pertinente. En général, on s'intéressera à dresser une cartographie d'une grandeur physique, extraite des acquisitions et qui fournit une image d'un critère de qualité, en fonction de paramètres expérimentaux d'utilisation de l'échantillon photoréfractif.

La notion de "critère de qualité" est une notion très subjective en ce sens que le choix d'un critère de qualité dépend fortement de l'utilisation que l'on fait du cristal photoréfractif.

Nous avons choisi, à titre d'exemples, trois critères de qualité :

- le temps de réponse
- la valeur maximale de la réflectivité
- la stabilité

Pour chacun de ces critères, nous avons tracé la cartographie correspondante dans le plan (Td - R) et pour un jeu de trois températures : 15°C, 25°C et 35°C (voir figure III.3.9 à 27).

3.2.2. Cartographie de valeur maximale

Les figures III.3.9 à 11 (resp. III.3.12 à 14) représentent la valeur maximale de la réflectivité pour l'échantillon 1 (resp. échantillon 2) .

Valeur maxi de l'onde conjuguée sur 280s
échantillon chinois

T=15°C

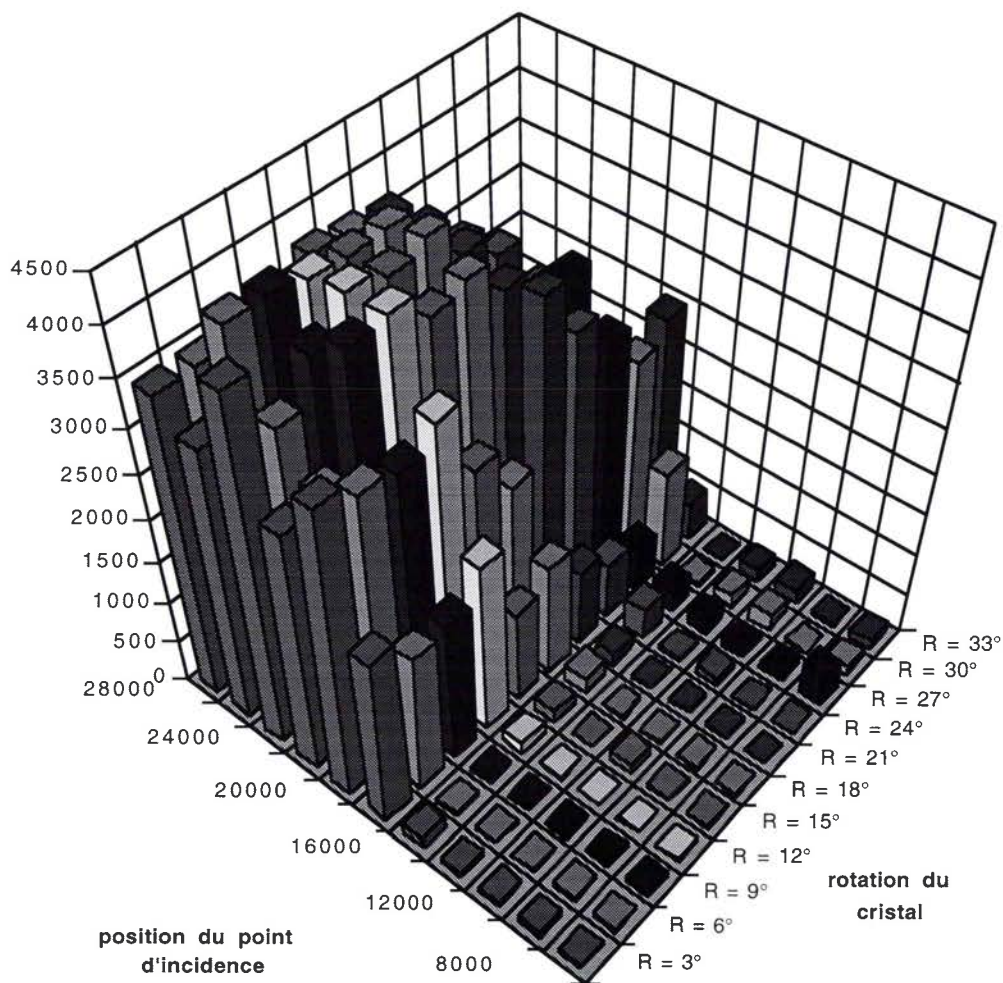


Figure III.3.9. Cartographie de la réflectivité maximale de l'échantillon 1 en fonction de Td et de R pour une température de 15°C

Valeur maxi de l'onde conjuguée sur 280s, T = 25°C
échantillon chinois

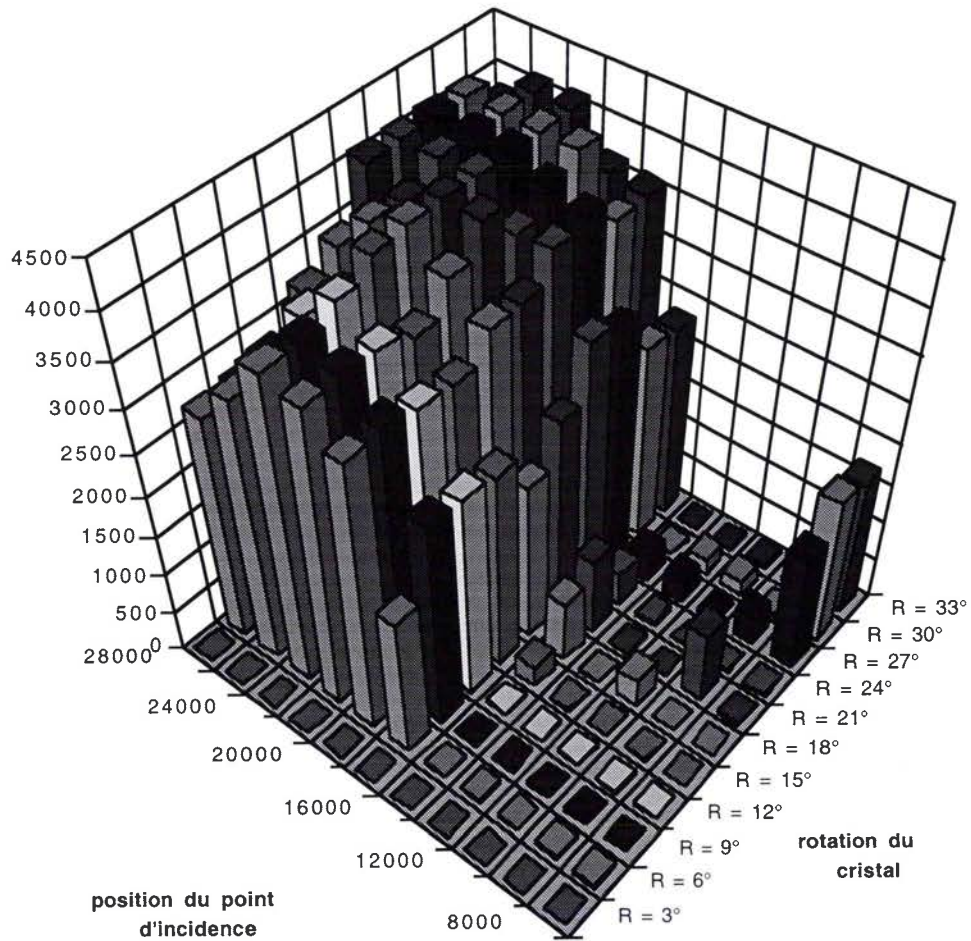


Figure III.3.10. Cartographie de la réflectivité maximale de l'échantillon 1 en fonction de Td et de R pour une température de 25°C

Valeur maxi de l'onde conjuguée sur 280s, T = 35°C
échantillon chinois

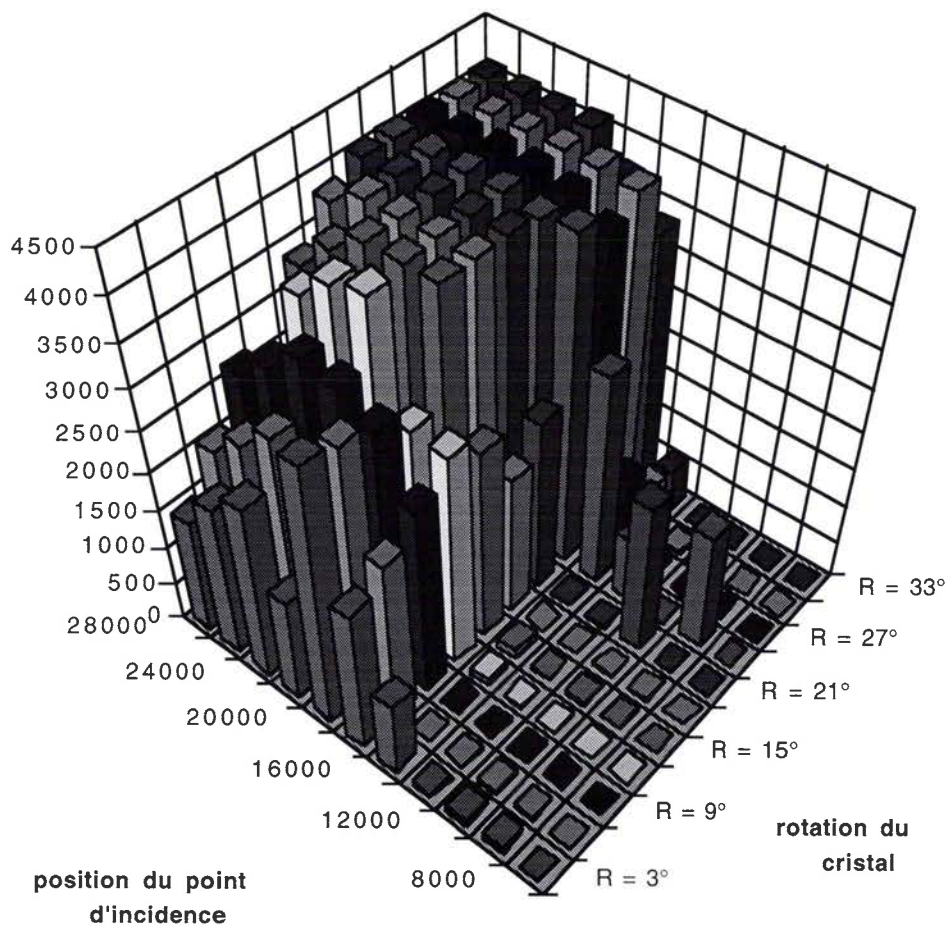


Figure III.3.11. Cartographie de la réflectivité maximale de l'échantillon 1 en fonction de Td et de R pour une température de 35°C

Valeur maxi de l'onde conjuguée sur 280s, T = 15°C
échantillon n°2

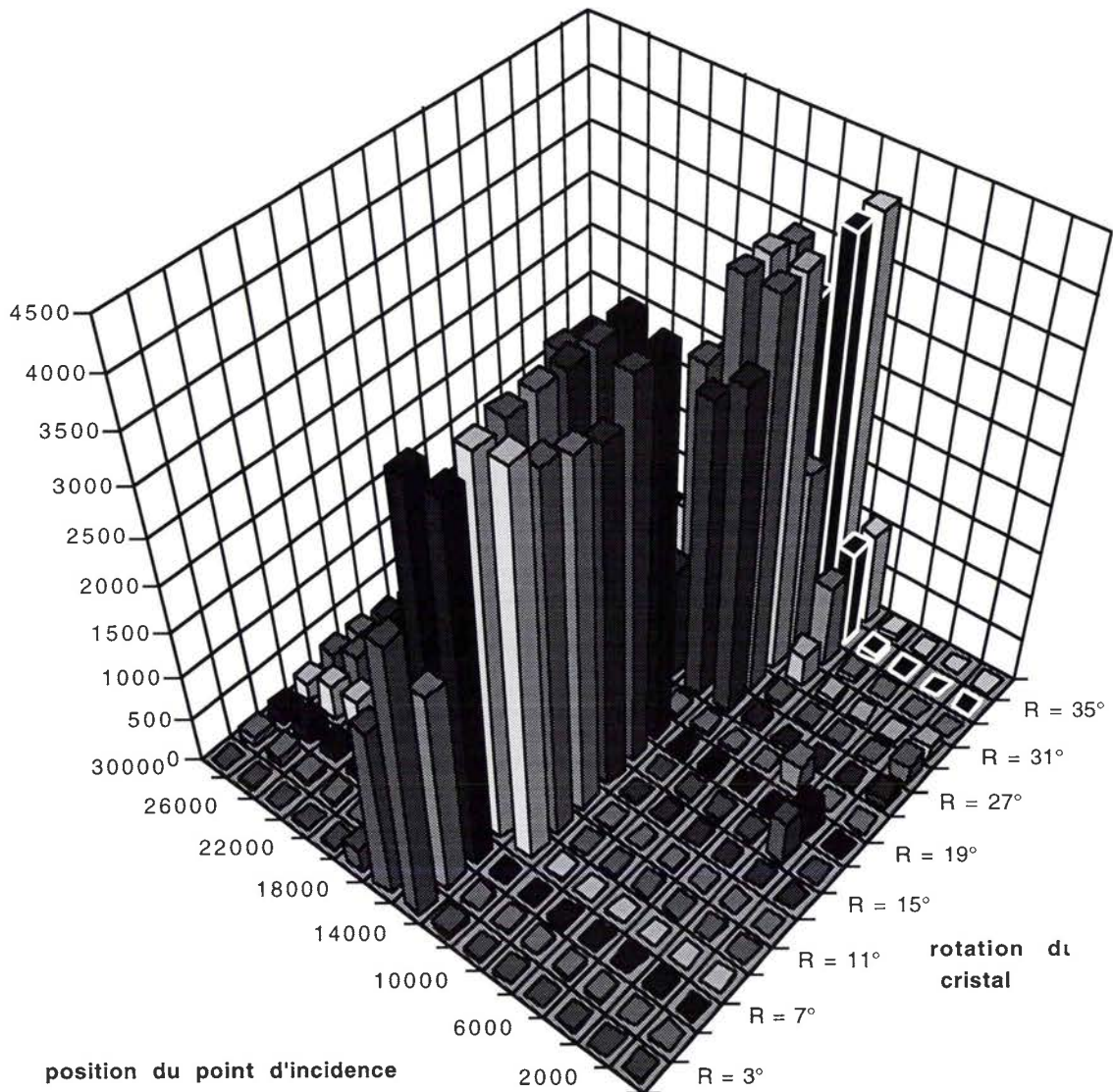


Figure III.3.12. Cartographie de la réflectivité maximale de l'échantillon 2 en fonction de Td et de R pour une température de 15°C

Valeur moyenne de l'onde conjuguée sur 280s
 T=25°C échantillon n°2

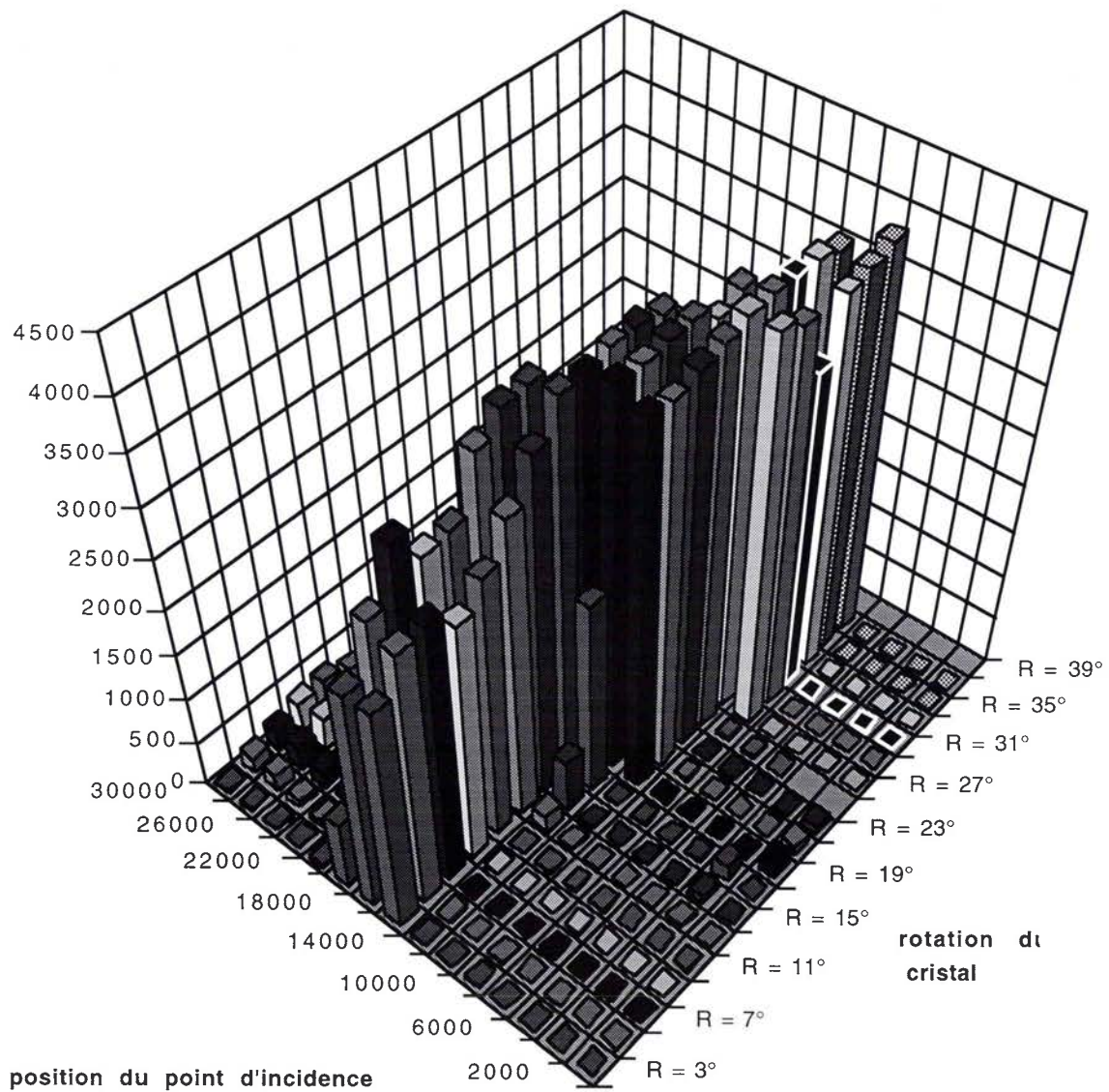


Figure III.3.13. Cartographie de la réflectivité maximale de l'échantillon 2 en fonction de T_d et de R pour une température de 25°C

Valeur maxi de l'onde conjuguée sur 280s, T = 35°C
échantillon n°2

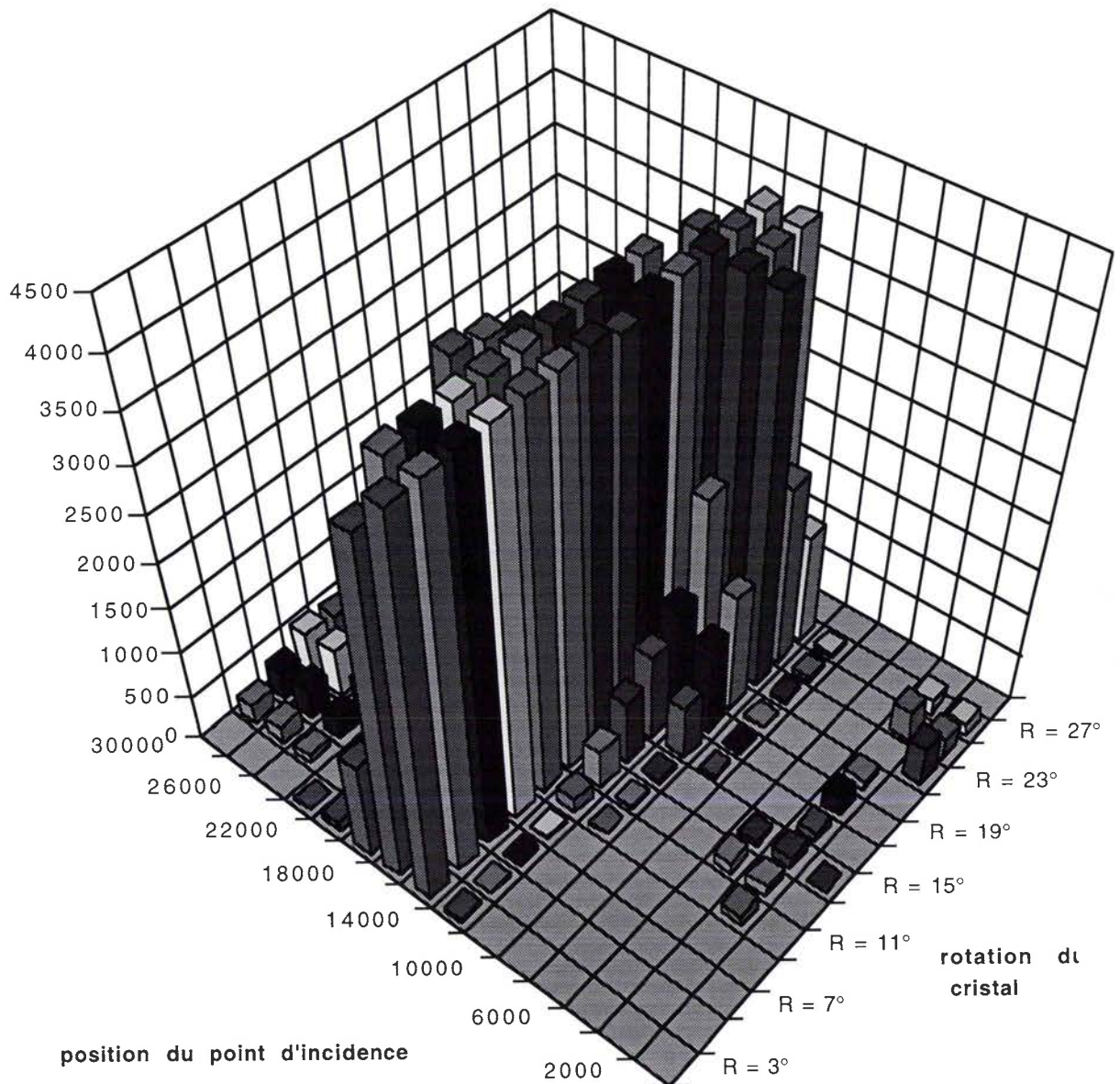


Figure III.3.14. Cartographie de la réflectivité maximale de l'échantillon 2 en fonction de Td et de R pour une température de 35°C

3.2.3. Cartographie de valeur moyenne

Valeur moyenne de l'onde conjuguée sur 280s, $T = 15^{\circ}\text{C}$
échantillon chinois

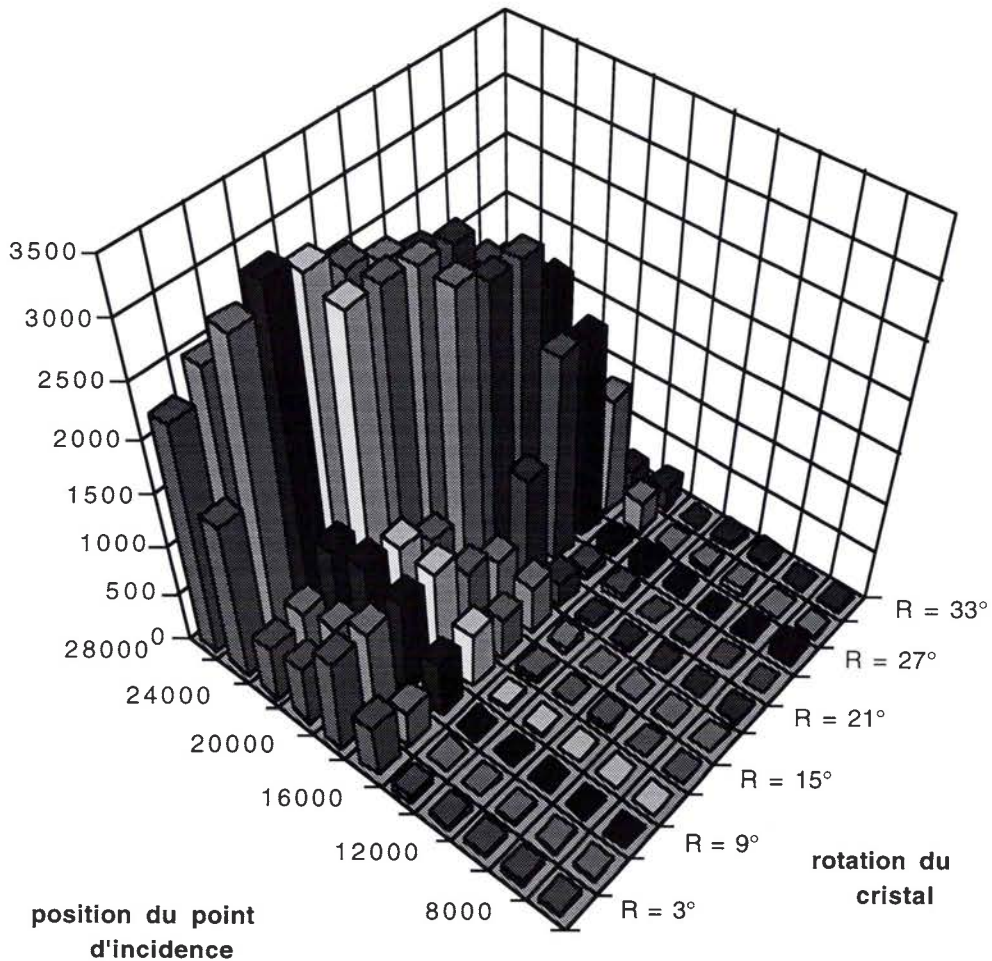


Figure III.3.15. Cartographie de la réflectivité moyenne de l'échantillon 1 en fonction de T_d et de R pour une température de 15°C

Valeur moyenne de l'onde conjuguée sur 280s, $T = 25^{\circ}\text{C}$
échantillon chinois

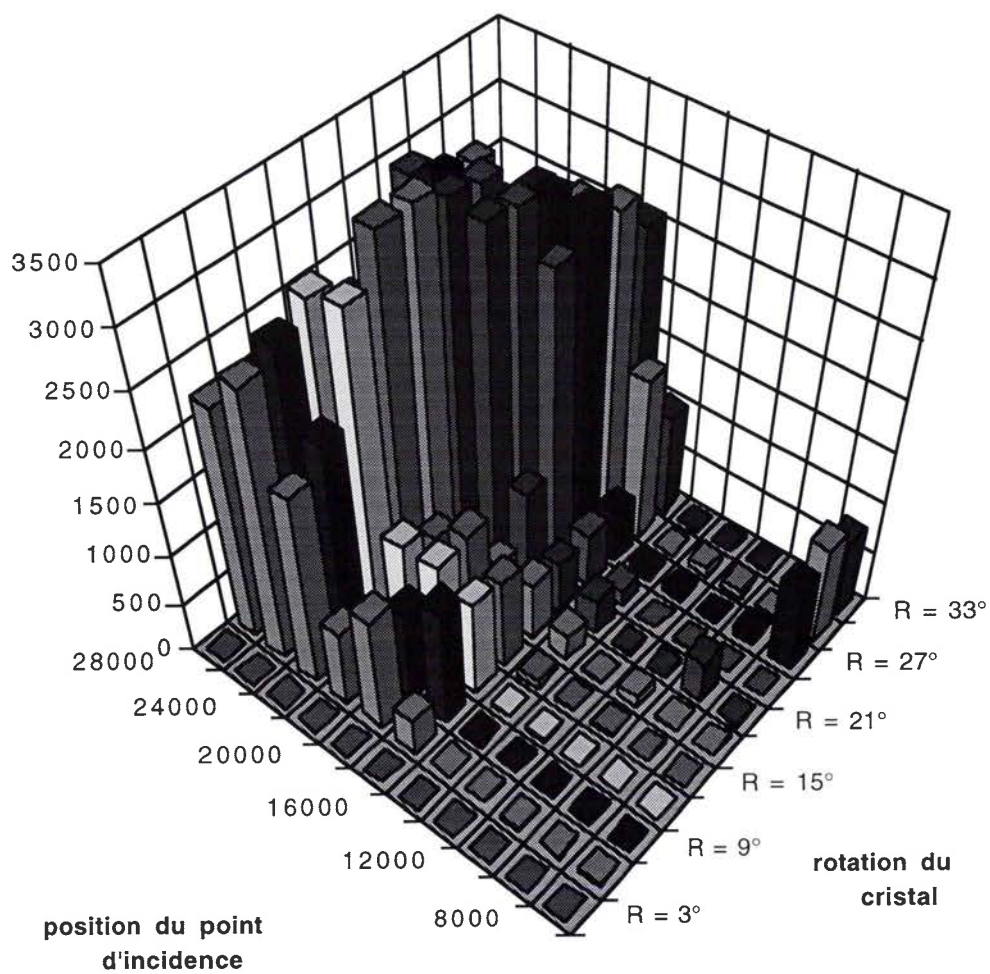


Figure III.3.16. Cartographie de la réflectivité moyenne de l'échantillon 1 en fonction de T_d et de R pour une température de 25°C

Valeur moyenne de l'onde conjuguée sur 280s, $T = 35^{\circ}\text{C}$
échantillon chinois

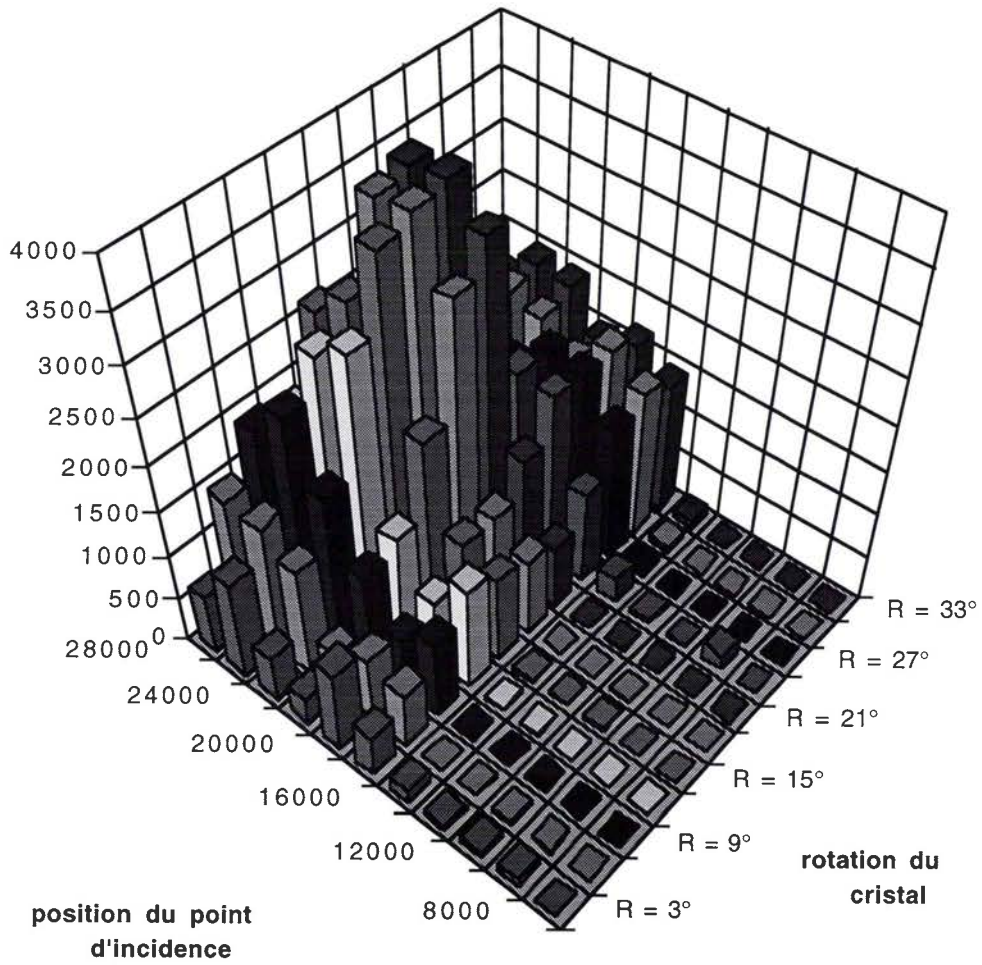


Figure III.3.17. Cartographie de la réflectivité moyenne de l'échantillon 1 en fonction de T_d et de R pour une température de 35°C

Valeur moyenne de l'onde conjuguée sur 280s
 T = 15°C échantillon n°2

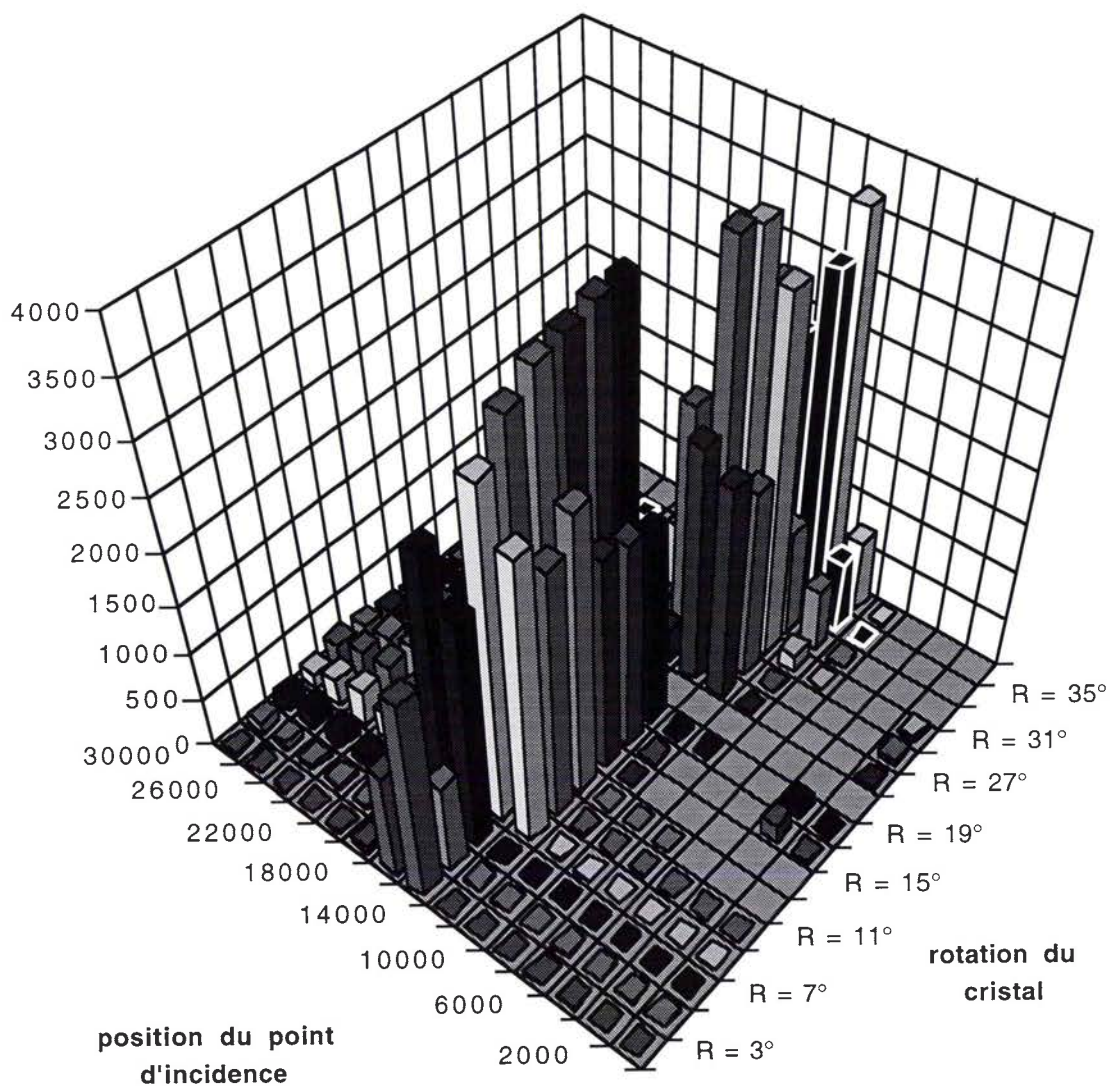


Figure III.3.18. Cartographie de la réflectivité moyenne de l'échantillon 2 en fonction de Td et de R pour une température de 15°C

Valeur moyenne de l'onde conjuguée sur 280s
 T=25°C échantillon n°2

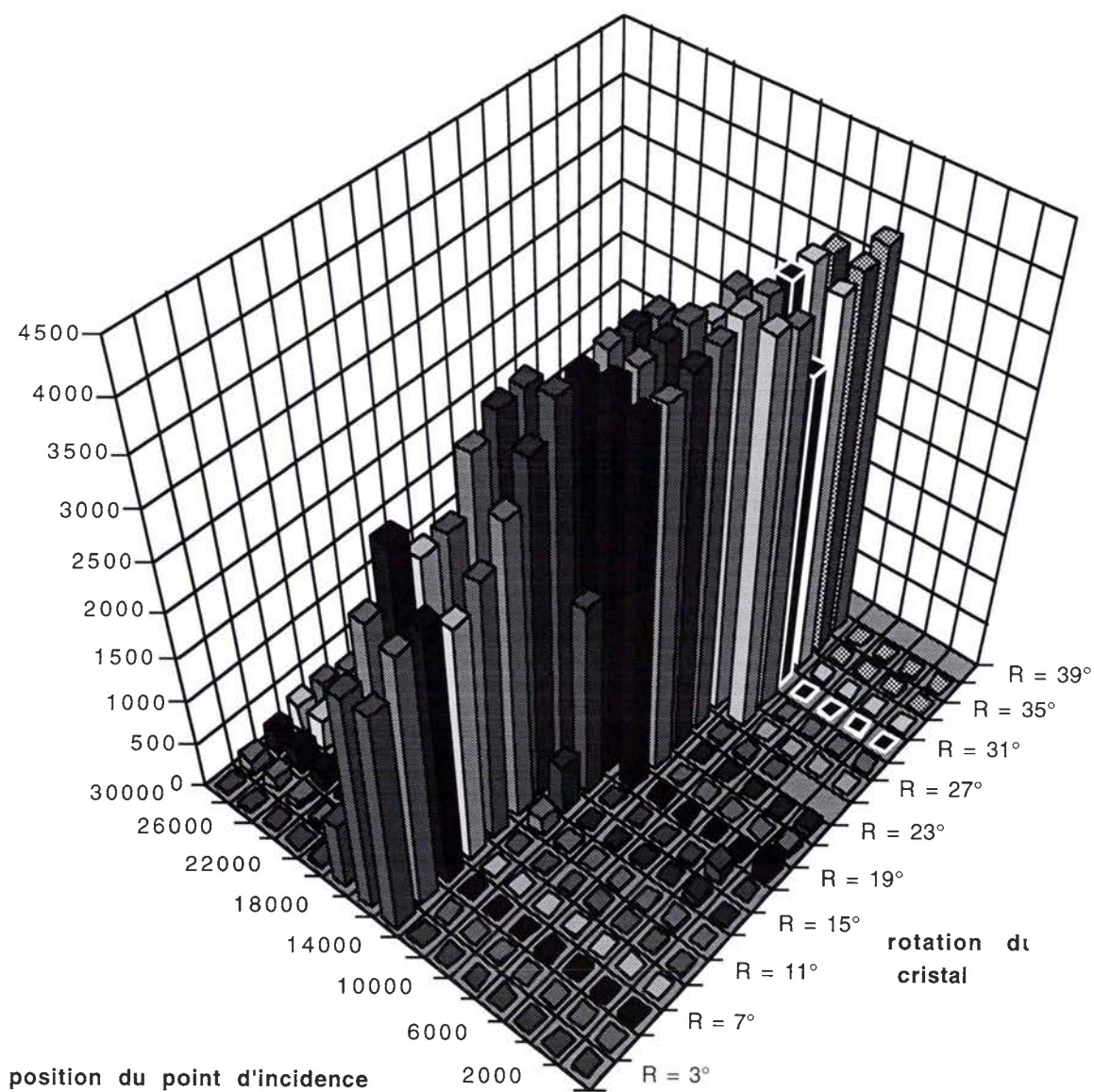


Figure III.3.19. Cartographie de la réflectivité moyenne de l'échantillon 2 en fonction de T_d et de R pour une température de 25°C

Valeur moyenne de l'onde conjuguée sur 280s
 T=35°C échantillon n°2

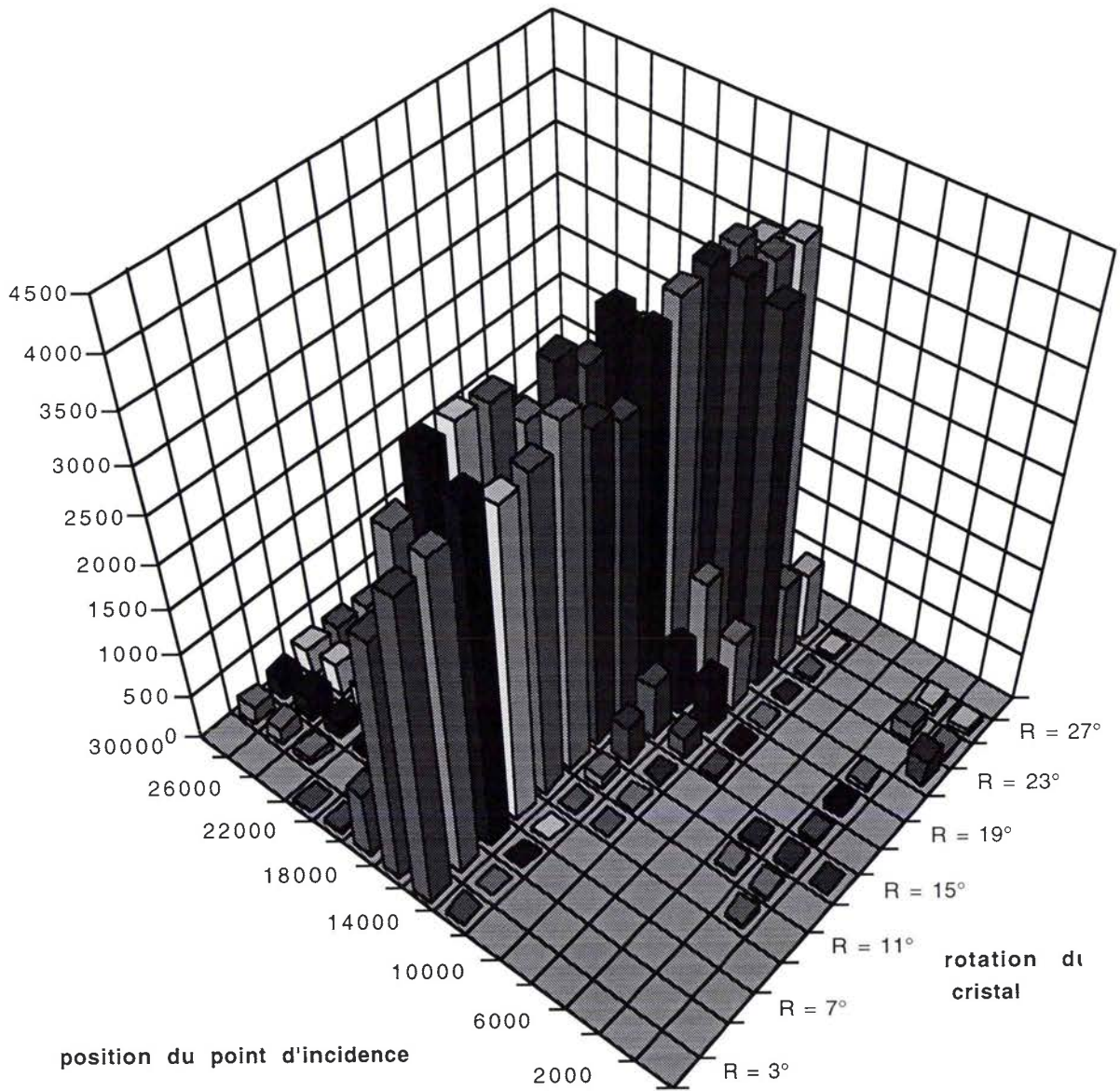


Figure III.3.20. Cartographie de la réflectivité moyenne de l'échantillon 2 en fonction de Td et de R pour une température de 35°C

3.2.4. Cartographie de temps d'apparition

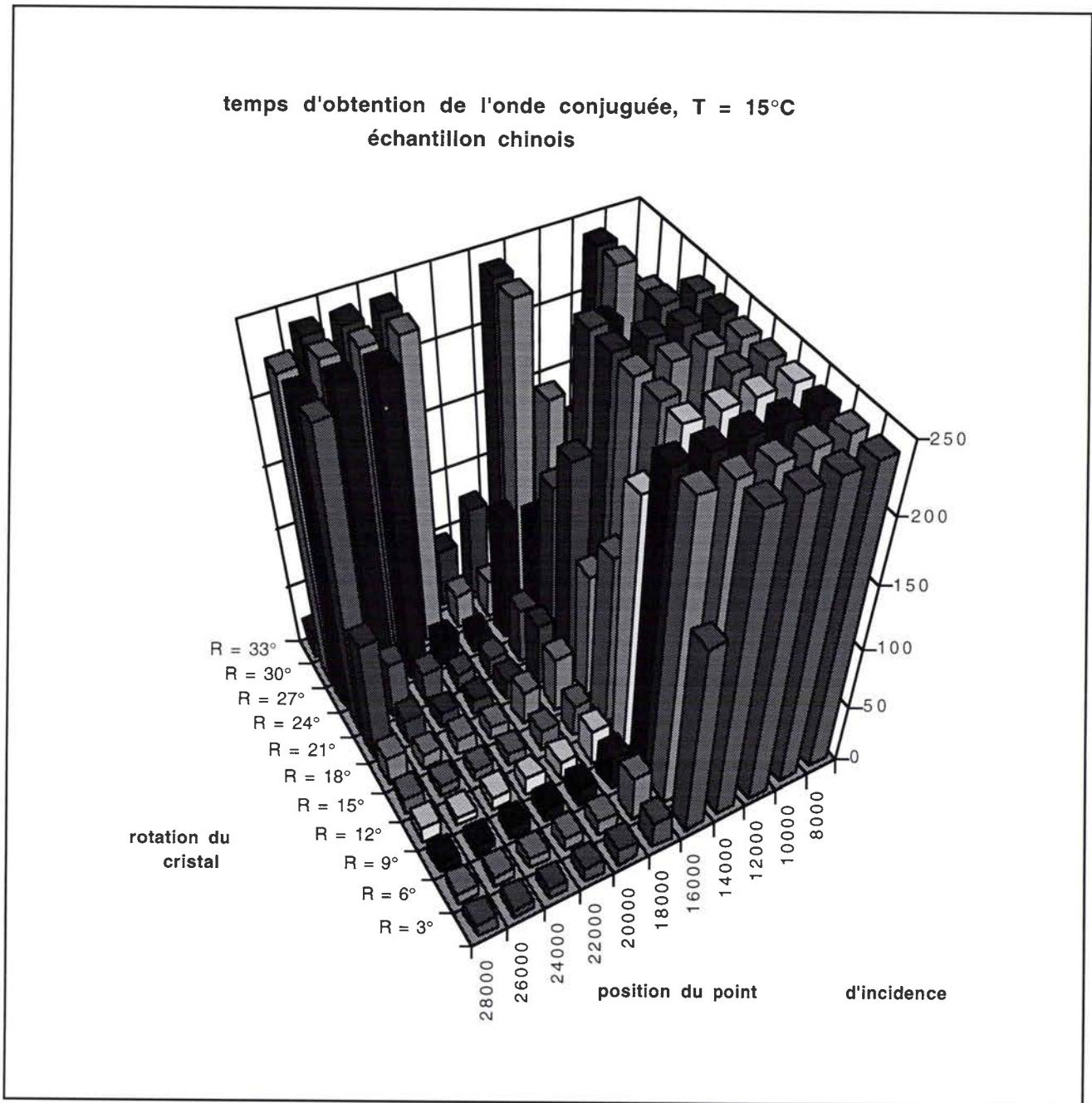


Figure III.3.21. Cartographie du temps de réponse de l'échantillon 1 en fonction de T_d et de R pour une température de 15°C

temps d'obtention de l'onde conjuguée, $T = 25^{\circ}\text{C}$
échantillon chinois

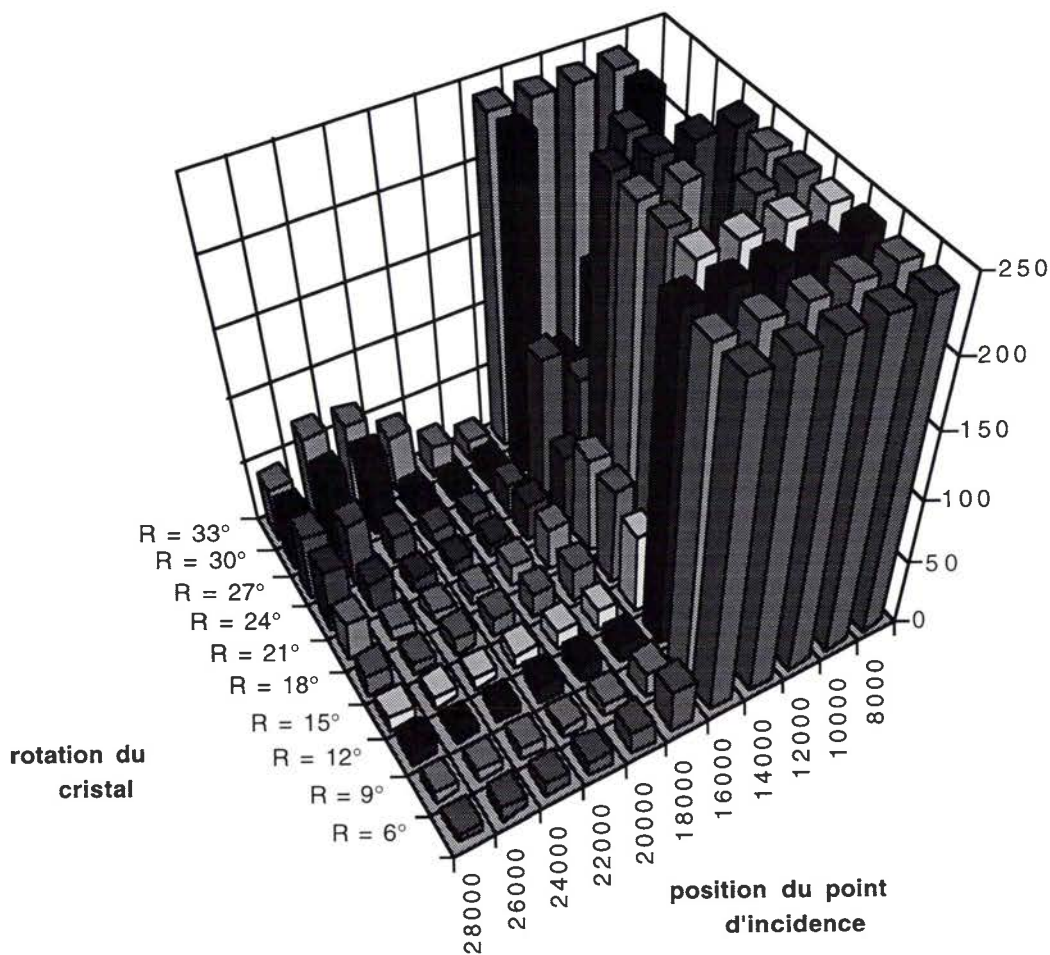


Figure III.3.22. Cartographie du temps de réponse de l'échantillon 1 en fonction de T_d et de R pour une température de 25°C

temps d'obtention de l'onde conjuguée, $T = 35^{\circ}\text{C}$
échantillon chinois

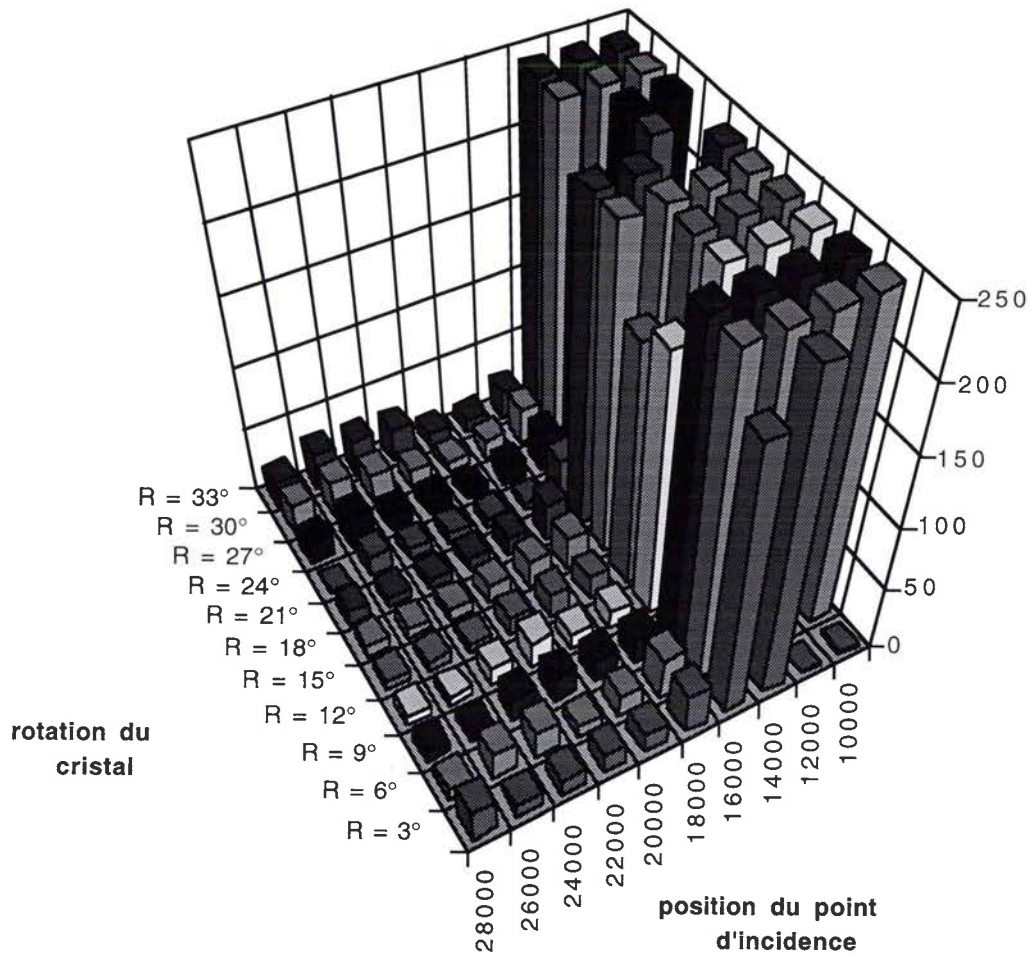


Figure III.3.23. Cartographie du temps de réponse de l'échantillon 1 en fonction de T_d et de R pour une température de 35°C

temps d'obtention de l'onde conjuguée
 T=15°C échantillon n°2

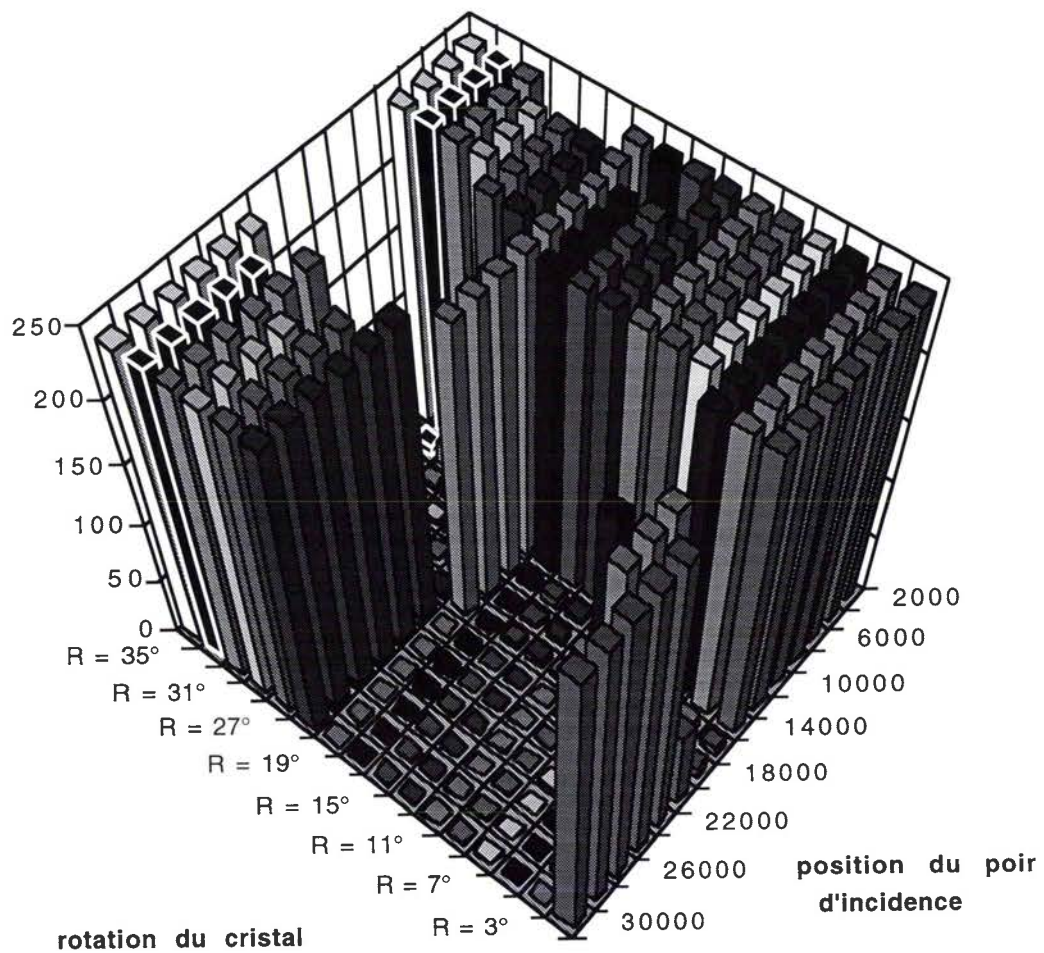


Figure III.3.24. Cartographie du temps de réponse de l'échantillon 2 en fonction de Td et de R pour une température de 15°C

temps d'obtention de l'onde conjuguée
échantillon n°2

T=25°C

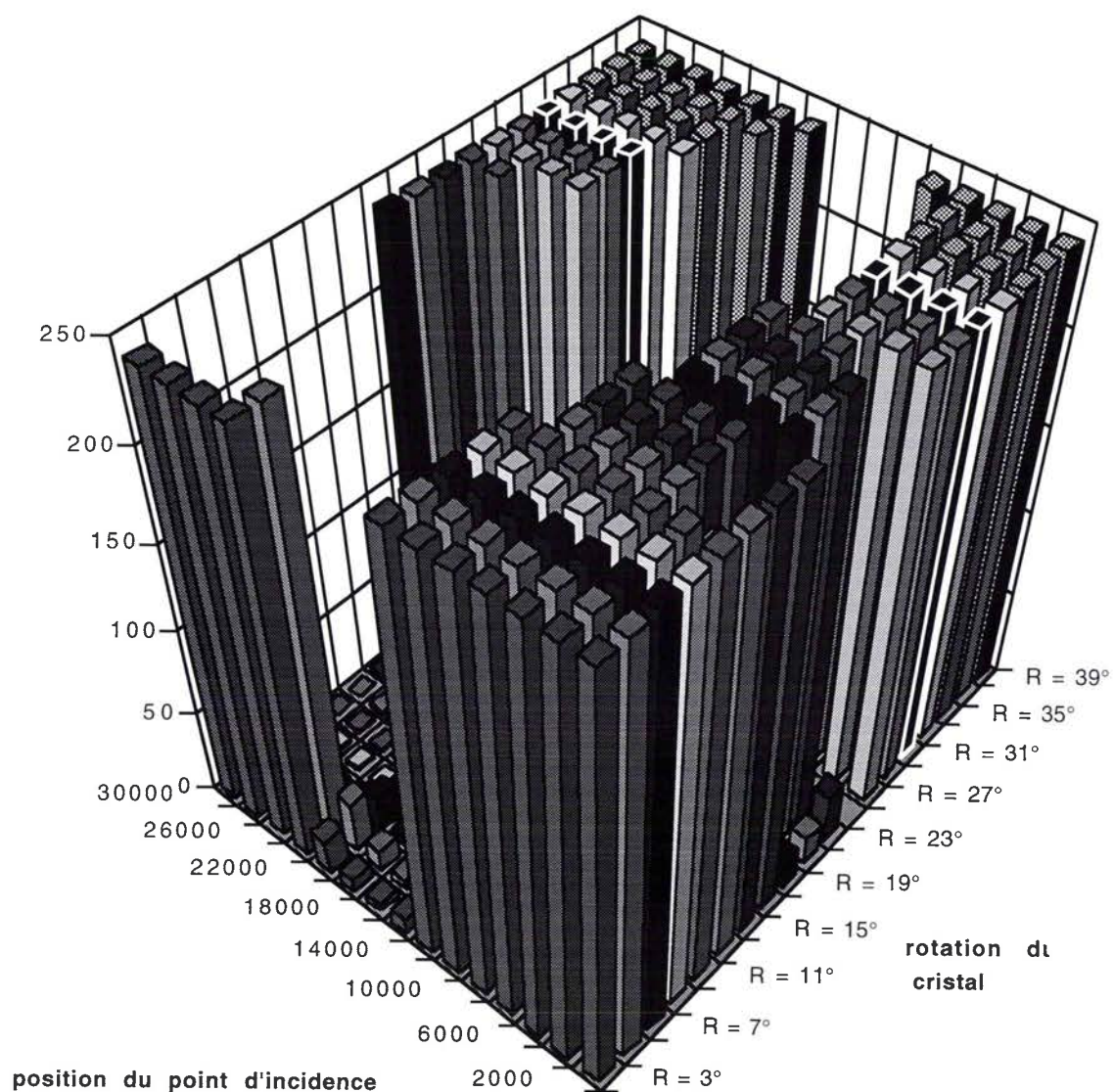


Figure III.3.25. Cartographie du temps de réponse de l'échantillon 2 en fonction de Td et de R pour une température de 25°C

temps d'obtention de l'onde conjuguée
échantillon n°2

T=35°C

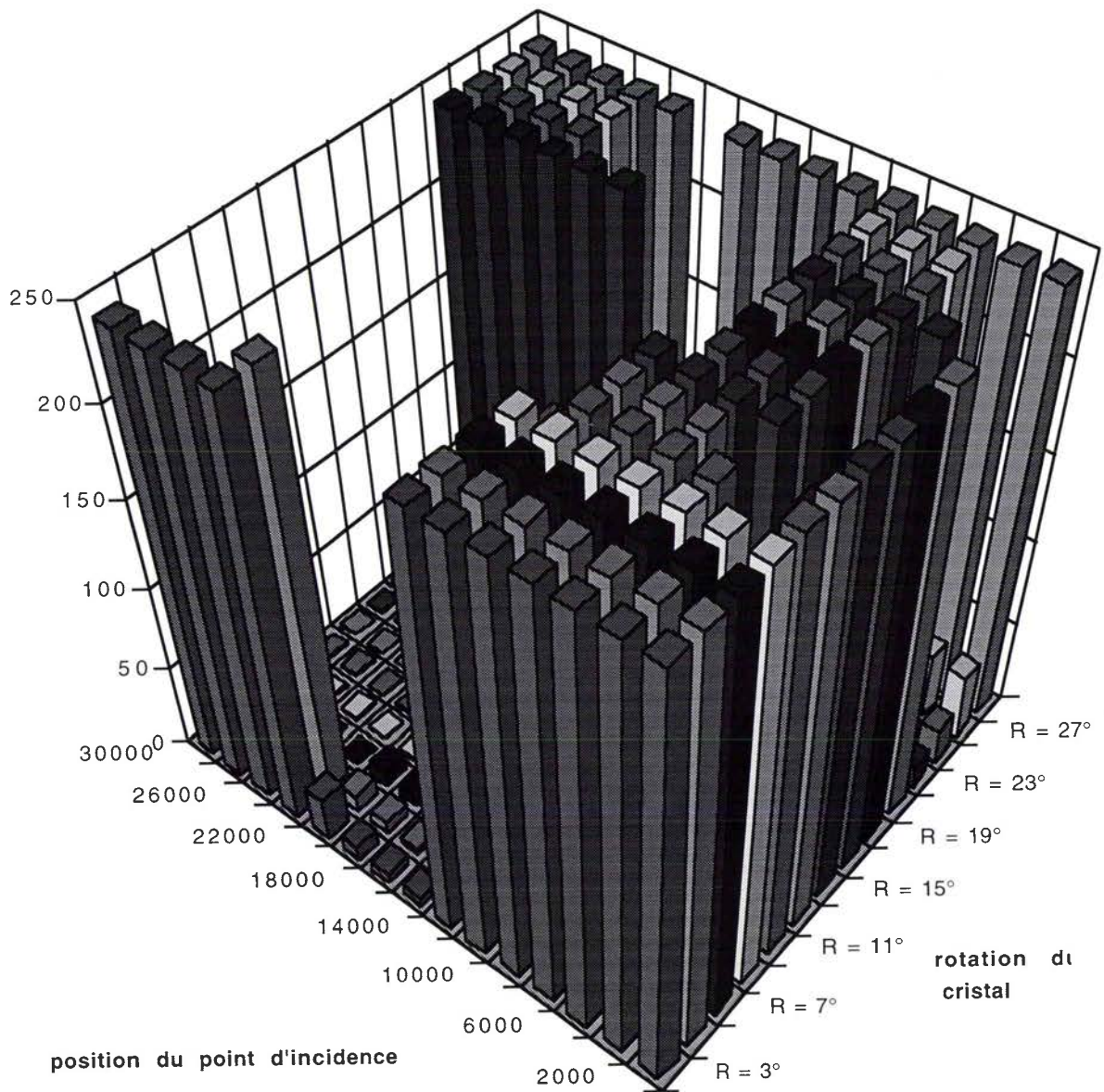


Figure III.3.26. Cartographie du temps de réponse de l'échantillon 2 en fonction de T_d et de R pour une température de 35°C

3.2.5. Calcul de la fonction d'autocorrélation

Le calcul de la fonction d'autocorrélation d'une réponse temporelle permet de voir si cette dernière présente une certaine périodicité ou non. Si c'est le cas, on le remarque par l'apparition, après le pic en 0, d'un pic secondaire appelé "pitch". Le calcul discret se fait de la manière suivante¹ :

```
for i := 1 to 100 do
  begin
    gct[i].x := i;
    gct[i].y := 0;
    for j := 1 to (241 - i) do
      begin
        gct[i].y := gct[i].y + ((fct[j].y-m)*(fct[j+i].y-m));
      end;
    gct[i].y := gct[i].y / (241-i);
  end;
```

La position de ce pitch, sur l'axe des temps, représente la pseudo-période de la réponse.

Nous montrons à la figure III.3.27.a un exemple de réponse temporelle qui présente manifestement un caractère périodique.

A la figure III.3.27.b, nous avons calculé la fonction d'autocorrélation de cette réponse ; l'amplitude du pitch, quasiment égale à l'amplitude du pic en 0 montre que la réponse est quasiment périodique. D'autre part, la position du pitch, en 73, nous indique que la période de la réponse est de 73 secondes, ce que l'on vérifie aisément sur la figure III.3.27.a.

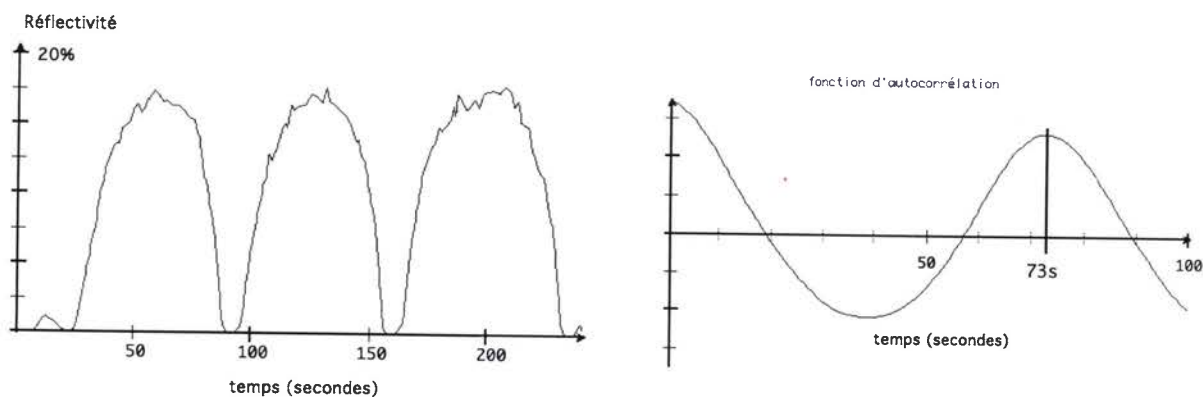


Figure III.3.27. a) Réponse temporelle. b) Fonction d'autocorrélation.

¹ Nous avons centré le signal par rapport à sa valeur moyenne, c'est pourquoi la fonction d'autocorrélation peut prendre des valeurs négatives. On donne aussi le nom de covariance à cette fonction.

Nous avons représenté à la figure III.3.28.a un autre exemple de réponse temporelle. Le caractère périodique, bien que présent, est nettement moins prononcé que précédemment. A la figure III.3.28.b, nous avons calculé la fonction d'autocorrélation de cette réponse ; l'amplitude du pitch, nettement plus faible que l'amplitude du pic en 0 montre que la réponse est pseudo-périodique. D'autre part, la position du pitch, en 15, nous indique que la période de la réponse est de 15 secondes.

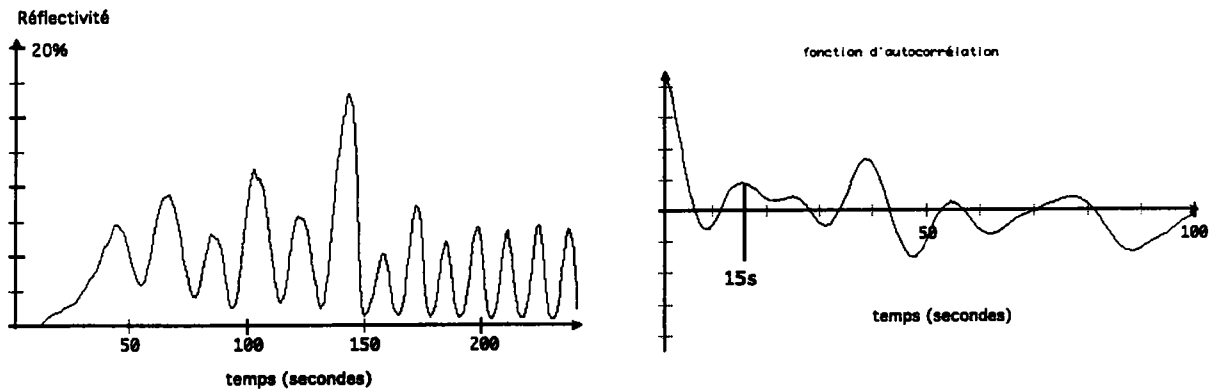


Figure III.3.28. a) Réponse temporelle. b) Fonction d'autocorrélation.

A la figure III.29, nous montrons une réponse présentant la répétition d'un motif mais avec une période non constante : comprise entre 35 et 45 secondes. Sa fonction d'autocorrélation présente un premier maximum à 46 secondes mais il est très étalé, surtout vers la gauche ; en revanche, un second pic situé à 85 secondes présente une structure plus fine.

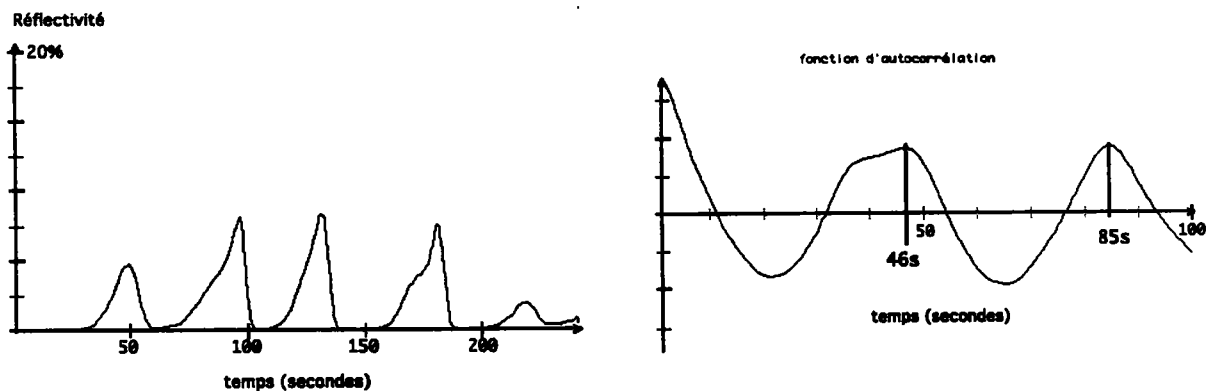


Figure III.3.29. a) Réponse temporelle. b) Fonction d'autocorrélation.

Aux figures III.3.30 et III.3.31, nous avons représenté une réponse ne présentant pas de caractère périodique ; la fonction d'autocorrélation décroît continûment depuis sa valeur en zéro sans faire apparaître de pitch.

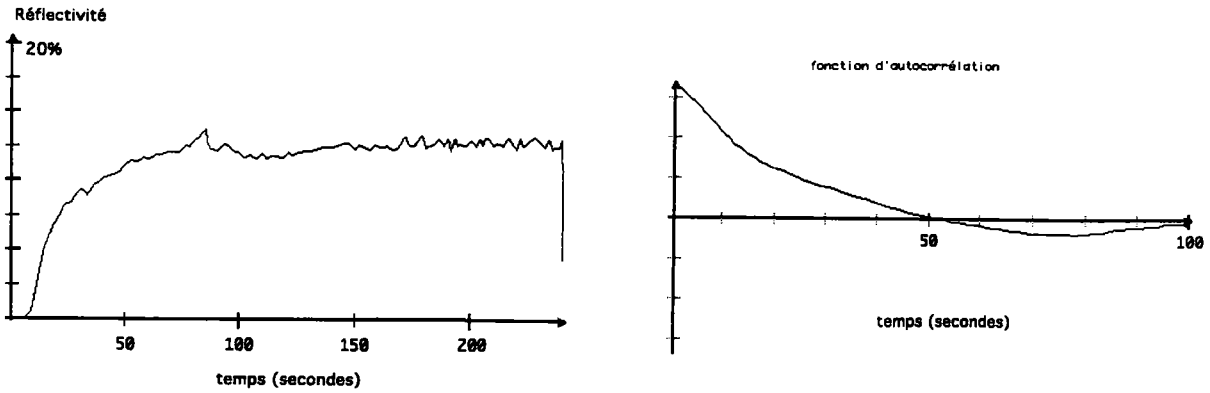


Figure III.3.30. a) Réponse temporelle. b) Fonction d'autocorrélation.

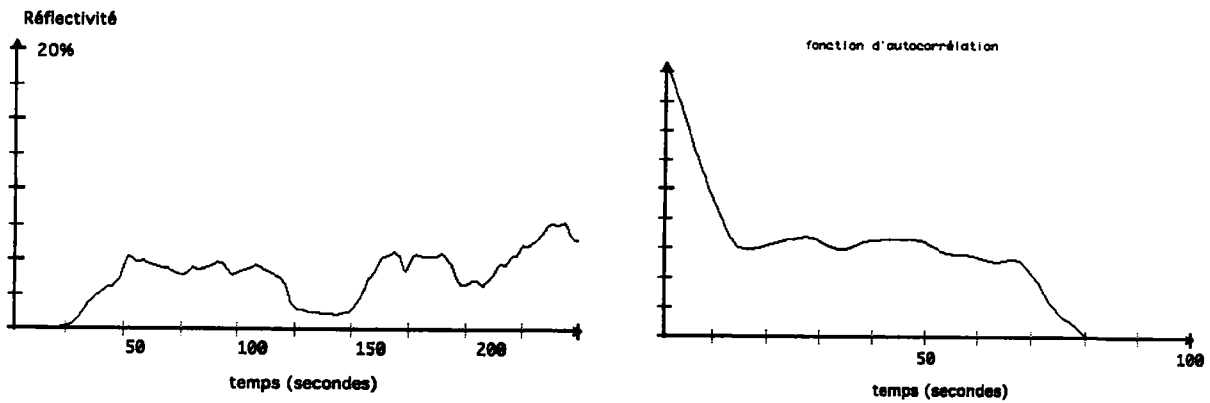


Figure III.3.31. a) Réponse temporelle. b) Fonction d'autocorrélation.

3.2.6. Analyse critique et étude sur d'autres critères

Les critères de qualité que nous avons présenté ci dessus l'ont été à titre d'exemples d'application de l'appareil que nous avons mis au point. Chaque utilisateur de cristal photoréfractif pourra chercher à cartographier son échantillon en fonction de son application particulière.

Quelques autres critères nous paraissent importants ; nous les passerons en revue ci-dessous.

3.2.6.1. Temps de montée

Le temps de montée est la durée nécessaire au miroir pour passer du démarrage au décollage. Le démarrage correspond à l'instant t_1 où l'onde conjuguée apparait, le décollage l'instant où elle arrive à saturation. Ce genre de critère peut avoir son importance dans des dispositifs de logique optique, tels que, par exemple, les filtres de nouveauté.

3.2.6.2. Valeur moyenne après décollage

La valeur moyenne que nous avons calculée correspond à une moyenne depuis l'instant $t=0$; il peut être judicieux d'effectuer une valeur moyenne à partir du décollage.

3.2.6.3. Stabilité

La stabilité est difficile à définir a priori ; un critère de stabilité pourrait être le suivant :

$$S = \frac{I_{moy}^{déc}}{I_{max}} \quad (\text{Eq. III.3.1})$$

3.2.6.4. Amplitude des oscillations

Il s'agit ici de l'amplitude des oscillations qui subsistent après avoir atteint le régime permanent.

3.2.6.5. Fonction d'autocorrélation après décollage

Pour s'affranchir de la période de démarrage, qui peut parfois être très longue, on pourrait calculer la fonction d'autocorrélation après le décollage, pour affiner le calcul de la pseudo-période.

4. Discussion

Cette présentation de quelques résultats expérimentaux amène différentes remarques, tant du point de vue du phénomène physique lui-même que du point de vue instrumental.

4.1. Point de vue phénomène physique

En ce qui concerne le phénomène physique mis en jeu dans la génération de l'onde conjuguée par un miroir à conjugaison de phase de type CAT, les différentes cartographies que nous avons établies pour deux échantillons nous conduisent aux commentaires suivants :

- la configuration géométrique, et en particulier R et Td, influence de manière déterminante le comportement temporel ; une modélisation satisfaisante devrait pouvoir intégrer ces deux paramètres dans le calcul de la réflectivité ; il apparaît des zones, dans le plan R-Td, donnant une

réflectivité correcte ; la forme générale de cette zone est la même pour les deux échantillons étudiés mais ses dimensions dépendent évidemment de celles de l'échantillon concerné ;

- l'effet de la température a été mis en évidence très clairement ;
- il est intéressant de remarquer que, pour les deux échantillons que nous avons soumis à investigation, les zones de qualité, correspondant aux différents critères de qualité que nous avons retenus, sont fortement corrélées ; autrement dit, il y a des intersections non nulles entre ces zones, et on peut alors trouver une configuration stable, avec un temps de réponse très faible et ayant une forte réflectivité.

4.2. Point de vue instrumental et traitement

Ces quelques exemples mettent en évidence les potentialités de l'instrument que nous avons développé ; de plus l'appareil, et en particulier sa partie logicielle reste ouvert. Il est par suite tout à fait possible d'adapter l'investigation en fonction de l'utilisation finale du cristal photoréfractif.

CHAPITRE IV

MODÉLISATIONS PHYSIQUES

Dans ce chapitre consacré à la modélisation physique des miroirs CAT, nous présentons trois types de modèles physiques :

1. une étude sur le beam fanning, phénomène incontournable dans l'établissement de la conjugaison de phase et le fonctionnement du miroir autopompe
2. un modèle physique permettant de calculer la réflectivité en régime permanent, en fonction de l'angle d'incidence, de la position transversale du point d'incidence et de la température
3. une étude statistique permettant de modéliser le comportement temporel par une fonction aléatoire.

*L'imagination est plus importante
que le savoir.*

Albert EINSTEIN.

1. Remarques préliminaires concernant les modélisations proposées

Avant d'expliquer en détail les modèles mis au point dans ce chapitre, nous aimerions préciser et insister sur l'objectif de ces tentatives de modélisation.

Notre objectif n'est pas de mettre en place une série de modèles physiques avec comme but d'interpréter les différents résultats expérimentaux mesurés et dont certains sont donnés en illustration au Chapitre III. Un tel objectif serait trop ambitieux et constituerait en fait un travail en soi.

Nous nous limiterons à doter l'instrument que nous avons conçu et réalisé d'une certaine "intelligence" modélistique, permettant à l'expérimentateur de profiter de ses résultats pour en déduire un certain nombre de paramètres physiques, et de les tester dans le cadre de quelques modèles, connus ou originaux.

Pour cette raison, nous nous sommes limités dans le présent travail aux trois phénomènes fondamentaux suivants :

- le beam fanning : expliqué par l'influence sur le trajet optique de la modification d'indice de réfraction due à la photoréfractivité
- la réflectivité à saturation, c'est à dire en régime permanent, lorsque celui-ci peut être atteint
- le comportement temporel, à l'aide d'un modèle statistique utilisant le caractère cumulatif du beam fanning, de la construction des réseaux et de l'apparition de l'onde conjuguée.

De plus, la structure du logiciel "Modele" autorise l'adjonction de modèles supplémentaires permettant alors de tester d'autres hypothèses.

2. *Le beam fanning*

2.1. *Mise en évidence du beam fanning*

Le "beam fanning", terme unanimement employé de nos jours, n'est apparu dans la littérature qu'en 1981 [FEINBERG 82-1] à propos d'un échantillon de titanate de baryum. Pourtant ce phénomène fut mis en évidence dès 1974 dans du niobate de lithium pur [MAGNUSSON and GAYLORD 1974] puis dopé au fer [AVAKYAN et al. 1978].

En 1980, Voronov et al. [VORONOV et al. 1980] observent ce qu'ils appellent de la "diffusion photo-induite" dans SBN. Ils attribuent ce phénomène à une amplification holographique de la lumière diffusée sur les défauts du cristal.

Ce que Feinberg [FEINBERG 1982-1] observe en 1981 sur un échantillon de titanate de baryum monodomaine est nouveau en ce sens que la défocalisation est asymétrique¹. Il pense que cela est dû à l'effet photoréfractif et propose un modèle que nous détaillerons plus loin.

Nous avons représenté sur la figure IV.2.1 le montage expérimental : un cristal de titanate de baryum est éclairé par un faisceau incident qui possède une polarisation extraordinaire (c'est à dire une direction de polarisation parallèle à l'axe *c* du cristal). On observe alors une dispersion de la lumière dans la direction de l'axe ferroélectrique *+c*. Si l'on place un écran au delà du cristal, on peut observer une tache très lumineuse ainsi que trois lobes de diffusion : un lobe principal dans la direction de *c* et deux lobes secondaires dans des directions à 45°.

En 1986, Temple et Warde [TEMPLE and WARDE 1986] observent également ce fanning dans le titanate de baryum et l'attribuent à un mélange photoréfractif à deux ondes stimulé. En 1986 également, Ewbank et al. [EWBANK et al. 1986] montrent que l'anneau fin qui apparaît sur la figure de fanning provient de la diffraction anisotrope ; ils montrent en outre que cela peut d'ailleurs être mis à profit pour déterminer de manière précise la biréfringence de BaTiO₃ à partir de l'angle de diffraction de la couronne.

En 1987, Hathcock et al. [HATHCOCK et al. 1987] étudient les propriétés photoréfractives du titanate de baryum dopé au chrome. Ils montrent que le beam fanning est à l'origine du mauvais fonctionnement de leur montage de diffraction d'un faisceau issu d'un Hélium-Néon sur un réseau photoréfractif inscrit avec un faisceau issu d'un Argon. Il empêche non seulement d'arriver à la saturation mais plus encore entraîne une destruction progressive du réseau inscrit. Ils montrent également que, contrairement au titanate de baryum pur, du beam fanning apparaît également lorsque le faisceau incident est parallèle à

¹ Ce qui signifie que le faisceau incident se défocalise de manière asymétrique au passage dans le cristal.

l'axe c.

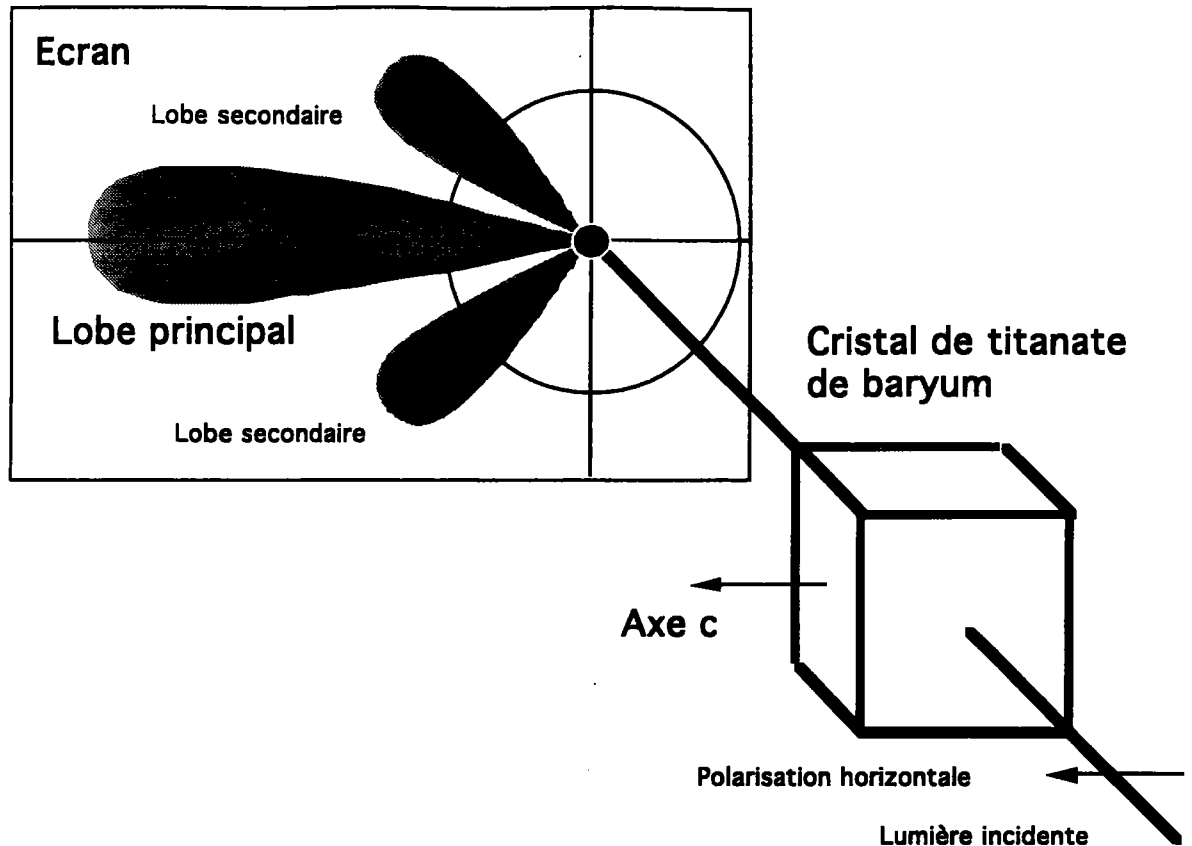


Figure IV.1.1. Le "beam fanning" dans le titanate de baryum.

2.2. Modélisation du beam fanning

La première modélisation date de 1980 [VORONOV et al. 1980]. Voronov et al. décrivent ce qu'ils appellent de la "diffusion photo-induite" dans SBN et qu'ils attribuent à une amplification holographique de la lumière diffusée sur les défauts du cristal.

Feinberg [FEINBERG 1982-1] propose, pour modéliser la défocalisation asymétrique qu'il observe sur du titanate de baryum éclairé avec un faisceau polarisé extraordinairement, de tenir compte de la répartition spatiale de l'énergie lumineuse, gaussienne, du faisceau incident. Cette modulation spatiale d'intensité lumineuse induit par effet photoréfractif une photoexcitation des charges (positives dans le cas de BaTiO_3 pour les faibles intensités) qui vont migrer par diffusion de part et d'autre de la gaussienne puis être piégées à nouveau (voir figure IV.2.2). Ces charges d'espace sont elles-mêmes à l'origine d'un champ de charges d'espace qui à son tour induit une modulation spatiale d'indice de réfraction par effet électrooptique. La bosse d'indice va ensuite canaliser la lumière vers l'axe c du cristal.

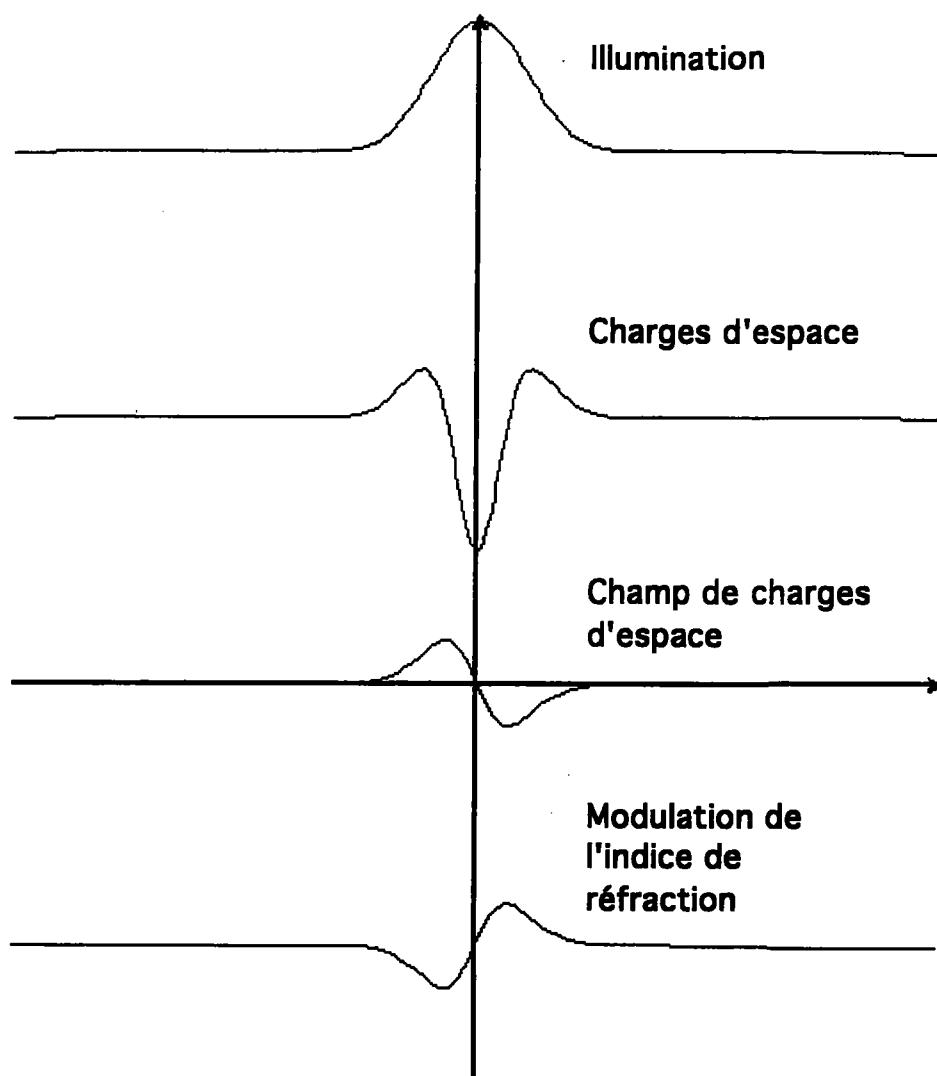


Figure IV.2.3. La forme gaussienne de l'illumination engendre par effet photoréfractif une bosse d'indice décalée vers l'axe c du cristal.

En 1987 Valley [VALLEY 1987] propose un calcul de diffusion photoréfractive stimulée. Il s'agit d'un calcul de gain en mélange deux ondes entre un faisceau incident et un faisceau diffusé, qui est lui-même apparu dans le cristal pour des raisons diverses.

En 1990, Segev et al. [SEGEV et al. 1990] voient l'origine du beam fanning asymétrique dans une amplification de bruit. Ils développent un modèle mettant en oeuvre un schéma de mélange multiple à deux ondes.

Une étude de la diffusion provenant de charges distribuées aléatoirement dans les matériaux photoréfractifs [GU and Yeh 1991-2] peut aussi contribuer à la compréhension du phénomène de beam fanning.

En 1991, Son et al. [SON et al. 1991] publient des observations de multiples trajets possibles correspondant à du beam fanning dans du titanate de baryum.

Hong et al. [HONG et al. 1993] proposent un modèle de fanning pour un cristal de titanate de baryum coupé à 45°. Ils tiennent compte d'une distribution continue de fanning et chaque rayon qui fanne reçoit de l'énergie, par mélange à deux ondes, de la part du faisceau incident. En revanche, les interactions entre les différents rayons qui fannent sont négligées.

Segev et al. [SEGEV et al. 1993-1] introduisent la dépendance temporelle dans leur modèle de fanning (voir figure IV.2.3).

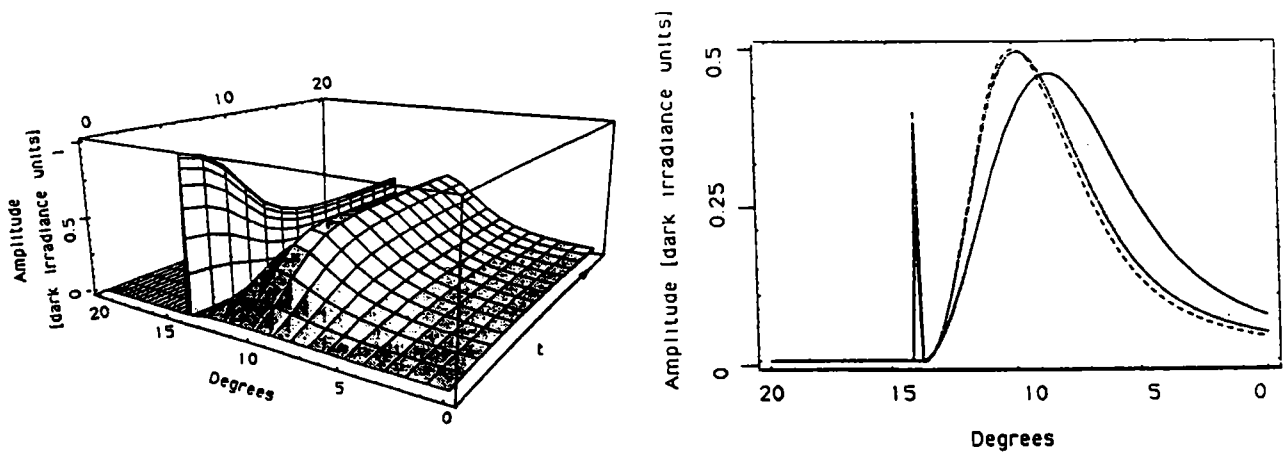


Figure IV.2.3. a) Dépendance temporelle du beam fanning.
b) En régime permanent

[HE and YEH 1994] cherchent à diminuer le beam fanning dans les amplificateurs optiques à l'aide d'effacements incohérents. Ils disent (qu'il est bien connu) que le fanning provient de la diffusion amplifiée, diffusion provenant elle-même de la rugosité de la surface d'entrée du cristal ainsi que de la distribution aléatoire de défauts dans le cristal. Mais ils s'intéressent davantage, dans leur modèle, à l'énergie qui est prélevée à la pompe et au signal par le fanning qu'à la répartition spatiale exacte d'énergie du fanning.

3. Modélisation de la réflectivité à saturation

3.1. Raisons du choix du modèle

Comme nous l'avons déjà cité dans le chapitre I, il existe actuellement deux principaux modèles pour expliquer le comportement du miroir à conjugaison de phase autopompé de type CAT.

La première famille repose sur le processus de mélange à quatre ondes dégénéré établi par Cronin Golomb [CRONIN-GOLOMB et al. 1982]. C'est dans ce cadre que s'inscrit le modèle à deux régions d'interactions couplées de Feinberg et MacDonald [MACDONALD and FEINBERG 1983], reposant sur l'existence du beam fanning et de deux réflexions internes totales dans un coin du cristal. Une boucle de deux ondes contrepropageantes apparaît alors, ce qui occasionne la formation des deux régions où le processus de mélange à quatre ondes se met en place.

Une autre famille de modèles est basée sur le mélange à deux ondes stimulé. On trouve en particulier dans cette famille le modèle proposé par Lam [LAM 1985], proche du modèle de diffusion Brillouin [ZELDOVICH et al. 1972], qui suppose que le faisceau incident subit une diffusion Rayleigh sur des inhomogénéités conduisant à des photons de bruit, ce qui provoque une rétrodiffusion paramétrique. Dans la mesure où nous avons déjà rappelé les principes généraux de ce modèle, nous ne le détaillerons plus ici.

La question de savoir lequel de ces processus est à l'origine de la conjugaison autopompée dans le miroir CAT reste encore une question largement ouverte et en débat ; il est d'ailleurs possible que les phénomènes observés résultent d'une compétition entre différents mécanismes, le tout dépendant de l'échantillon, de sa nature et certainement aussi des conditions expérimentales.

Gauthier [GAUTHIER et al. 1987] et Rauch [RAUCH et al. 1992] ont montré que le modèle de Feinberg semble le plus approprié pour décrire les fluctuations irrégulières correspondant à un comportement chaotique déterministe, qui d'après ces critères ne pourrait pas être expliqué par le modèle basé sur le mélange à deux ondes.

Dans ce chapitre, nous adopterons comme base de travail le modèle des deux régions de mélange à quatre ondes couplées, en y apportant une extension : au lieu de considérer une - seule - boucle de lumière, nous ferons l'hypothèse d'un continuum de fanning. Nous supposons qu'un rayon incident donne naissance à plusieurs directions de fanning, modélisées par une fonction de distribution de puissance "fannée" en fonction de la variable angulaire α_2 . Nous calculons ensuite la contribution de chaque boucle aux processus de mélange à quatre ondes dans les régions couplées, puis nous les intégrons afin de déterminer la réflectivité totale du miroir CAT.

3.2. Rappel théorique et du principe du modèle à deux régions couplées

3.2.1. Schéma d'interaction et réseaux inscrits

Le modèle à deux régions couplées a été développé par MacDonald et Feinberg [MACDONALD and FEINBERG 1983] pour interpréter le comportement du miroir à conjugaison de phase autopompé en configuration CAT. Il correspond à une adaptation du modèle du mélange à quatre ondes dégénéré ; la configuration géométrique est décrite à la figure IV.3.1. L'onde incidente est inclinée (à l'intérieur du cristal) d'un angle α_1 par rapport à l'axe c. Elle est ensuite brusquement déviée dans une direction faisant un angle α_2 avec l'axe c. Il se constitue à l'intérieur du cristal une boucle à cause de la double réflexion totale sur le coin du cube. On est donc en présence de deux régions couplées.

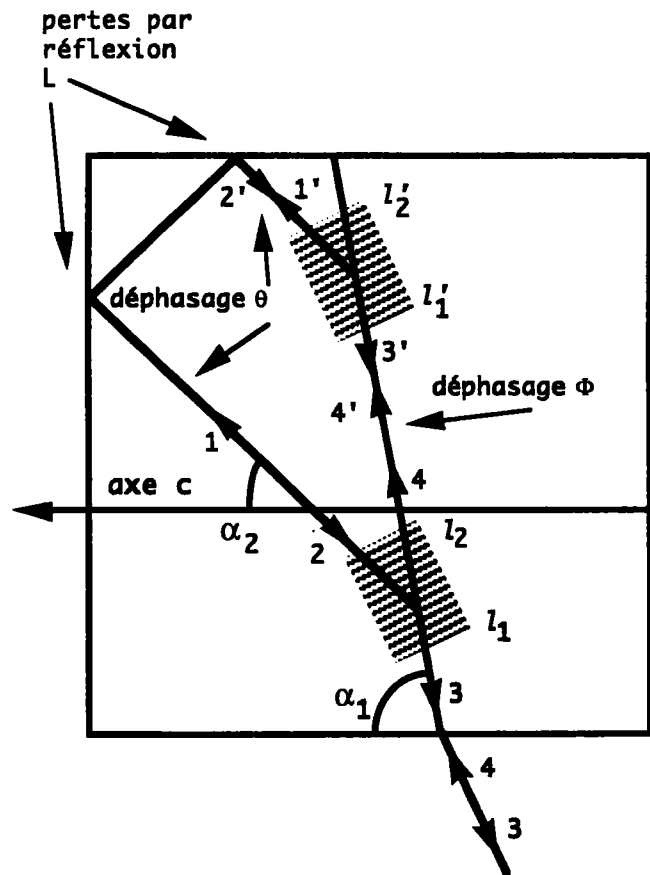


Figure IV.3.1. Modèle du miroir CAT à deux régions couplées.

Le modèle, basé sur les hypothèses de Cronin-Golomb [CRONIN-GOLOMB et al. 1982] du mélange à quatre ondes, suppose en outre que :

- tous les rayons lumineux sont des ondes planes
- l'absorption est négligeable
- un rayon n'interagit pas avec lui-même
- l'indice de réfraction est stationnaire dans le temps et dans l'espace

- un seul réseau est responsable de la diffraction, et notamment le réseau de vecteur $\mathbf{k}_g = \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_3 = \mathbf{k}_4 - \mathbf{k}_1 = \mathbf{k}_I$ (voir figure IV.3.2).

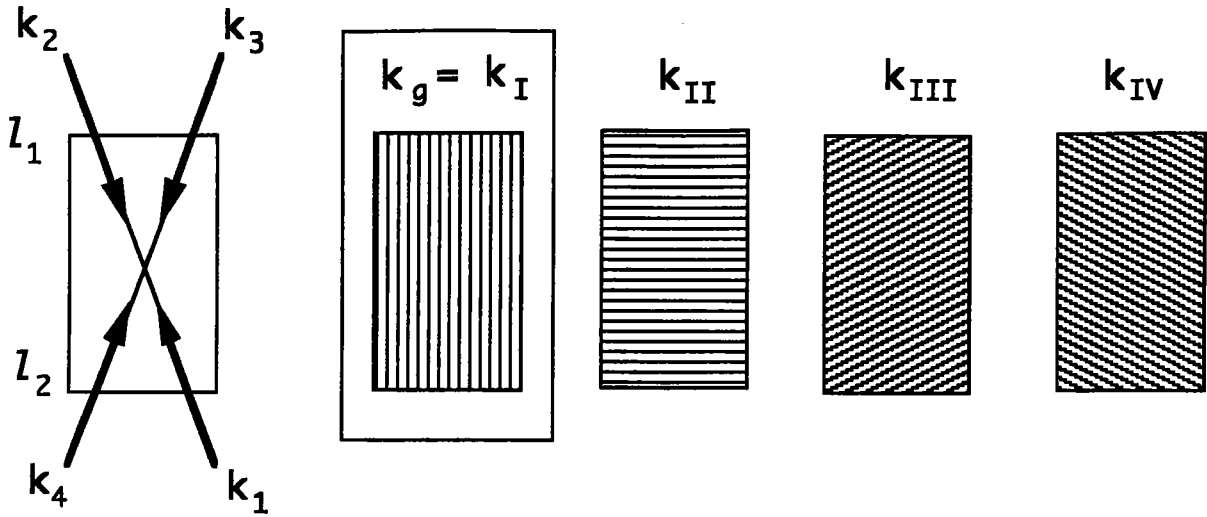


Figure IV.3.2. Les quatre réseaux générés dans chaque région d'interaction.

3.2.2. Conditions aux limites et réflectivité

Dans ces conditions, les équations couplées (Eq. I.5.10 à 14), où $I_0 = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$ avec $I_j = |A_j|^2$ et γ constante de couplage, conservent les quantités suivantes :

$$d_1 = I_1 + I_4 \quad (\text{Eq. IV.3.1})$$

$$d_2 = I_3 + I_2 \quad (\text{Eq. IV.3.2})$$

$$c = A_1 A_2 + A_3 A_4 \quad (\text{Eq. IV.3.3})$$

l'on obtient alors :

$$\frac{A_1(z)}{A_2^*(z)} = - \frac{(\Delta - r)D \exp(\mu z) - (\Delta + r) \exp(-\mu z)}{2c^*(D \exp(\mu z) - \exp(-\mu z))} \quad (\text{Eq. IV.3.4})$$

$$\frac{A_3(z)}{A_4^*(z)} = \frac{(\Delta - r)E \exp(\mu z) - (\Delta + r) \exp(-\mu z)}{2c^*(E \exp(\mu z) - \exp(-\mu z))} \quad (\text{Eq. IV.3.5})$$

avec :

$$\Delta = d_2 - d_1 \quad (\text{Eq. IV.3.6})$$

$$r = \sqrt{\Delta^2 + 4cc^*} \quad (\text{Eq. IV.3.7})$$

$$\mu = \frac{\gamma}{2I_0} \quad (\text{Eq. IV.3.8})$$

D et E sont des constantes d'intégration.

En appliquant les conditions aux limites correspondant aux deux régions d'interaction de dimensions $l = l_2 - l_1$ et $l' = l_2 - l_1'$, on obtient les équations supplémentaires suivantes :

- pas d'injection d'onde conjuguée

$$A'_4(l_2) = 0 \quad (\text{Eq. IV.3.9})$$

- pas d'injection d'onde pompe

$$A_1(l_1) = 0 \quad (\text{Eq. IV.3.10})$$

$$A'_1(l_1) = 0 \quad (\text{Eq. IV.3.11})$$

- existence de deux zones d'interaction couplées par la réflexion interne

$$A_2(l_2) = (1-L)^{1/2} A'_1(l_2) \times \exp(i\theta) \quad (\text{Eq. IV.3.12})$$

$$A'_2(l_2) = (1-L)^{1/2} A_1(l_2) \times \exp(i\theta) \quad (\text{Eq. IV.3.13})$$

- conditions de continuité

$$A_3(l_2) = A'_3(l_1) \times \exp(i\Phi) \quad (\text{Eq. IV.3.14})$$

$$A'_4(l_1) = A_4(l_2) \times \exp(i\Phi) \quad (\text{Eq. IV.3.15})$$

où L est la perte par réflexion dans le coin du cristal, θ et Φ sont les déphasages accumulés par les ondes entre les deux zones d'interaction.

Lorsque l'on suppose que les deux zones présentent la même longueur effective d'interaction et le même coefficient de couplage :

$$l = l_2 - l_1 = l_2 - l_1 \quad (\text{Eq. IV.3.16})$$

$$\gamma = \gamma' \quad (\text{Eq. IV.3.17})$$

on obtient la réflectivité R du miroir :

$$R = \left| \frac{A_3(l_1)}{A'_4(l_1)} \right|^2 = \frac{-a(r)b(r)}{4(1-r^2) \tanh^4\left(\frac{\gamma \cdot l \cdot r}{2}\right)} \quad (\text{Eq. IV.3.18})$$

avec :

$$a(r) = r^2 \left[1 - \tanh^2\left(\frac{\gamma \cdot l \cdot r}{2}\right) \right] \quad (\text{Eq. IV.3.19})$$

$$b(r) = \left[r - 2 \tanh\left(\frac{\gamma \cdot l \cdot r}{2}\right) \right]^2 - r^2 \tanh^2\left(\frac{\gamma \cdot l \cdot r}{2}\right) \quad (\text{Eq. IV.3.20})$$

On peut donc considérer comme paramètres de calcul les quantités suivantes :

- $\gamma \cdot l$: produit du coefficient de couplage par la longueur effective d'interaction ; si l'on peut calculer le coefficient de couplage, comme nous allons le montrer un peu plus loin, la longueur effective d'interaction est elle plus difficile à estimer ; nous proposerons une hypothèse à ce sujet ;
- $r = \sqrt{\Delta^2 + 4|c|^2}$ (avec Δ et c définis aux équations (Eq. IV.3.3) et (Eq. IV.3.6))

est relié aux taux d'intensité lumineuse participant au beam fanning.

3.2.3. Coefficient de couplage

Le coefficient de couplage γ dépend de nombreux paramètres : des paramètres liés à la nature même de l'échantillon bien sûr, mais aussi des angles α_1 et α_2 . Dans le cas stationnaire, il peut se mettre sous la forme :

$$\gamma = \frac{\omega}{2nc} \cdot \frac{Er_{eff}}{\cos\left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}\right)} \quad (\text{Eq. IV.3.21})$$

où :

- r_{eff} est le coefficient électrooptique (Pockels) efficace
- E est le champ électrique vu par les porteurs

Dans le cas où aucun champ extérieur n'est appliqué, le champ électrique E peut lui-même se mettre sous la forme :

$$E = \frac{k_s \frac{k_B T}{q}}{1 + \frac{k_s^2}{q^2 N_A} \frac{1}{k_B T \langle \epsilon \rangle}} \quad (\text{Eq. IV.3.22})$$

où :

- k_s est le vecteur d'onde du réseau inscrit
- q est la charge électrique des porteurs
- T est la température
- N_A est la densité de porteurs
- $\langle \epsilon \rangle = \epsilon_0 \times \epsilon = \epsilon_0 \times \frac{\mathbf{k}_s \cdot [\epsilon] \cdot \mathbf{k}_s}{|\mathbf{k}_s|^2}$ est la constante diélectrique effective

Le module du vecteur d'onde du réseau k_s a pour expression :

$$k_s = \frac{2n\omega}{c} \cdot \sin\left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}\right) \quad (\text{Eq. IV.3.23})$$

Le coefficient électrooptique r_{eff} a pour expression dans le cas de la polarisation extraordinaire [Feinberg and Hellwarth 1980][Feinberg et al. 1980] :

$$r_{eff} = \left[n_o^4 r_{13} \cos(\alpha_1) \cos(\alpha_2) + 2n_e^2 n_o^2 r_{42} \cos^2\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right) + n_e^4 r_{33} \sin(\alpha_1) \sin(\alpha_2) \right] \times \sin\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right) \quad (\text{Eq. IV.3.24})$$

3.2.4. Influence de l'angle de fanning

Feinberg a calculé la réflectivité du miroir en supposant que le rayon de fanning prenait naturellement la direction correspondant à la valeur de l'angle de fanning α_2 qui optimise le coefficient de couplage.

Dans notre cas nous calculons, pour un angle d'incidence donné, la réflectivité du miroir en fonction de l'angle de fanning. Il apparait bien sûr clairement une valeur optimale pour l'angle de fanning α_2 .

Toutefois tout un continuum d'angles de fanning α_2 peut participer de manière efficace à la réflectivité du miroir CAT.

C'est pourquoi nous proposons d'étendre le modèle de Feinberg et MacDonald en le dotant d'une distribution continue de fanning.

Il existe cependant des bornes entre lesquelles l'angle de fanning doit se situer pour que le rayon correspondant puisse subir les deux réflexions internes dans le coin du cristal. Un calcul d'optique géométrique élémentaire montre que pour les rayons considérés, l'angle limite de réflexion interne pour le titanate de baryum plongé dans l'air est d'environ 24 degrés. Ce qui veut dire que la boucle de lumière peut se former (i.e. le rayon de fanning peut subir la double réflexion interne) à chaque fois que l'angle de fanning est compris entre 24 et 66 degrés.

3.3. Paramètres du calcul

Tout en restant dans le cadre des approximations faites dans le présent modèle, il est possible d'obtenir la réflectivité du miroir à conjugaison de phase en considérant un certain nombre de grandeurs comme des paramètres ajustables du modèle. Les paramètres peuvent se séparer en différentes catégories :

- des grandeurs connues de par les conditions géométriques expérimentales :
 - α_1 : angle de l'onde incidente par rapport à l'axe c, mesuré à l'intérieur de l'échantillon
 - T_d : position du point d'incidence
 - dimensions de l'échantillon
 - pulsation et longueur d'onde du faisceau incident
 - puissance lumineuse et polarisation de l'onde incidente
 - température
- des grandeurs mesurables par d'autres expériences
 - indices de réfraction ordinaire et extraordinaire
 - coefficients électrooptiques
 - densité de porteurs de charge
 - tenseur diélectrique

- des grandeurs inconnues dépendant du phénomène dans son intégralité
 - le coefficient de couplage, qui dépend notamment de l'angle de fanning, lui-même inconnu
 - une éventuelle distribution de fanning
 - le coefficient r relié au taux de puissance lumineuse subissant le fanning
 - la longueur effective d'interaction l

Le programme de calcul a été conçu comme un outil d'accompagnement de l'instrument de mesure permettant, à partir de l'adoption de jeux de paramètres pertinents, de calculer la réflectivité du miroir CAT et de la comparer aux résultats expérimentaux, notamment dans la cartographie (α_1 -Td).

Dans la suite, nous allons, à titre d'exemple, donner un ensemble de résultats obtenus par nos calculs.

3.4. Exemple de calcul

3.4.1. Calcul du coefficient de couplage

Nous avons représenté sur la figure IV.3.3. les variations du coefficient de couplage γ en fonction de la variable α_2 (angle de fanning compris entre 0 et 90°) pour différentes valeurs de α_1 (angle d'incidence qui prend successivement les valeurs : 5°, 15°, 25°, 35°, 45°, 55°, 65°, 75° et 85°).

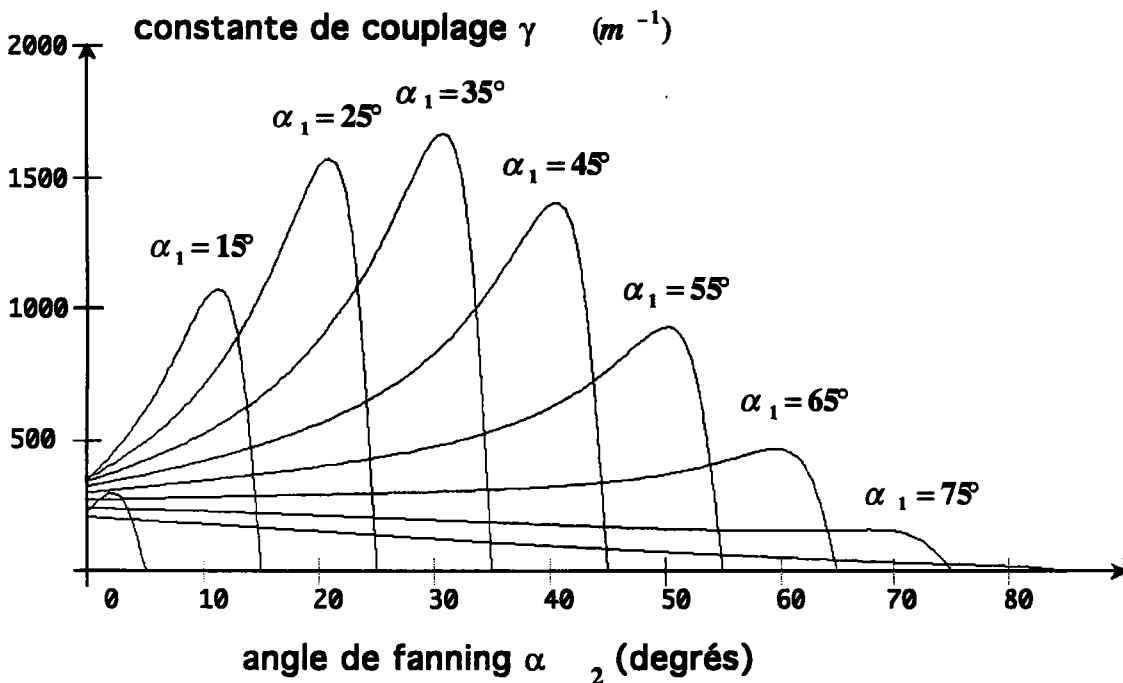


Figure IV.3.3. Coefficient de couplage en fonction des angles α_1 et α_2

Nous avons utilisé, pour effectuer ce calcul, les constantes physiques du titanate

de baryum pur à 20°C données par Jullien [JULLIEN 1994] :

$$r_{13} = 11 pVm^{-1}$$

$$r_{42} = 1600 pVm^{-1}$$

$$r_{33} = 110 pVm^{-1}$$

$$n_{\text{moy}} = 2,45$$

$$n_o = 2,49$$

$$n_e = 2,41$$

$$N_A = 3.10^{16} cm^{-3} = 3.10^{22} m^{-3}$$

Nous retrouvons des courbes analogues à celles obtenues par Feinberg pour le titanate de baryum [FEINBERG 1982].

On constate que l'angle α_2 optimal est toujours environ de 5 à 6° inférieur à l'angle α_1 . Cet angle α_2 correspond, d'après Feinberg, à l'angle que prend naturellement le faisceau dévié lorsque le faisceau incident a l'inclinaison α_1 par rapport à l'axe c.

3.4.2. Influence de l'angle de fanning

Nous avons calculé, pour un angle d'incidence donné, la réflectivité du miroir en fonction de l'angle de fanning (voir figure IV.3.4).

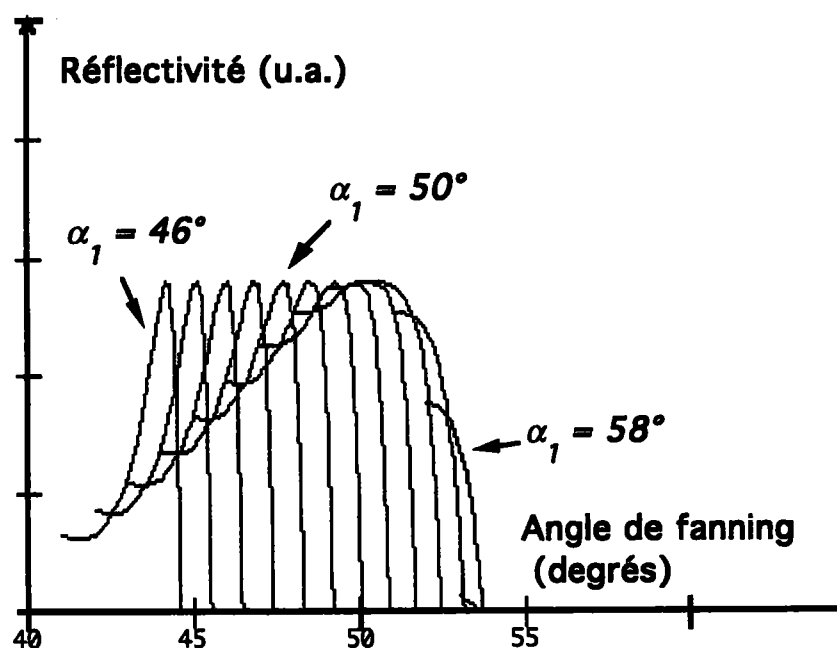


Figure IV.3.4. Calcul de la réflectivité en fonction de l'angle de fanning pour différents angles d'incidence.

Il apparait bien sûr clairement, comme nous l'avons indiqué précédemment, une valeur de l'angle de fanning α_2 donnant une réflectivité maximale.

Toutefois tout un continuum d'angles de fanning α_2 peut participer de manière efficace à la réflectivité du miroir CAT.

3.4.3. Distribution de fanning

Notre contribution [GOETZ et al. 1995] à ce modèle se situe essentiellement à ce niveau ; nous faisons l'hypothèse non plus d'une seule boucle de lumière, mais de plusieurs boucles qui se forment progressivement sous l'effet du beam fanning et qui, en régime permanent, subsistent conjointement dans le cristal.

C'est à dire que pour un rayon incident donné, caractérisé par son angle d'incidence α_1 , il y a génération de plusieurs rayons de fanning, caractérisé chacun par un angle de fanning α_2 (voir figure IV.3.5).

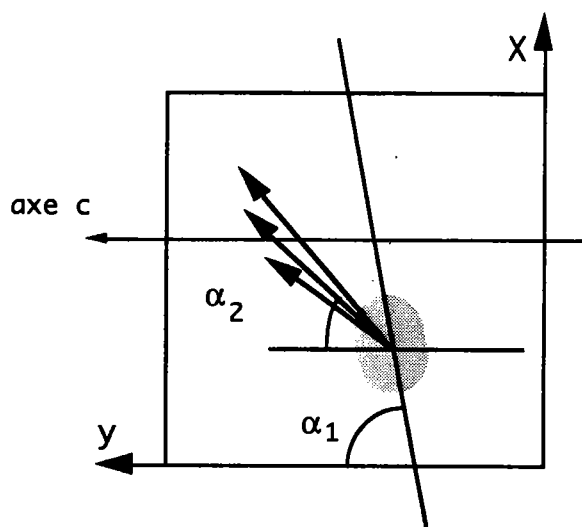


Figure IV.3.5. Un rayon incident donne naissance à plusieurs rayons de fanning à des angles différents.

Notre étude préalable sur le fanning nous suggère de modéliser l'énergie qui est déviée vers l'axe c à partir du rayon incident par une distribution de Hanning (voir figure IV.3.6)¹.

Nous supposons de plus que tous les rayons considérés sont dans le même plan, c'est à dire dans le plan d'incidence. Cette hypothèse était déjà d'ailleurs implicite dans le modèle de MacDonald et Feinberg.

¹ Cette distribution nous a semblé a priori la plus naturelle ; il est cependant possible de choisir, afin de les tester, d'autres distributions et de les intégrer aisément au programme que nous avons écrit.

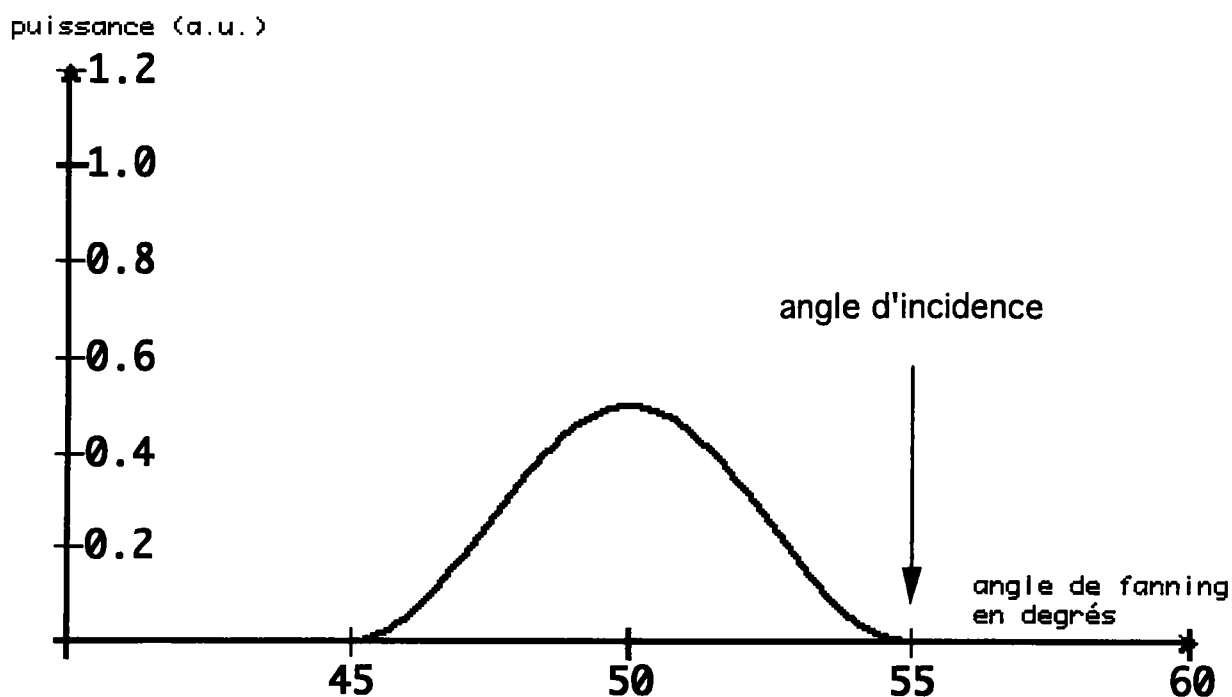


Figure IV.3.6. Exemple de distribution de l'énergie sur les différents rayons de fanning correspondant à une fenêtre de Hanning.

3.4.3. Estimation d'une longueur d'interaction effective

Le modèle précédent, même en tenant compte de la distribution de fanning, ne permet pas de mettre en évidence l'influence de la position transversale du point d'incidence sur la réflectivité du miroir.

Or de nombreuses observations font état de l'importance de ce paramètre [HRIBECK et GOWER 1991][GOETZ et al. 1991-1]. A notre avis, la position transversale du point d'incidence (T_d), de la même manière que l'angle d'incidence (α_1), détermine la géométrie des rayons à l'intérieur du cristal. Et par suite, ces deux paramètres conditionnent la valeur de la longueur effective d'interaction l .

Si dans certaines configurations, variantes du miroir CAT, on peut avoir accès à la valeur de cette longueur d'interaction, il est difficile de la déterminer dans les régions couplées du modèle de Feinberg et MacDonald.

Nous donc avons émis l'hypothèse de travail suivante pour déterminer la longueur effective d'interaction (identique) dans chacune des régions couplées :

$$l = \frac{|(L_y - T_d) \tan \alpha_1 - L_x|}{(\tan \alpha_1 - \tan \alpha_2) \cos \alpha_2} \quad (\text{Eq.IV.3.25})$$

avec :

L_x : profondeur du cristal
 L_y : largeur du cristal
 T_d : position transversale du point d'incidence

Ce calcul correspond à une longueur effective d'interaction proportionnelle à la distance parcourue par les pompes entre les deux zones d'interaction couplées.

3.4.5. Calcul de la réflectivité en fonction de la position du point d'incidence

Nous sommes maintenant en mesure de calculer la contribution de chaque rayon de fanning à la réflectivité totale en fonction du point d'incidence et de l'angle d'incidence.

Nous avons représenté, à titre d'exemple, sur la figure IV.3.7 cette contribution en fonction de T_d pour un angle d'incidence donné ($\alpha_1 = 50$ degrés).

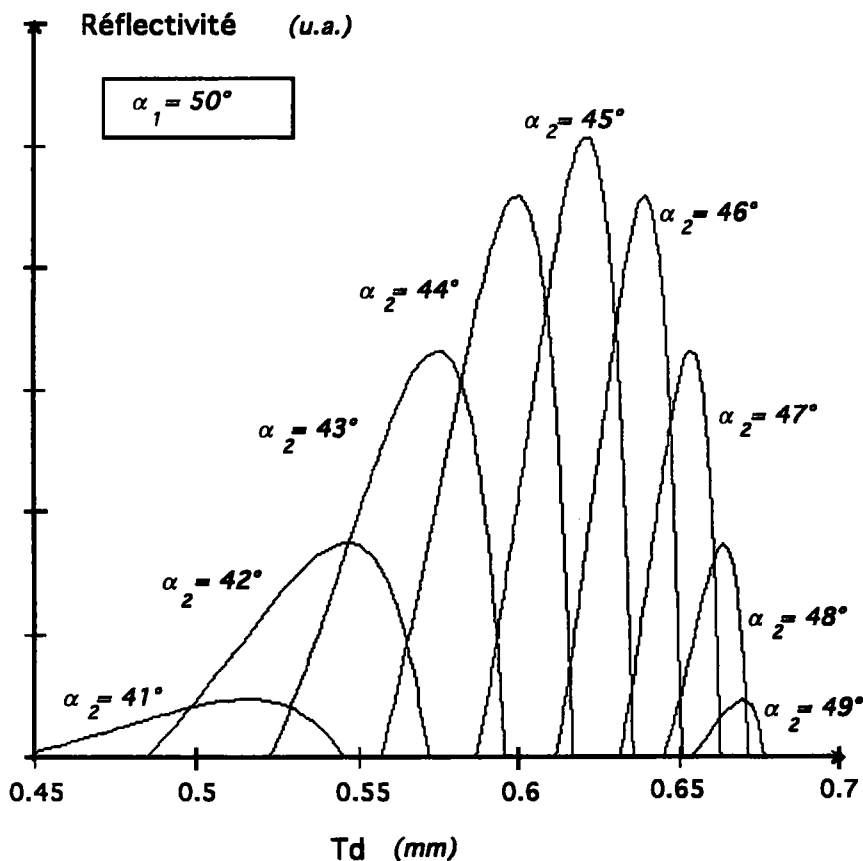


Figure IV.3.7. Contribution à la réflectivité des différents rayons de fanning en fonction de T_d pour un angle d'incidence donné ($\alpha_1 = 50$ degrés).

Il suffit maintenant d'intégrer ces différentes contributions pour calculer la réflectivité du miroir CAT en fonction de T_d et de α_1 . C'est ce que nous montrons au paragraphe suivant sur deux exemples.

3.5. Application de ce modèle de calcul à deux échantillons de titanate de baryum

Nous avons utilisé la modélisation détaillée précédemment pour calculer la réflectivité à saturation obtenue à l'aide des deux échantillons que nous avons à notre disposition.

3.5.1. Echantillon 1

Les dimensions de l'échantillon sont les suivantes :

$$L_x = 4.38mm$$

$$L_y = 4.39mm$$

La fenêtre de Hanning a une largeur de 20° et est centrée en $\alpha_1 - 10$ degrés.

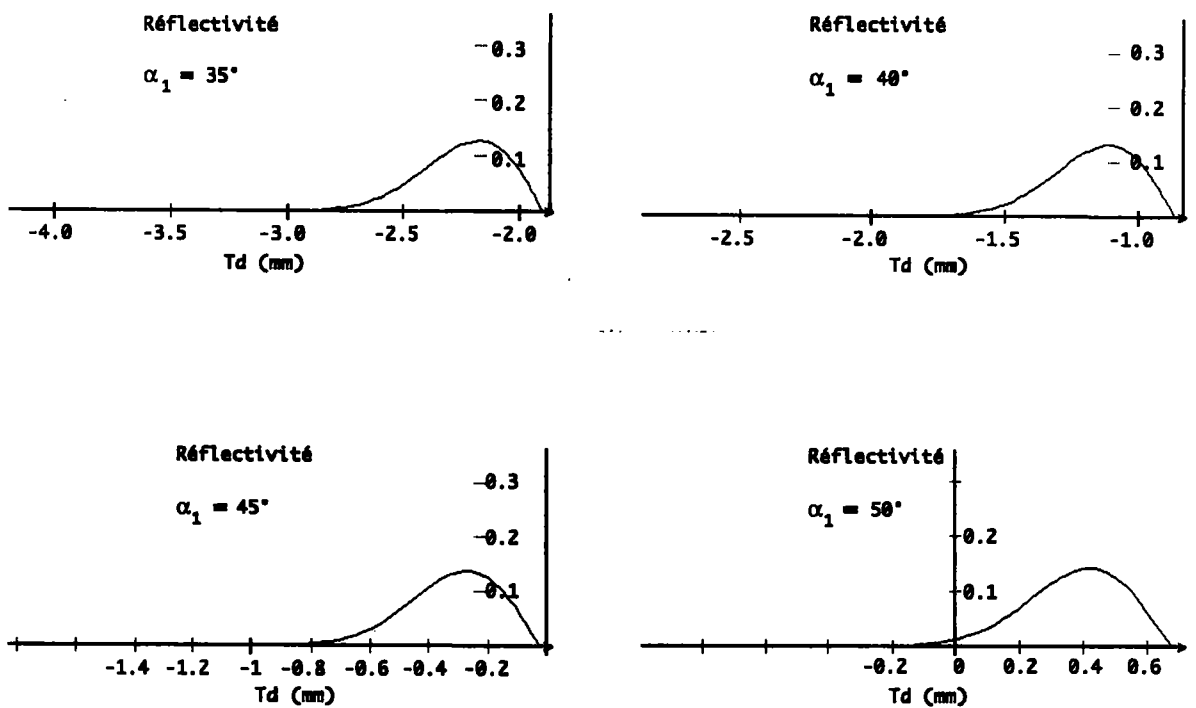


Figure IV.3.8. Réflectivité en fonction de la position transversale du point d'incidence pour des angles d'incidence compris entre 35° et 50°

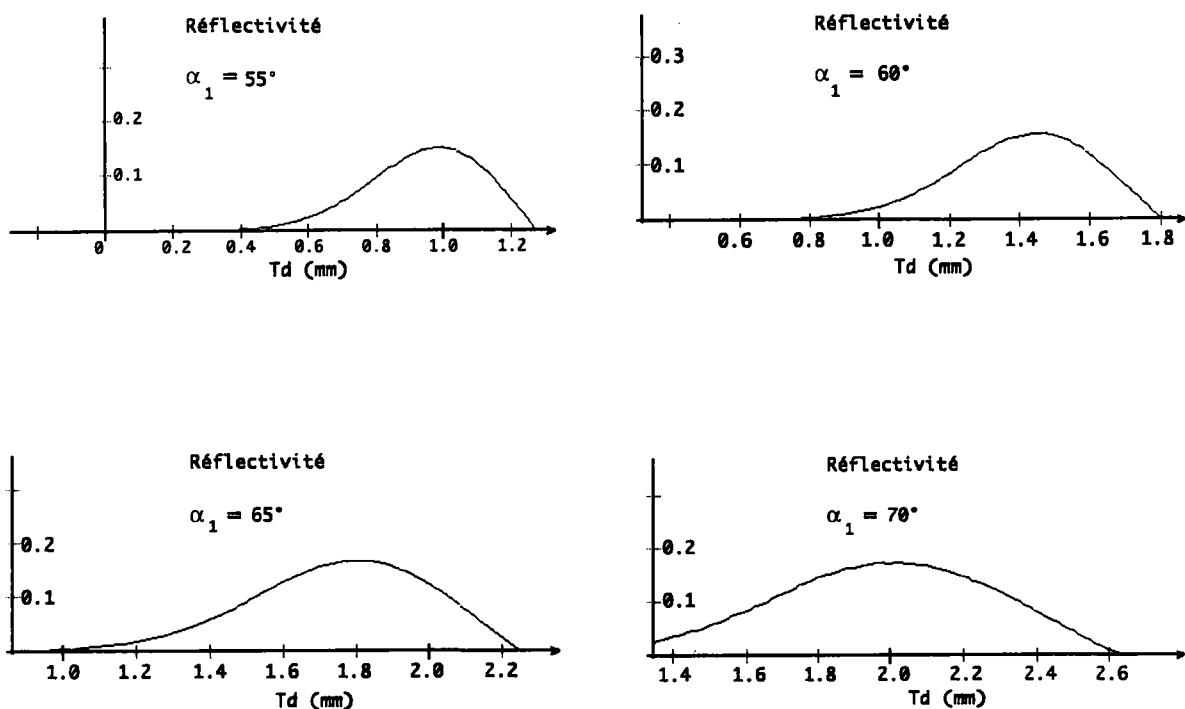


Figure IV.3.9. Réflectivité en fonction de la position transversale du point d'incidence pour des angles d'incidence compris entre 55° et 70°

Nous présentons à la figure IV.3.11 quelques calculs regroupés sur un seul graphique. On peut nettement remarquer qu'il existe, d'après ce calcul, une "zone utile" en Td, c'est à dire donnant une onde conjuguée. Cette zone utile se déplace vers les valeurs croissantes de Td lorsque l'angle d'incidence α_1 augmente, c'est à dire lorsque l'angle R diminue. Nous retrouvons les résultats expérimentaux présentés à la figure IV.3.10.

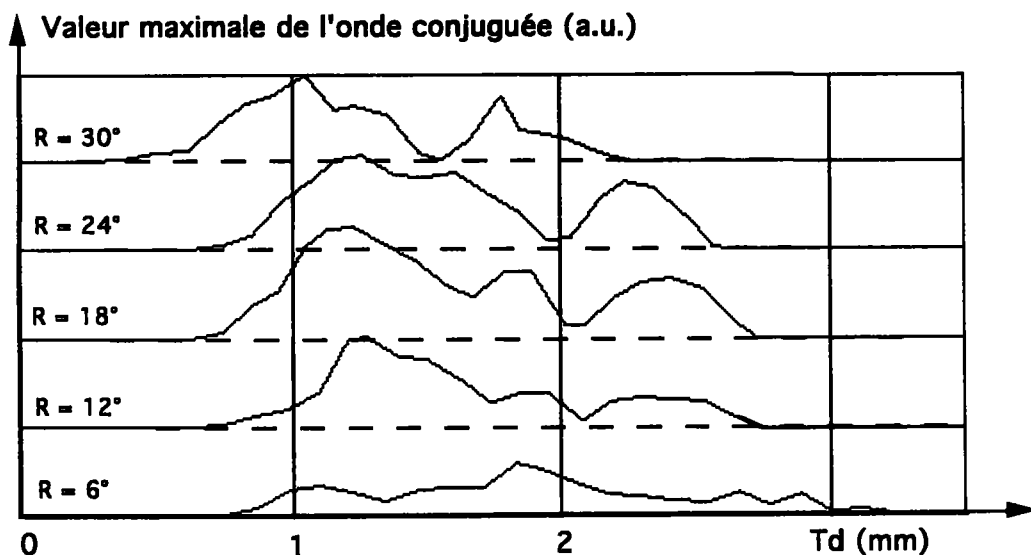


Figure IV.3.10. Résultats expérimentaux.

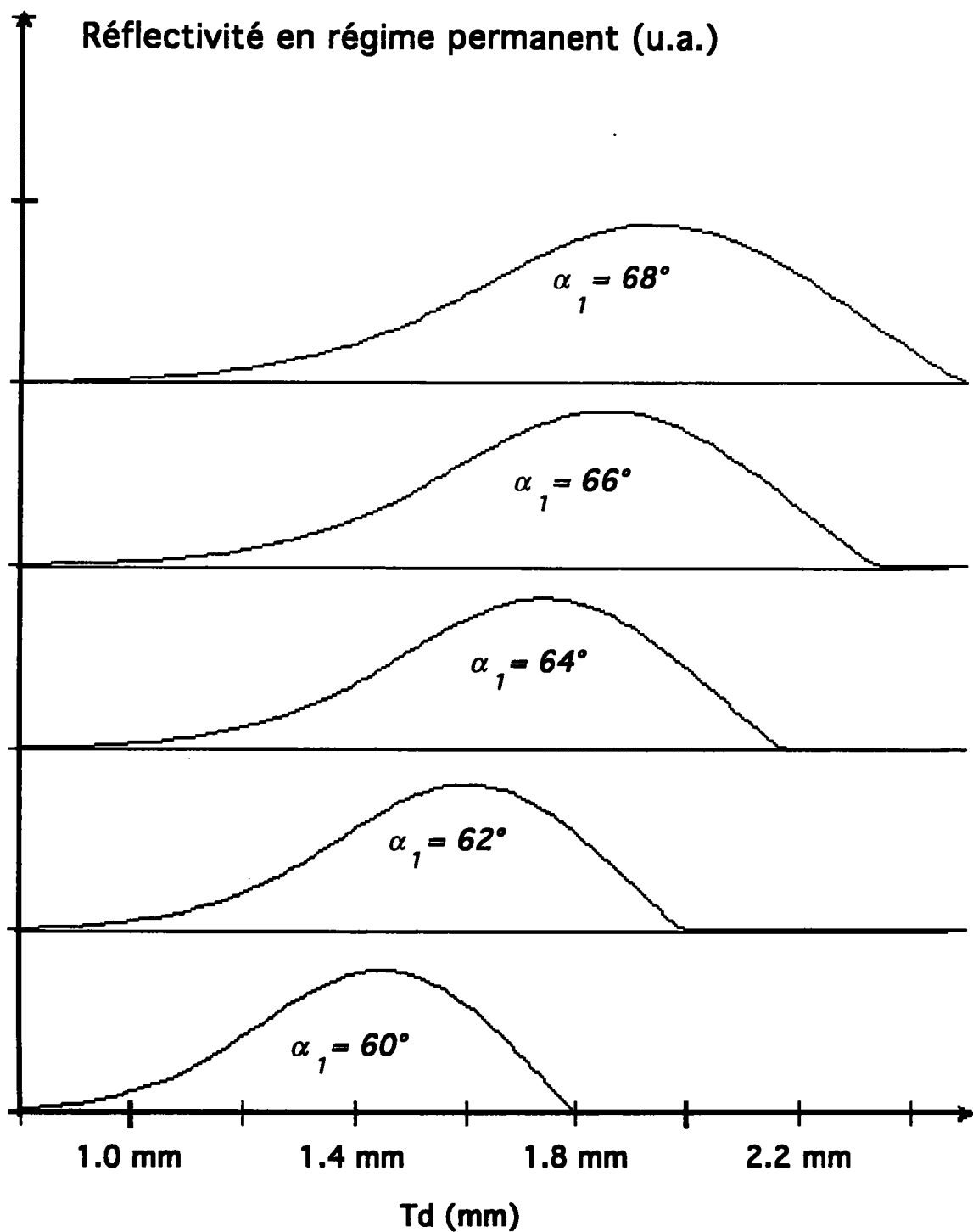


Figure IV.3.10. Réflectivité calculée en fonction de la position transversale T_d du point d'incidence pour plusieurs angles d'incidence.

3.5.2. Echantillon 2

Les dimensions de l'échantillon sont les suivantes :

$$L_x = 4.08\text{mm}$$

$$L_x = 2.93\text{mm}$$

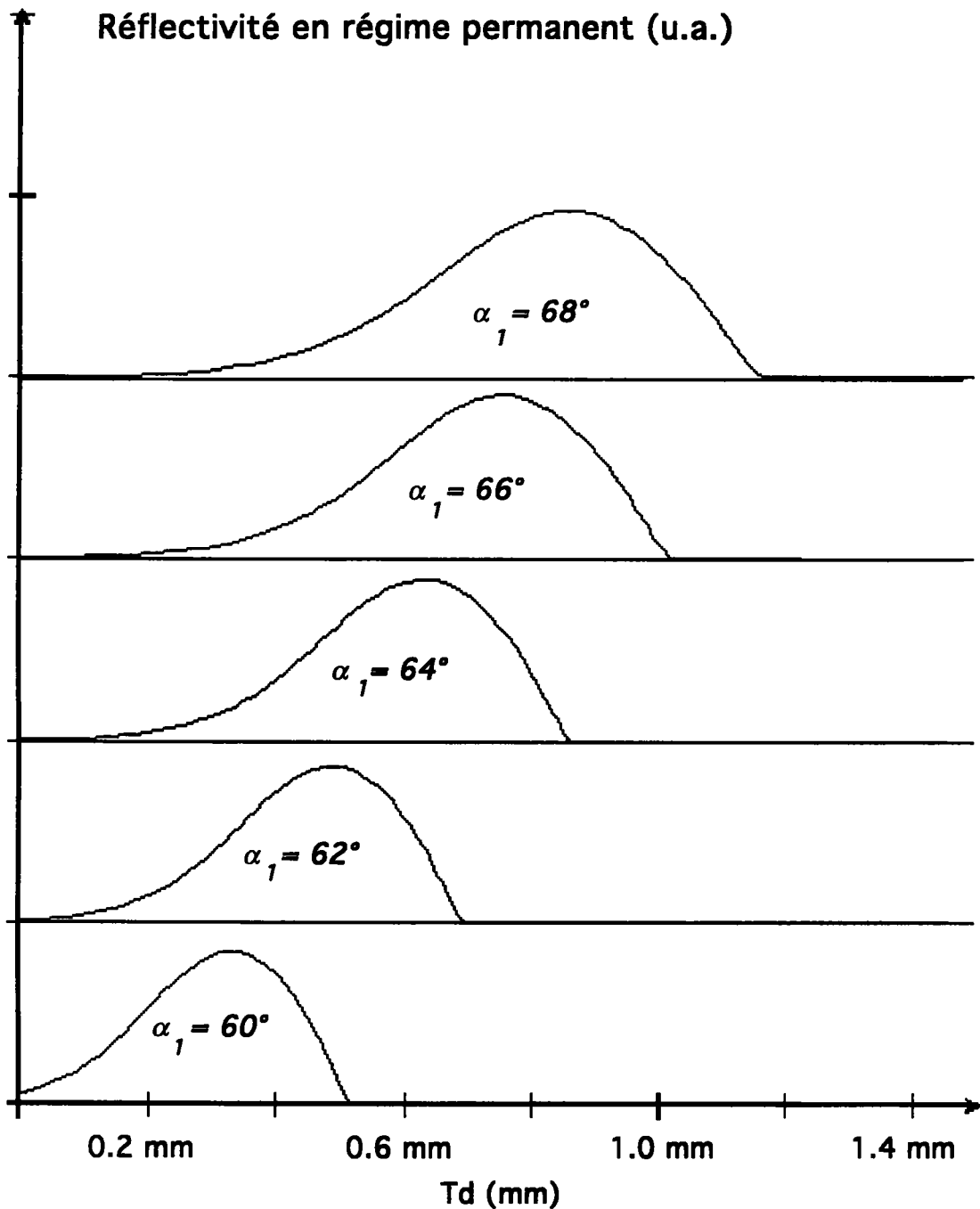


Figure IV.3.12. Réfectivité calculée en fonction de T_d

On peut considérer que ces résultats de calcul, représentés à la figure IV.3.12 sont en bon accord avec les résultats expérimentaux que nous rappelons ci-dessous à la figure IV.3.13.

Si les valeurs numériques ne correspondent pas tout à fait, on remarque très nettement que les bosses de réflectivité se déplacent vers les valeurs croissantes de T_d lorsque α_1 croît.

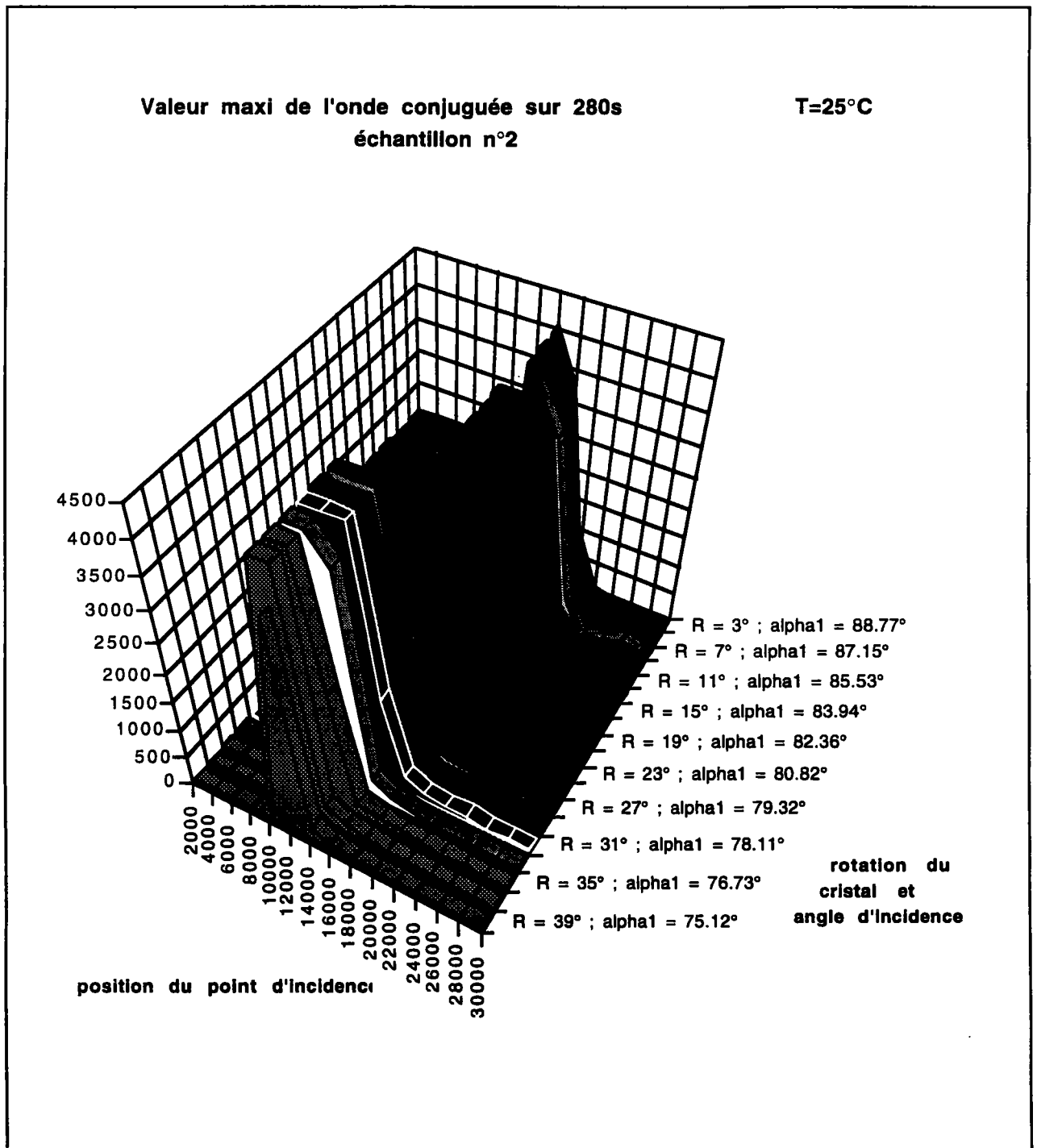


Figure IV.3.13. Réflectivité maximale : résultats expérimentaux.

4. Modélisation statistique du comportement temporel du miroir CAT

Dans ce paragraphe, nous nous proposons de modéliser le comportement temporel de l'onde conjuguée obtenue par un miroir CAT à l'aide d'outils statistiques. Aussi avons-nous créé un programme de simulation, de manière à pouvoir tester notre modèle et étudier expérimentalement l'influence respective de chacun des degrés de liberté à notre disposition.

4.1. Base du modèle statistique

4.1.1. Modéliser un phénomène cumulatif

Après de nombreuses heures d'observation du comportement temporel du miroir CAT, nous avons acquis la conviction que, phénoménologiquement, un processus - ou plusieurs, en compétition - de type cumulatif se mettait en place, puis éventuellement, dans certain cas, était partiellement ou totalement détruit, puis réussissait à s'installer à nouveau, etc.

Aussi avons-nous cherché à modéliser ce comportement en utilisant une démarche toute autre que celle adoptée dans le paragraphe précédent : nous considérons ici le miroir comme une boîte noire, avec une entrée, une sortie, et des paramètres de réglage, mais indépendamment des lois de la physique du solide, du mélange à quatre ondes, etc. La loi de comportement que nous proposons est élaborée à partir d'une fonction aléatoire dérivée de la fonction de percolation.

4.1.2. Tableau

Nous appellerons réponse temporelle du miroir CAT, et nous noterons $R(t)$, l'évolution au cours du temps de la réflectivité de ce miroir à conjugaison de phase. Nous la modélisons par une fonction discrète à temps discret. Elle est construite à partir d'un tableau qui est réactualisé à chaque incrémentation de la variable temporelle t : le tableau est donc lui même une fonction (vectorielle) discrète à temps discret.

Le tableau contient $n+1$ cases numérotées de 0 à n . Chaque case du tableau contient soit un entier (tableau entier), soit un réel (tableau réel), soit un bit (tableau binaire). Nous ne considérons pour l'instant que des tableaux binaires.

4.1.3. Initialisation et actualisation du tableau

Au départ, à $t=0$, le tableau est initialisé et chaque case contient la valeur 0, sauf la case numéro 0 qui contient la valeur 1. Ensuite on incrémente le temps ($t=1$) et on procède à un tirage au sort d'un nombre j compris entre 1 et n (chaque valeur étant équiprobable). L'actualisation du tableau consiste alors à actualiser la j -ième case de ce tableau. On y place aléatoirement une valeur 0 ou 1 (dans le cas des tableaux binaires) en fonction d'une certaine loi de probabilité que nous allons détailler un peu plus loin. Cette loi de probabilité dépend a priori de la valeur de j et du contenu du tableau à l'instant $t-1$. Le tableau étant actualisé, on procède à l'évaluation de la réponse temporelle, puis on itère le processus : incrémentation du temps, actualisation du tableau et évaluation de la réflectivité en fonction du contenu du tableau.

4.1.4. Évaluation de réflectivité à partir du contenu du tableau

A chaque instant t , après actualisation du tableau, on procède au calcul de la réponse temporelle du miroir de la manière suivante : on recherche le numéro k de la case tel que le contenu de toutes les cases de numéro inférieur à k soit strictement positif et tel que la case de numéro $k+1$ contienne 0. La réflectivité à l'instant t est alors k/n .

$$R = \frac{k}{n} \text{ avec } k = \min(i, \text{tableau}[i+1] \leq 0) \quad (\text{Eq. IV.3.1})$$

4.1.5. Outil d'étude expérimentale

L'étude probabiliste des différentes variantes du modèle aléatoire que nous proposons s'avérant particulièrement ardue, nous avons décidé d'étudier les différents comportements obtenus de manière expérimentale. Aussi avons-nous mis au point un programme permettant de générer, automatiquement et en environnement MacIntosh multitâche, le calcul de la réponse temporelle en fonction des hypothèses faites pour la loi de probabilité ainsi que le tracé des courbes représentatives.

Il est ainsi possible de se rendre compte avec beaucoup de précision quels sont les paramètres qui jouent sur la réflectivité à saturation, sur la stabilité, sur le temps de réponse etc. Le programme est articulé autour d'un noyau générant en fait un fichier de type TextEdit contenant non seulement le résultat du calcul mais aussi du code en langage Pascal qui sera exécuté par l'application TraceCourbe¹ lancée automatiquement dès le calcul achevé.

¹ TextEdit et TraceCourbe sont des logiciels écrits et mis gracieusement à notre disposition par Jean-Louis Gutzwiller.

4.2. Remplissages simples d'un tableau binaire

4.2.1. Remplissage par cumul simple

Le cumul simple consiste, dans le cas d'un tableau binaire, à mettre le contenu de la j -ième case à 1 quelque soit l'état du tableau à l'instant précédent et quelque soit j . Il est clair que l'on construit ainsi une fonction croissante dont la valeur maximale de la dérivée (discrète) ne peut excéder $1/n$ (voir figure IV.4.1).

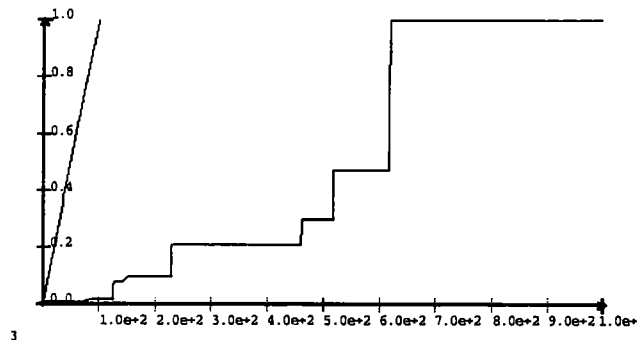


Figure IV.4.1.

Le modèle du cumul simple ne permet pas de modéliser les comportements qui sont soit oscillants soit instables.

4.2.2. Remplissage par pile ou face

De manière à autoriser la décroissance de R , on remplit la j -ième case du tableau en y plaçant aléatoirement 0 ou 1. On obtient des réponses qui ne décollent pratiquement jamais (voir figure IV.2.2)

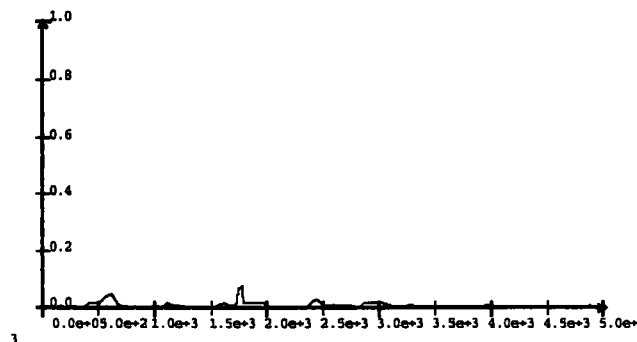


Figure IV.4.2.

4.2.3. Remplissage par bascule

On peut remplir la j -ième case du tableau par le complément à 1 de sa valeur antérieure : c'est à dire 0 si elle était à 1 et 1 si elle était à 0). On obtient des réponses du même genre que les précédentes :

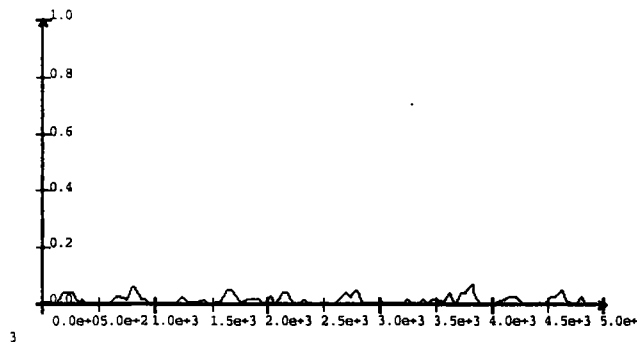


Figure IV.4.3.

4.3. Remplissage d'un tableau binaire par loi de probabilité

Nous proposons maintenant d'actualiser le tableau de la manière suivante :

- Si la j -ième cas (i.e. la case à actualiser) contenait la valeur 0, alors on l'actualise en lui mettant la valeur 1.
- Si elle contenait la valeur 1, alors on lui met aléatoirement 0 ou 1 en fonction d'une loi de probabilité qui dépend de j .

Nous allons montrer que, par un choix judicieux de la fonction de probabilité, il est possible de modéliser quasiment tous les comportements temporels observés sur nos échantillons.

Les lois de probabilité seront définies par des applications continues de l'intervalle $[0,1]$ vers l'intervalle $[0,1]$. La variable en abscisse représente j/n (n étant le nombre de cases du tableau moins un) ; la variable en ordonnée représente la probabilité de mettre 0 dans la j -ième case du tableau.

Nous avons représenté dans un premier temps ces fonctions par des polynomes dont les coefficients étaient déterminés (par calcul formel à partir de contraintes) grâce au logiciel Mathematica.

Nous avons rapidement remarqué qu'une approximation par une fonction linéaire par morceaux (6 segments de droites sur l'intervalle $[0,1]$) donnait en fait des résultats tout à fait comparables, et pour des temps de calculs bien inférieurs.

Nous présenterons ici uniquement quelques résultats numériques illustrant le type de réponse temporelle correspondant à un choix donné de loi de probabilité définie par une fonction continue linéaire par morceaux.

Nous montrerons l'influence des différents paramètres définissant la forme de la fonction de probabilité sur les propriétés du comportement temporel correspondant.

4.4. Réponses temporelles obtenues pour diverses lois de probabilité

4.4.1. Influence de la valeur de M

Nous considérons dans un premier temps des lois de probabilité continues ayant pour valeur 0 dans l'intervalle $[0, M-\delta]$, 1 dans l'intervalle $[M+\delta, 1]$ et linéaire dans l'intervalle $[M-\delta, M+\delta]$.

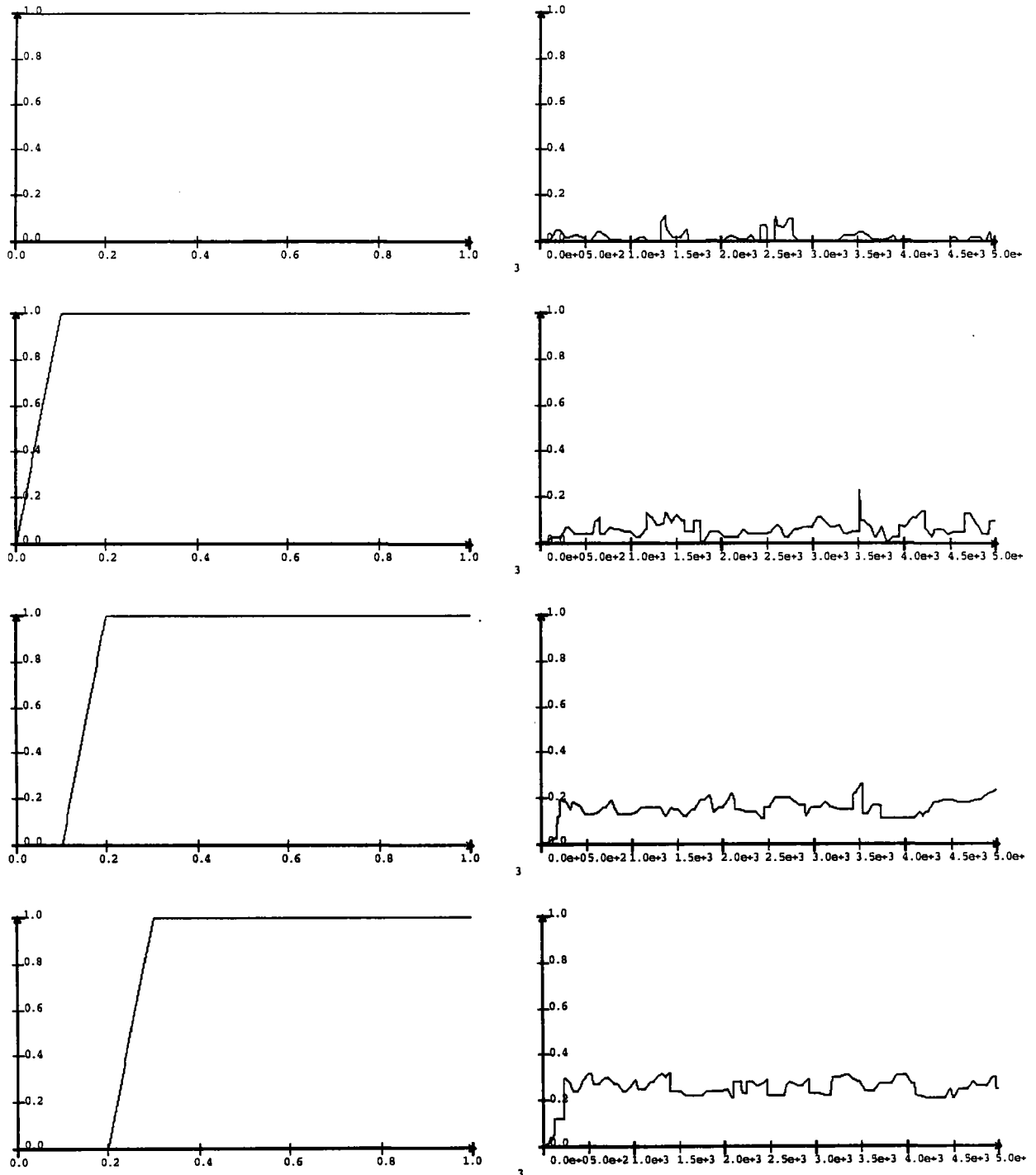
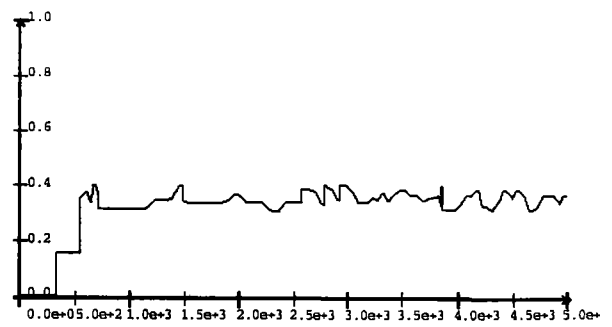
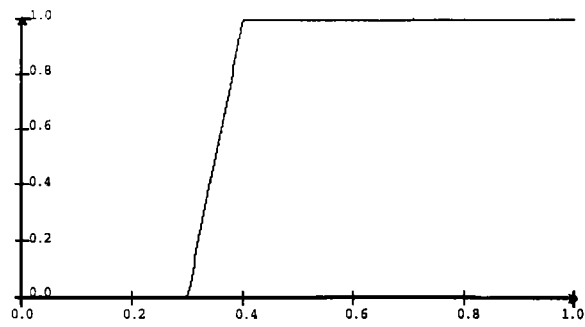
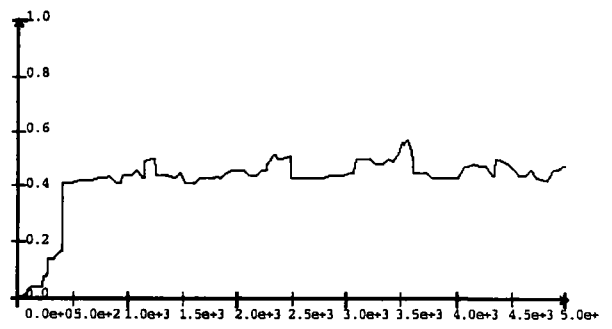
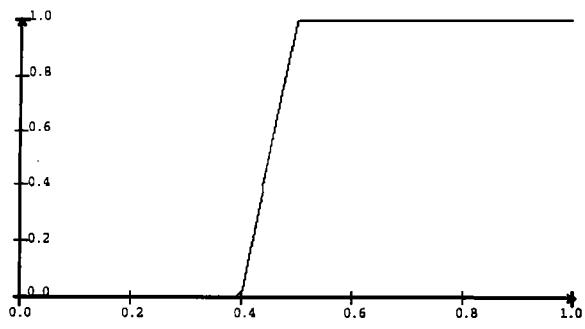


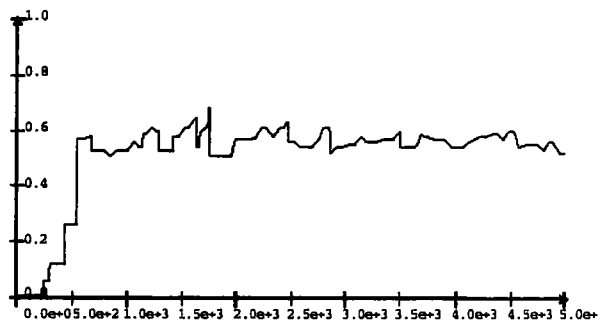
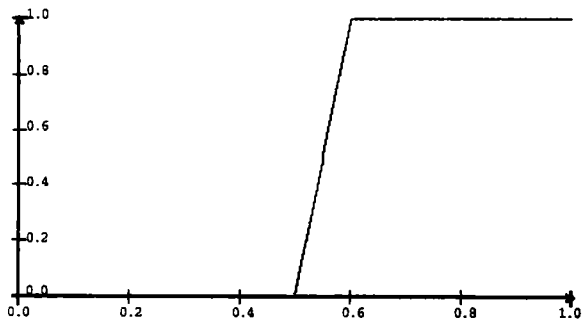
Figure IV.4.4. Influence de M : M varie de $-0,05$ à $0,25$ ($\delta=0,05$).



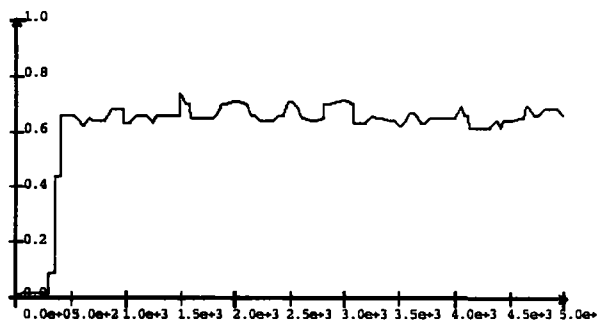
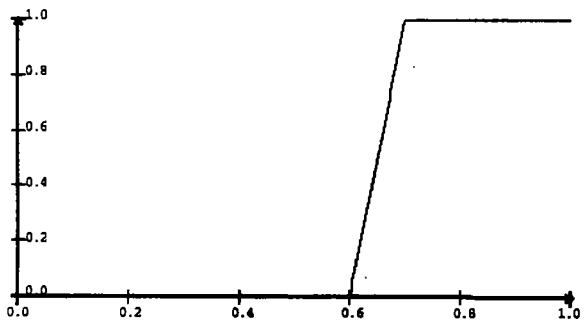
3



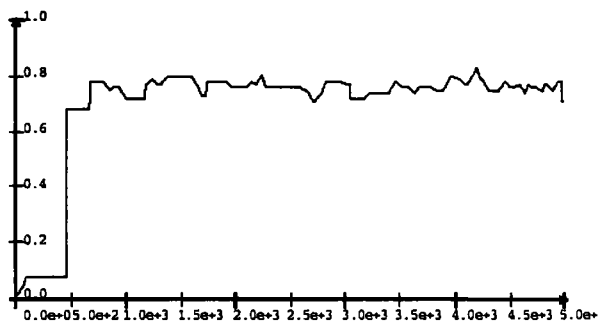
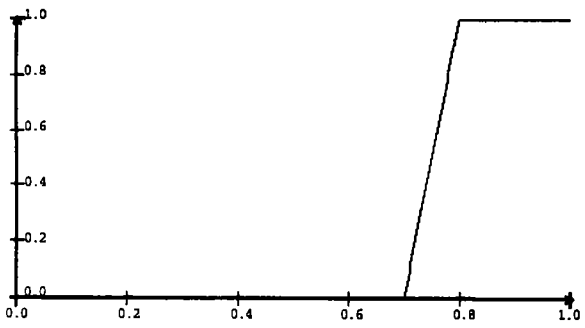
3



3



3



3

Figure IV.4.5. Influence de M : M varie de 0,25 à 0,75 ($\delta=0,05$).

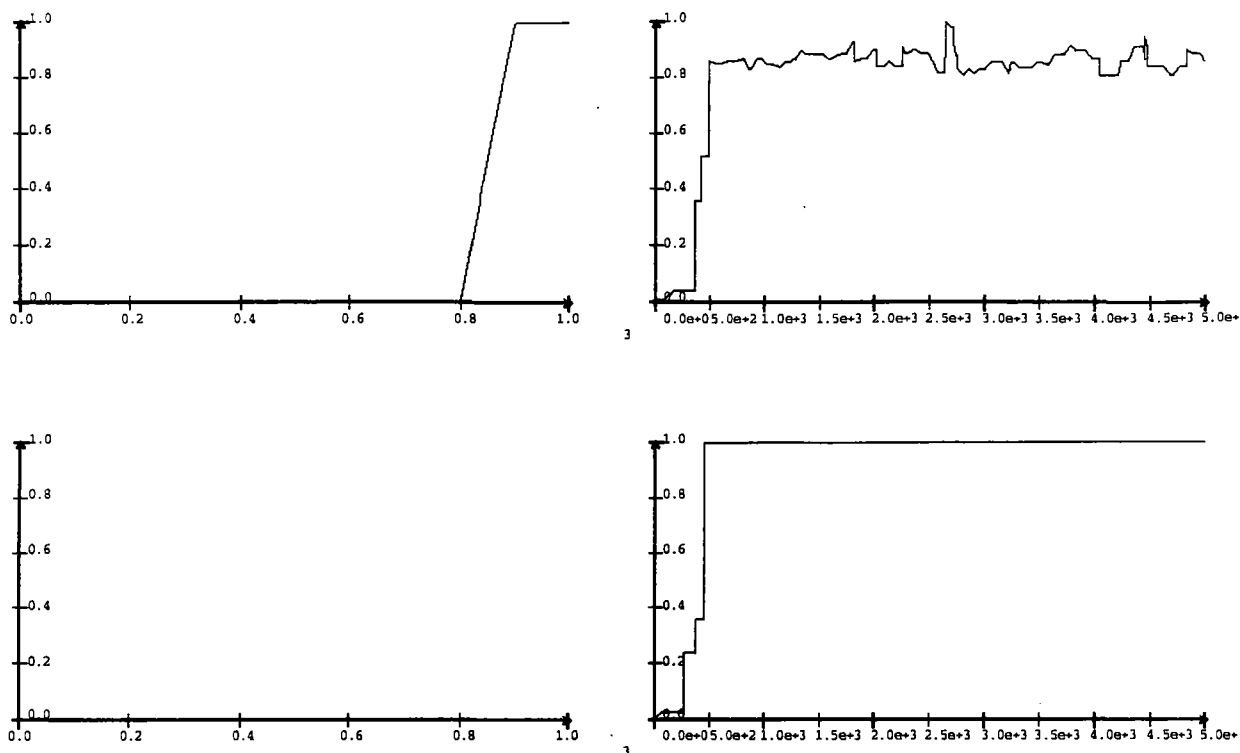


Figure IV.4.6. Influence de M : M varie de 0,85 à 1 ($\delta=0,05$).

Avec ce genre de loi de probabilité, on constate que l'on obtient une valeur à saturation qui est voisine de celle de M . Le comportement est stable (pour $M > 0,15$). On pourra aisément attribuer cette stabilité au fait que la fonction reste à zéro pour des valeurs de j/n allant de zéro à des valeurs proches de M . Lorsque la valeur de M est faible, le comportement devient instable car l'ordre de grandeur des fluctuations est le même que celui du niveau moyen.

4.4.2. Influence de la valeur de δ

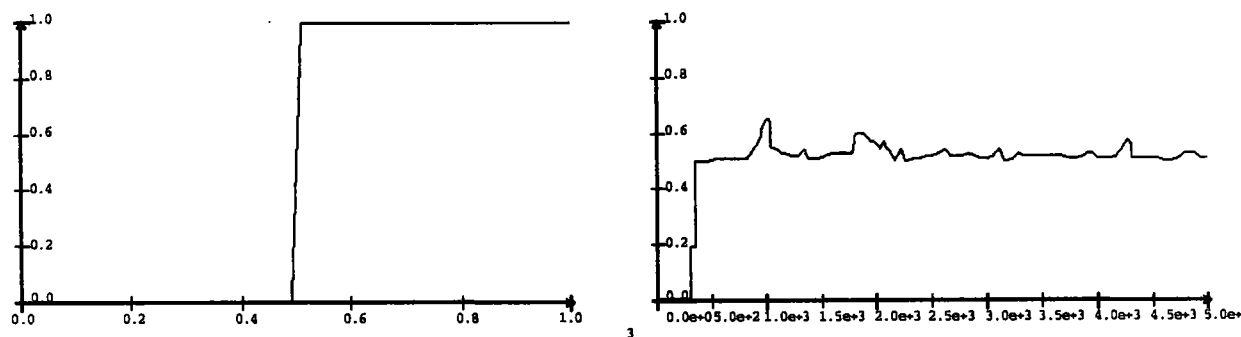


Figure IV.4.7. Influence de δ : $\delta = 0,01$ ($M=5$).

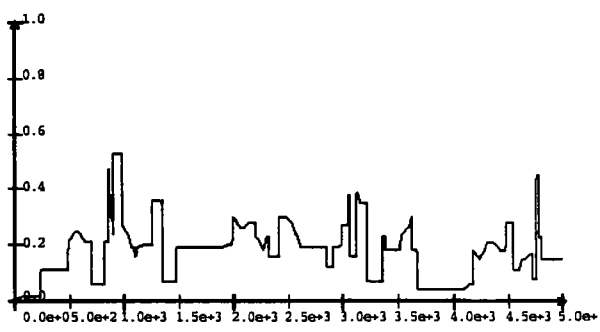
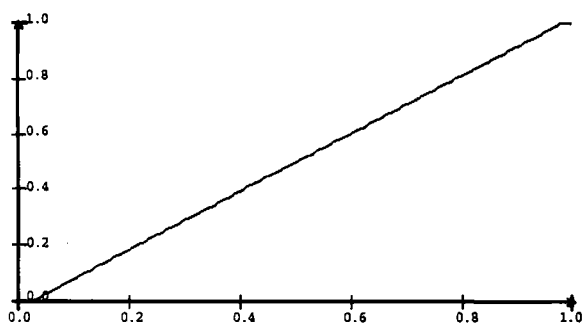
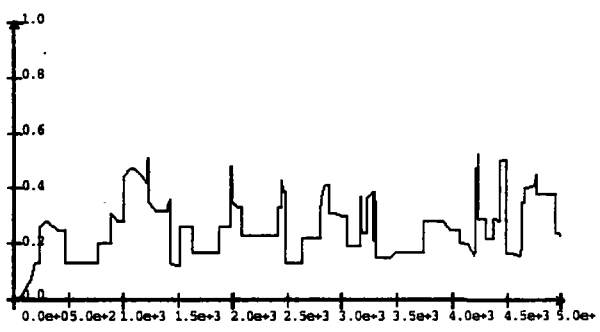
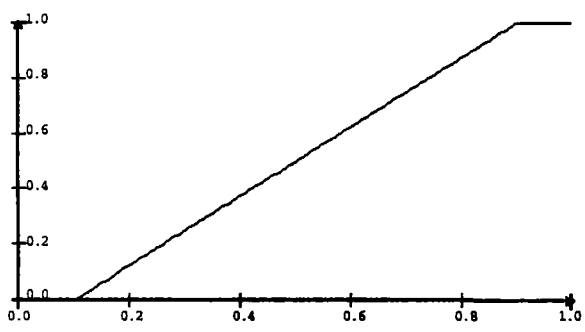
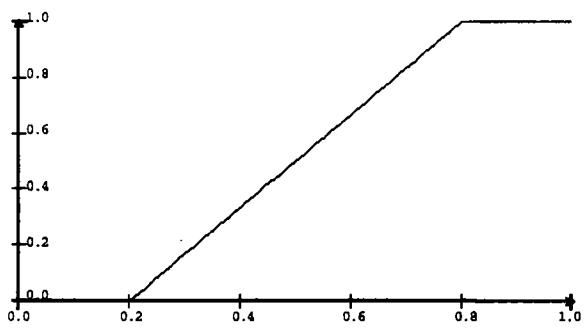
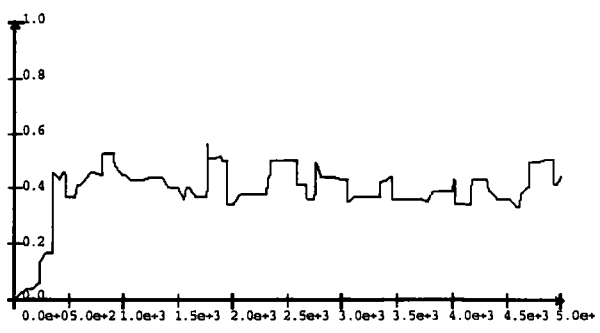
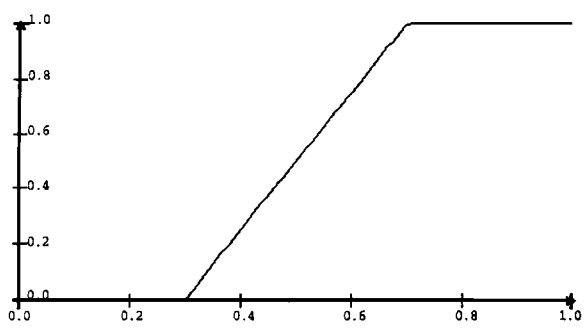
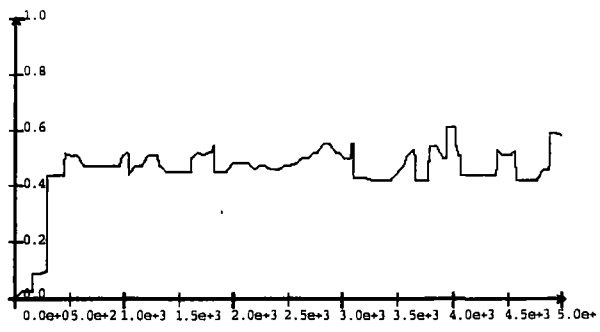
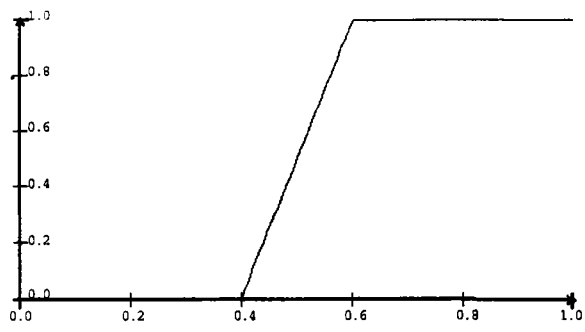


Figure IV.4.8. Influence de δ : δ varie de 0,1 à 0,5 ($M=5$).

Nous remarquons que la stabilité se dégrade progressivement au fur et à mesure que δ augmente. La raison essentielle, à notre avis, est que la plage des valeurs pour laquelle la loi de probabilité reste strictement à 0 (c'est à dire l'intervalle $[0, M-\delta]$) diminue lorsque δ augmente.

Pour vérifier cela, nous modifions la définition de la loi de probabilité en lui donnant dans l'intervalle $[0, M-\delta]$ la valeur ϵ (au lieu de la valeur 0, comme précédemment).

4.4.3. Influence de la valeur de ϵ

Nous étudions sur les figures IV.4.9 et IV.4.10 l'influence de la valeur de ϵ ; les valeurs de M et δ sont fixées respectivement à 0,5 et 0,1.

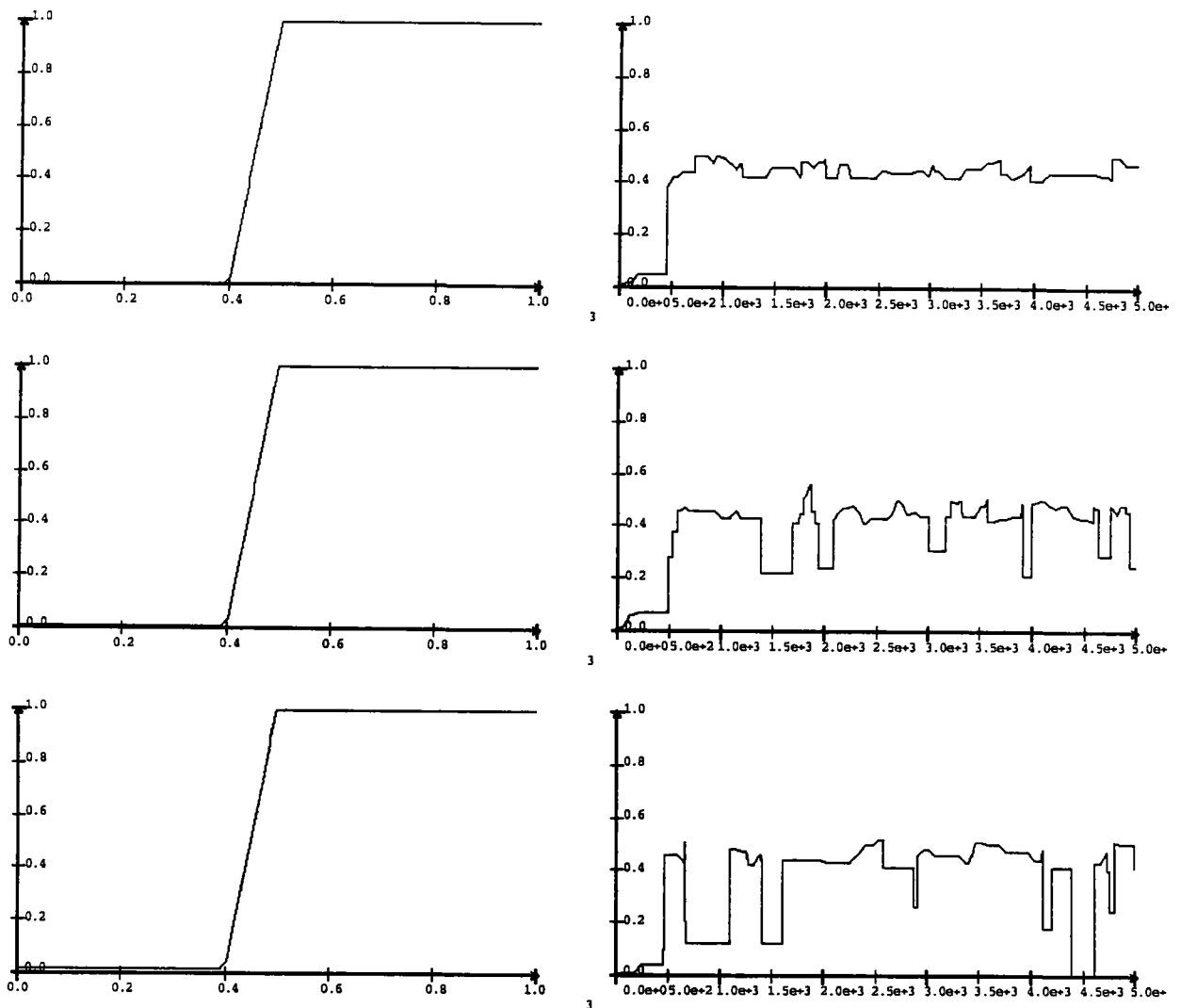


Figure IV.4.9. Influence de ϵ , ϵ varie de 0,0 à 0,02 ($M=4,5$ et $\delta=0,05$).

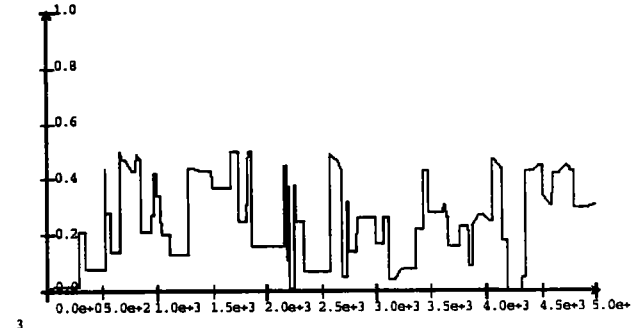
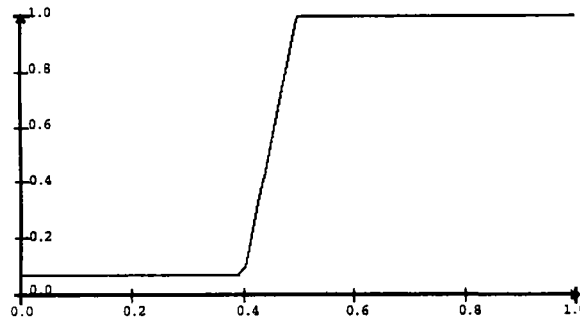
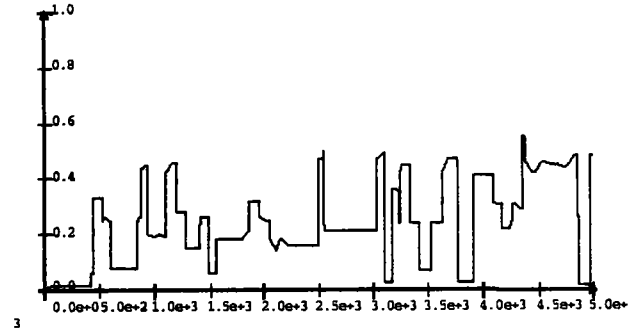
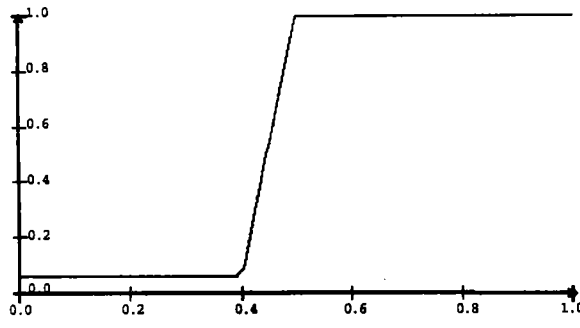
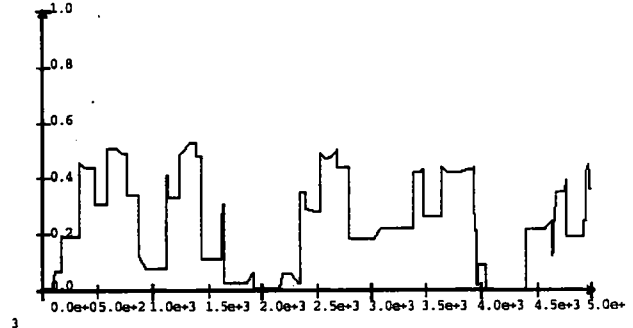
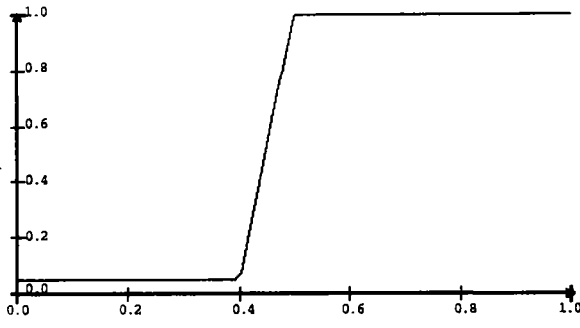
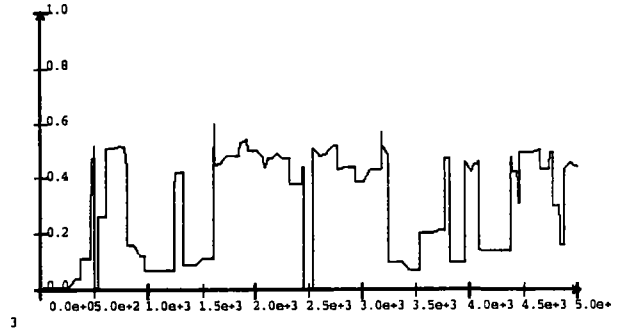
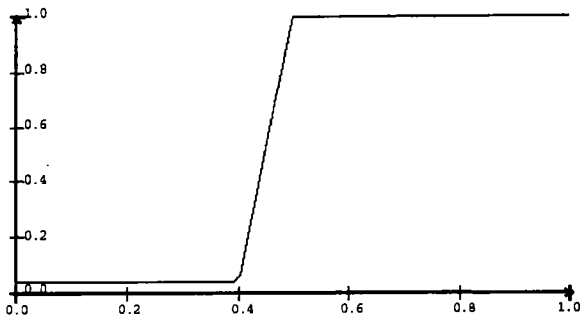
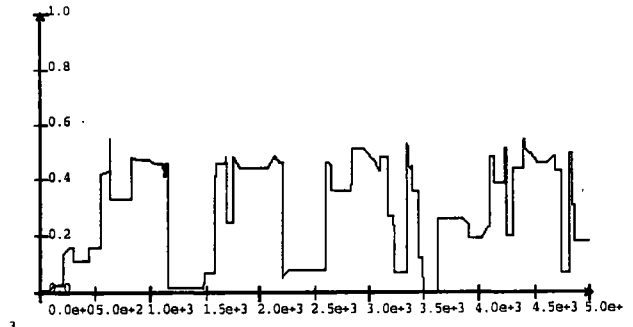
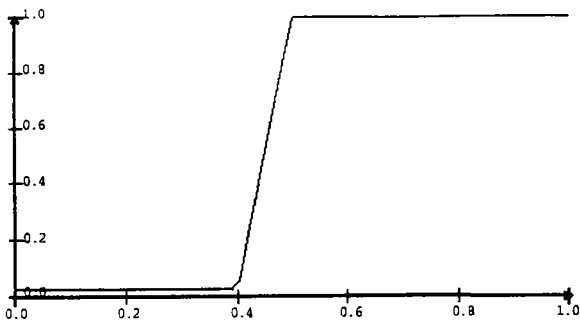


Figure IV.4.10. Influence de ε , ε varie de 0,03 à 0,7 ($M=4,5$ et $\delta=0,05$).

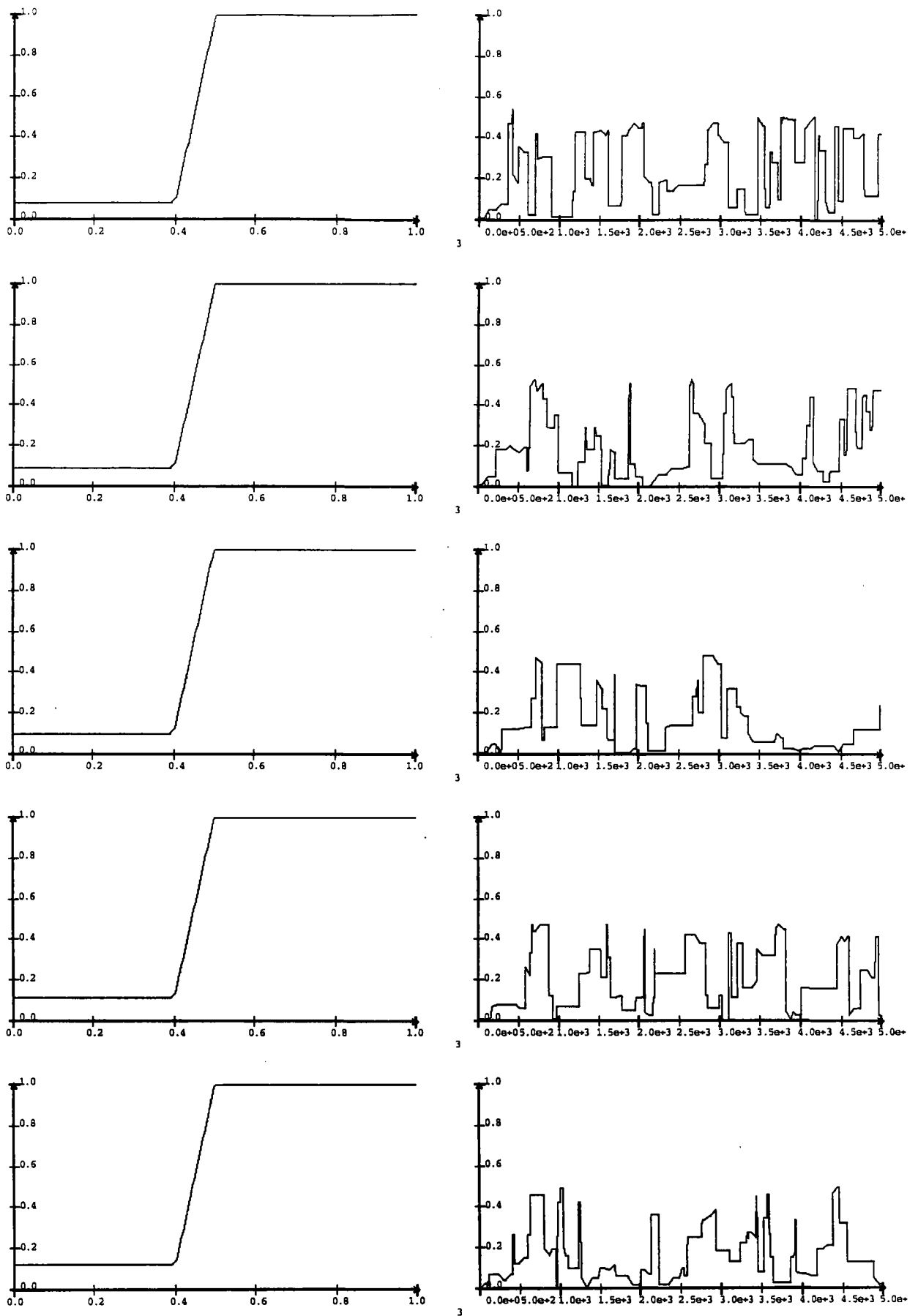


Figure IV.4.11. Influence de ϵ , ϵ varie de 0,08 à 0,12 ($M=4,5$ et $\delta=0,05$).

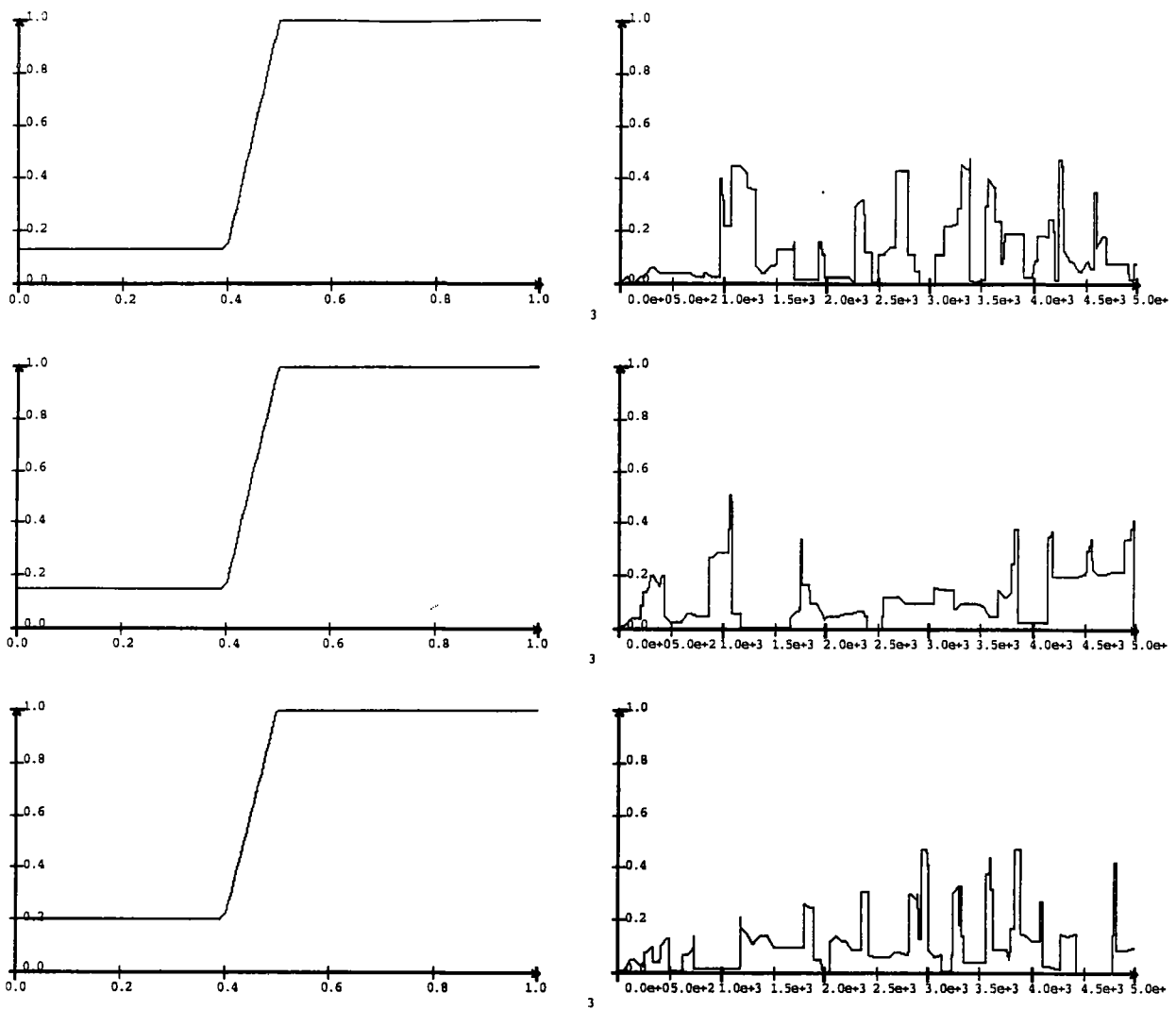


Figure IV.4.12. Influence de ε , ε varie de 0,13 à 0,2 ($M=4,5$ et $\delta=0,05$).

Nous voyons clairement la stabilité diminuer progressivement au fur et à mesure que l'on augmente ε .

4.4.4. Comportements périodiques

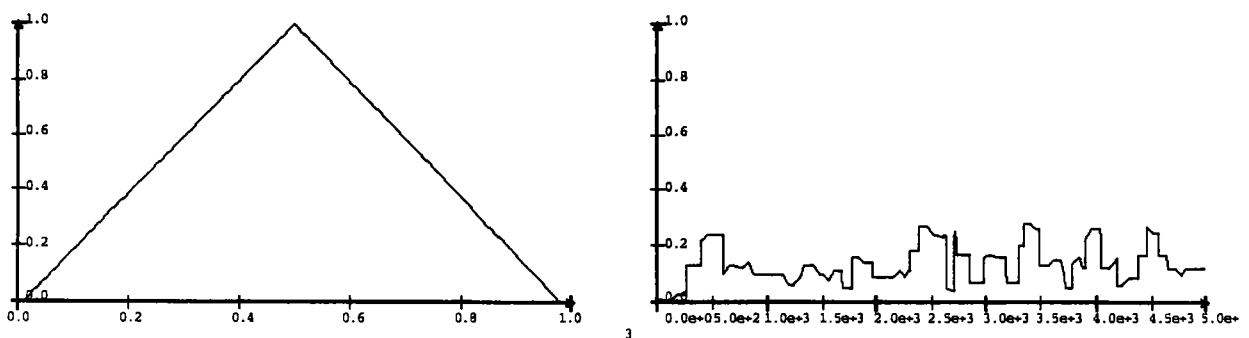


Figure IV.4.13. Modélisation de comportements pseudo-périodiques.

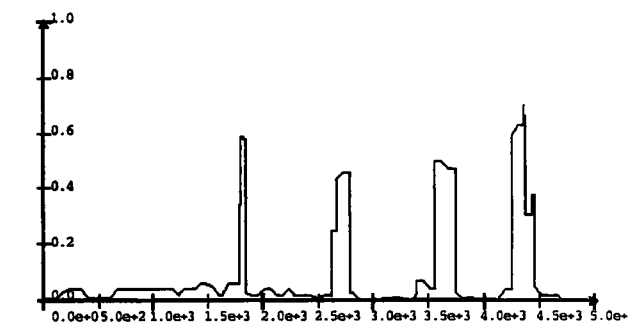
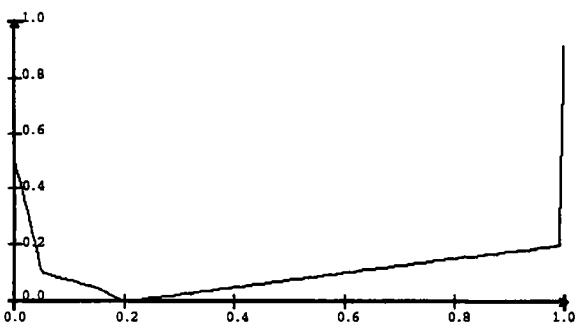
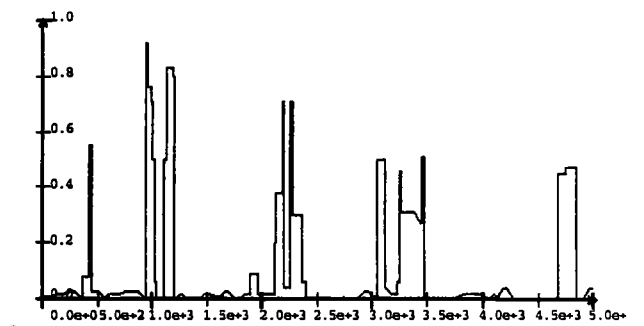
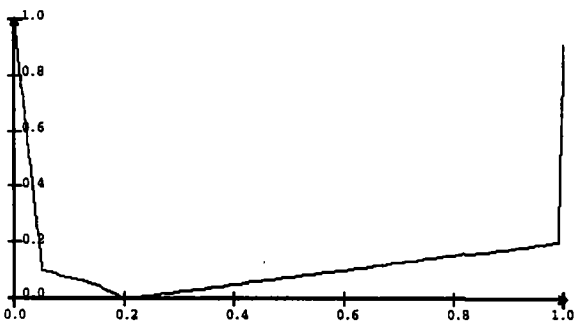
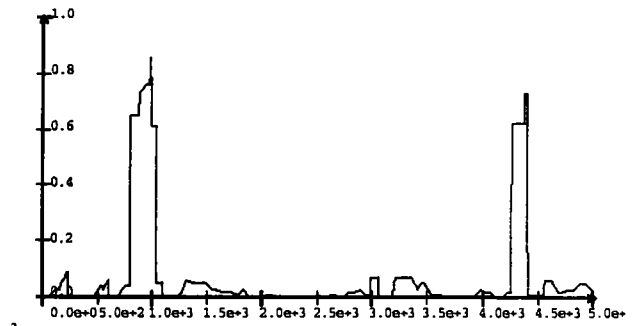
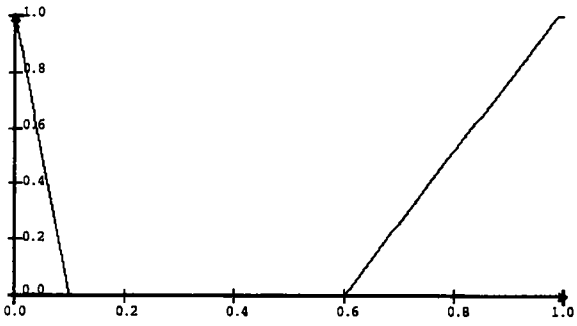
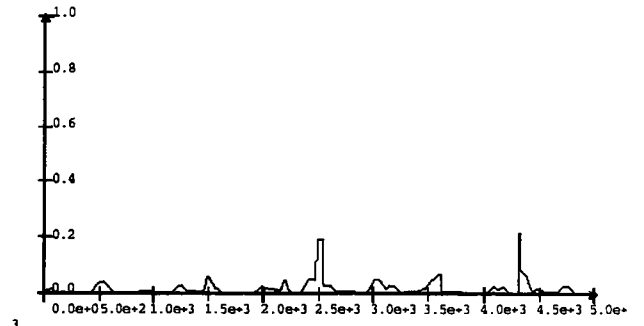
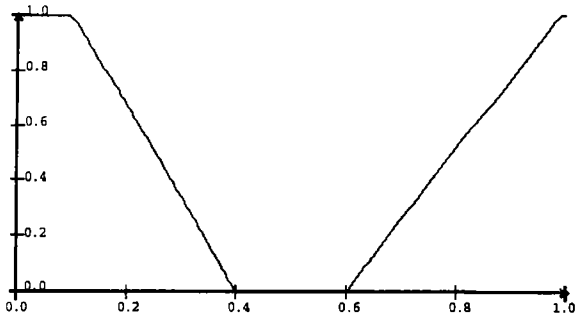
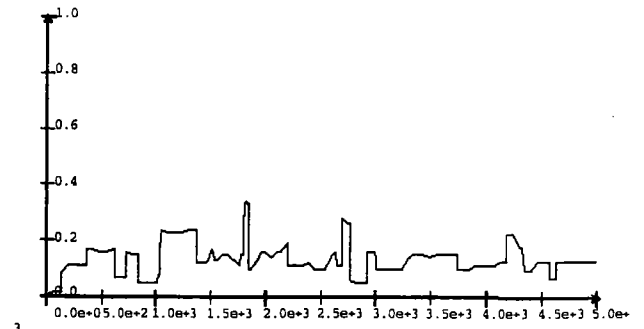
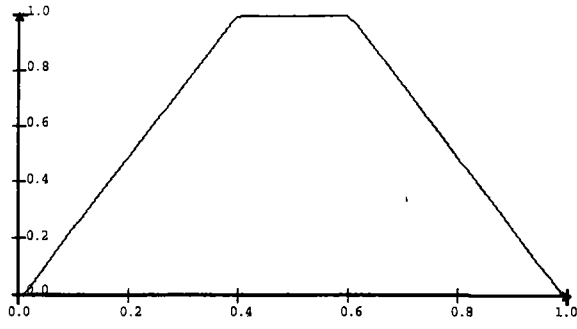


Figure IV.4.14. Modélisation de comportements périodiques.

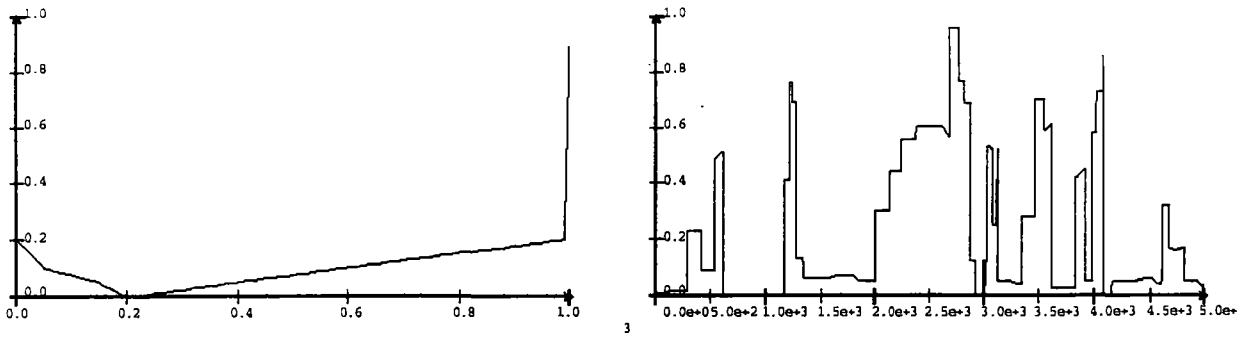


Figure IV.4.15. Modélisation de comportements périodiques.

4.4.5. Comparaison entre les courbes expérimentales et modélisées

Nous montrons aux figures IV.4.15 et 16 quelques comparaisons entre les courbes expérimentales et les représentations statistiques correspondantes.

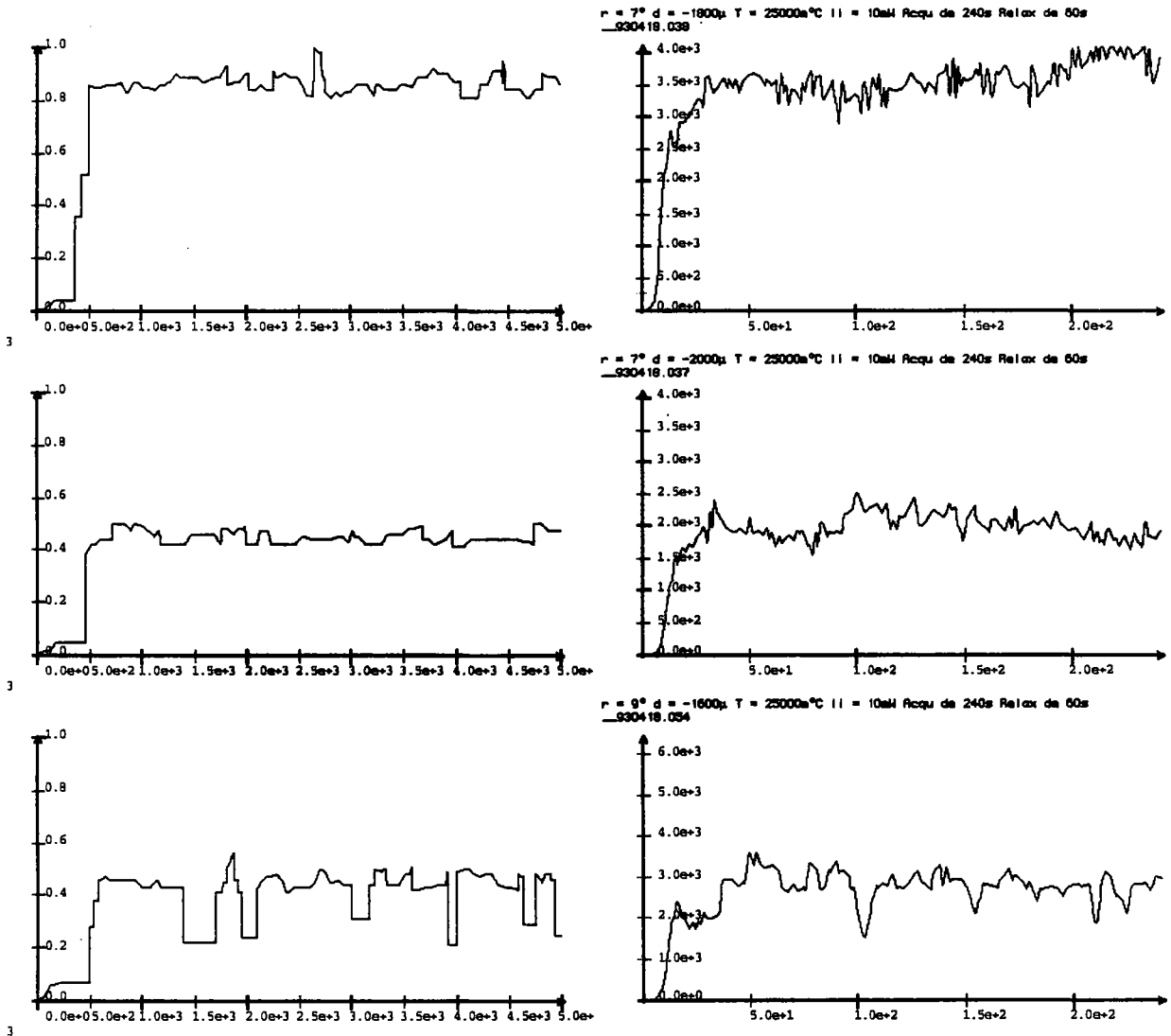


Figure IV.5.15. Comparaison entre le modèle et la courbe expérimentale

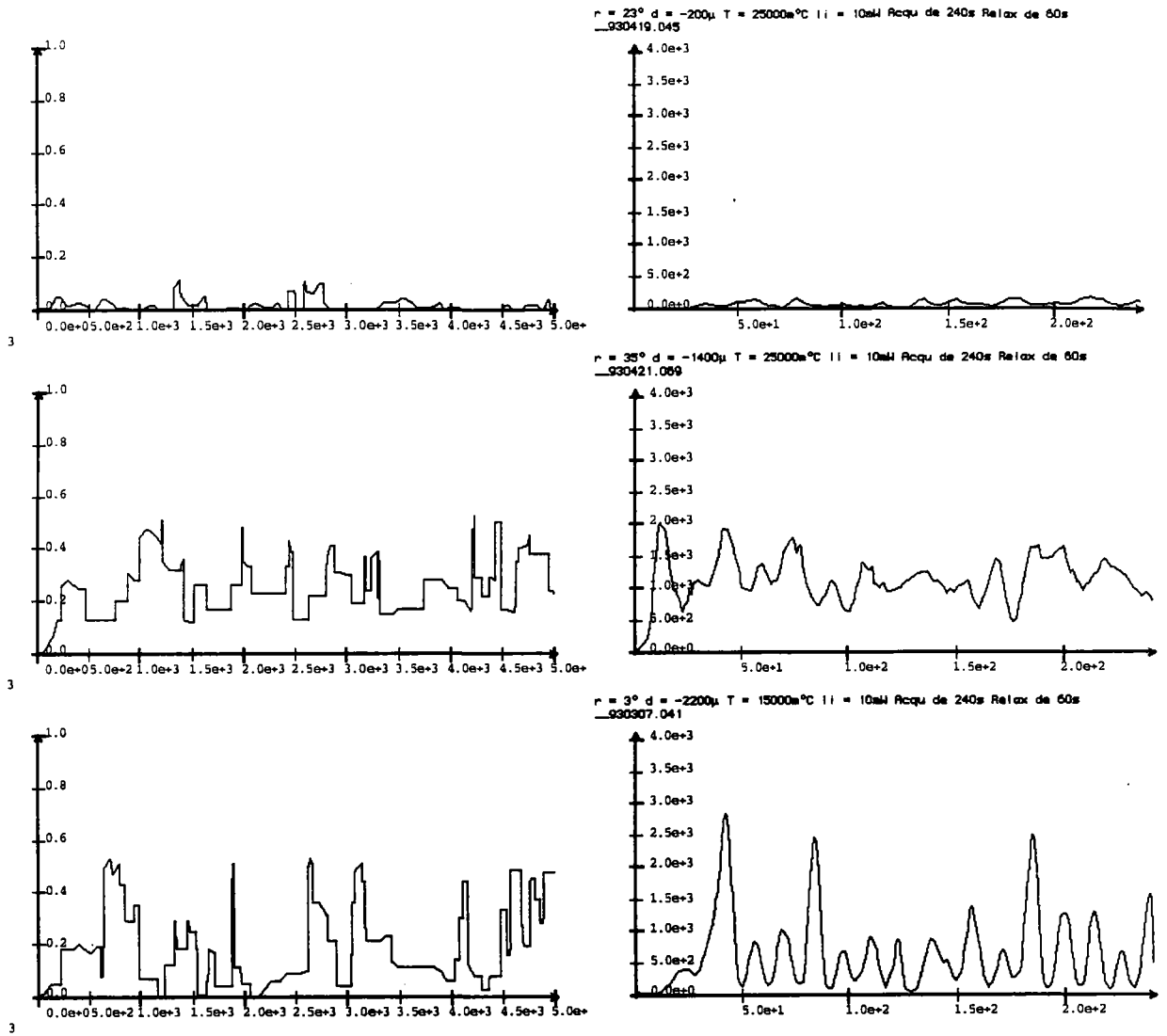


Figure IV.5.16. Comparaison entre le modèle et la courbe expérimentale.

4.5. Discussion sur le modèle statistique et la relation avec les processus physiques intervenant dans la conjugaison de phase

4.5.1. Comparaison entre les résultats expérimentaux et les réponses obtenues avec le modèle statistique

La série des résultats résumés sur les figures IV.5.15 et 16, mettant côte à côte des courbes temporelles expérimentales et modélisées, met clairement en évidence la capacité de notre modèle à décrire les différentes caractéristiques du comportement temporel du miroir :

- l'amorçage ainsi que le temps plus ou moins long pour l'obtenir
- une éventuelle montée en régime (décollage) plus ou moins rapide après cet amorçage
- une valeur moyenne de réflectivité plus ou moins élevée
- des fluctuations chaotiques autour de cette valeur moyenne plus ou moins amples et variables en fonction du temps

- un comportement de type pseudo-périodique avec amplitudes et pseudo-périodes plus ou moins importantes
- des possibilités de "décrochage brutal" et de réamorçage, parfois tout aussi rapide

Toutefois, nous n'avons, pour le moment, pas réussi à trouver la loi de probabilité permettant de modéliser un comportement réellement périodique, tel que celui mis en évidence dans les résultats expérimentaux des figures III.2.13 où sont représentées les évolutions du comportement oscillatoire en fonction de la température. Nous ne sommes pas en mesure de donner les contraintes à appliquer à notre modèle statistique pour pouvoir décrire ce type de comportement particulier¹.

4.5.2. Origines physiques du comportement temporel du miroir CAT

4.5.2.1. Remarques préliminaires

La mise en place de la conjugaison de phase autopompée que nous avons étudiée dans le présent travail peut trouver son origine, comme nous l'avons dit auparavant, dans plusieurs types de phénomènes physiques :

- un phénomène de mélange à quatre ondes photoréfractif [MCDONALD and FEINBERG 1983]
- une rétrodiffusion stimulée de type Brillouin, telle qu'elle apparaît dans le modèle de Lam [LAM 1985]
- l'installation de divers réseaux à l'intérieur de l'échantillon résultant de couplages multiples d'ondes [LAMBELET et al. 1994]

Deux remarques peuvent être faites à ce niveau :

- il ne faut pas exclure le fait que la conjugaison de phase résulte d'une superposition de ces différents phénomènes avec des poids relatifs variables avec le temps et dépendant largement des conditions initiales
- chaque phénomène physique pris individuellement est en lui-même assez complexe et peut se décomposer en une série de processus, de caractère destructif ou constructif selon le jeu des interactions et le couplage, dépendant eux-mêmes également du temps ainsi que des conditions expérimentales.

4.5.2.2. Le beam fanning et sa dépendance temporelle

Le beam fanning semble être reconnu de façon assez unanime comme étant une condition indispensable pour que ce type de miroir puisse fonctionner. Quelle que soit son origine :

¹ Les fonctions périodiques seraient-elles de mauvaises candidates pour être modélisées par des fonctions stochastiques ?

- diffusion de la lumière incidente sur les défauts [VORONOV et al 1980] [GU and YEH 1991-2]
- mélange à deux ondes entre le faisceau incident et le faisceau diffracté, soit sur une impureté, soit sur un réseau interne [VALLEY 1987]
- mélange à deux ondes multiple [SEGEV et al. 1990]
- défocalisation du faisceau incident par modification photoréfractive de l'indice de réfraction [FEINBERG 1982-1]

le phénomène de beam fanning comporte obligatoirement des constantes de temps caractéristiques, et qui sont évidemment fonction du processus physique en jeu. Des transitions et des oscillations entre ces différents processus peuvent d'ailleurs avoir lieu.

4.5.2.3. *Le mélange à quatre ondes et sa dépendance temporelle*

Si l'on admet que l'origine de la conjugaison de phase se situe dans un mélange à quatre ondes, la variable *temps* peut jouer un rôle à différents niveaux :

- **Dans le mélange à quatre ondes lui-même :**

en effet, comme cela a été mis en évidence par Belic et al. [BELIC et al. 1993], la conjugaison de phase photoréfractive impliquant une seule région d'interaction, mais plusieurs réseaux peut être instable et chaotique dans certaines régions de l'espace des paramètres du processus. L'instabilité provient de l'existence de plusieurs solutions pour les équations de propagation et donc de multi-stabilité dans le jeu des solutions.

Par ailleurs, il faut noter que chaque réseau ainsi créé possède ses caractéristiques temporelles propres avec ses constantes de temps caractéristiques.

Même dans l'hypothèse d'un seul réseau, un comportement soit erratique soit périodique n'est pas à exclure du fait de différentes compétitions possibles :

- entre le signal injecté et les oscillations propres du système
- la perte de l'accord de phase par simple déviation par rapport aux conditions de Bragg
- la perte, selon les conditions expérimentales, du déphasage angulaire de $\pi/2$ entre réseau d'illumination et réseau d'indice, condition indispensable pour un couplage à deux ondes efficace

- **Dans le mélange à quatre ondes à deux zones d'interactions (modèle de Feinberg et MacDonald) :**

Compte tenu de ce qui a été dit précédemment, chaque régime d'interaction peut avoir son comportement temporel propre. De plus, les mélanges à quatre ondes dans chacune des deux régions doivent présenter une certaine "cohérence" entre eux.

Les autres influences, notamment temporelles, qui nous semblent importantes sont les suivantes :

- les effets spatiaux, éventuellement dépendants du temps, tels que les réflexions multiples sur les faces du cristal, et fonction du fanning
- le comportement cohérent entre les deux régions d'interaction
- l'importance du fanning, avec ses constantes de temps propres sur tout le trajet optique et son influence sur les aspects spatiaux et la construction des réseaux
- l'influence des effets de polarisation et de dépolarisation des faisceaux lumineux
- la variation ou une éventuelle oscillation dans la longueur effective d'interaction de chaque région de mélange à quatre ondes
- la variation de la distribution de la puissance relative sur chacun des différents faisceaux à l'intérieur de l'échantillon
- l'influence de la puissance du laser sur le coefficient de couplage par l'intermédiaire du type de porteurs excités

4.5.2.4. Au delà du processus de mélange à quatre ondes

Comme cela a été mis en évidence par :

- Lam [LAM 1985],
- Chang [CHANG and HELLWARTH 1985] (qui ont montré la possibilité dans le titanate de baryum d'avoir de la rétrodiffusion stimulée)
- Lambelet [LAMBELET et al. 1994] (existence de réseaux par réflexion et par transmission)

la conjugaison de phase peut se construire dans certains cristaux sur la base d'autres phénomènes physiques que le mélange à quatre ondes. Il n'est aucunement à exclure que ce type de contributions puisse également intervenir dans notre cas.

Cette hypothèse a d'ailleurs été confortée par Wood et al. [WOOD et al. 1992], qui ont montré expérimentalement qu'il était possible de diminuer partiellement la réflectivité du miroir à conjugaison de phase par un éclairage latéral sur la zone d'entrée du cristal. Il est peu probable que cette zone contienne une des régions d'interaction du type Mac Donald.

Dans la mesure où le processus impliqué, et quel qu'il soit, nécessite ici aussi un certain temps pour s'établir, une dépendance temporelle est évidemment attendue.

4.5.3. Relation entre le modèle statistique et les phénomènes physiques

Compte tenu de la complexité de phénomènes physiques qui jouent un éventuel rôle au niveau du comportement temporel du miroir à conjugaison de phase d'une part, des interactions à la fois spatiales et temporelles entre ces différents phénomènes d'autre part, il n'est pas très simple de trouver une

justification physique rigoureuse du modèle statistique qui a pourtant le mérite de donner de bons résultats.

Dans la description du remplissage aléatoire du tableau, on pourrait néanmoins interpréter le bas de ce dernier comme représentant la mise en place des conditions initiales indispensables pour la réalisation de la conjugaison de phase (fanning, conditions géométriques...) ; la montée dans le tableau correspond à la cumulation des différents processus de conjugaison et l'amplification progressive du phénomène.

Un certain nombre d'interprétations, à notre avis pertinentes, peuvent être déduites du modèle :

- **la notion de temps d'amorçage du miroir**

Dans le modèle statistique, le miroir s'amorce à partir du moment où les premières cases du tableau se remplissent. L'influence se voit essentiellement sur la position du point M de la fonction de probabilité.

Cet effet peut se rapprocher de la nécessité d'avoir réalisé un jeu de conditions qui prennent "un certain temps" :

- fanning stable
- construction d'un ou plusieurs réseaux
- construction de deux zones d'interaction
- valeur seuil du paramètre $\gamma.l$ dépassée (en dessous de cette valeur seuil, la réflectivité, selon le modèle de Mac Donald, reste à zéro)

- **l'intensité de la valeur moyenne en régime permanent**

D'après le modèle statistique, cette valeur dépend fortement du point M car un glissement de M de 0 vers 1 entraîne une augmentation de R. Physiquement cela signifie que les différentes contributions participent de façon constructive, et donc cumulative, à la conjugaison de phase. L'augmentation de M peut être vue comme caractérisant :

- le caractère cumulatif (interférence constructive) des différentes interactions participant au processus physique
- l'optimisation interne de chaque interaction telle que le beam fanning, les réseaux pour le mélange à quatre ondes, la cohérence entre les deux régions d'interaction etc.
- l'amplification progressive du processus de conjugaison

- **les fluctuations importantes et les décrochements brutaux**

Statistiquement, ces effets sont conditionnés par le choix de δ et de ϵ . Cela signifie que le remplissage des cases du tableau s'opère à la probabilité croissante vers le haut, mais aussi étalé sur la quasi intégralité de ce dernier. La possibilité de pouvoir annuler la valeur d'une case, quelle que soit sa position, signifie alors un désamorçage brutal.

Du point de vue physique, cette opération pourrait correspondre à l'annihilation d'une des conditions, ou même d'un des processus mis en jeu dans la conjugaison : perte de l'accord de phase, effacement d'un réseau, saut entre deux solutions stables, etc.

4.5.4. Conclusion et perspectives

Nous avons pu montrer que notre modèle statistique était capable de fournir une fonction réponse en terme de réflectivité du miroir à conjugaison de phase CAT assez conforme à la dépendance temporelle que nous avons pu mettre en évidence sur des acquisitions expérimentales.

Évidemment, le modèle proposé est purement statistique et il est assez difficile :

- d'interpréter le sens physique de chaque case du tableau
- de corrélérer le remplissage aléatoire du tableau que nous proposons avec les processus photoréfractifs qui ont lieu à l'intérieur de l'échantillon.

Par ailleurs, dans l'état actuel du modèle, les conditions externes (comme par exemple la configuration géométrique, la puissance du faisceau laser, la dimension et les caractéristiques du cristal, etc.) ne sont pris en considération directement, elles n'interviennent que par l'intermédiaire de la définition de la loi de probabilité ; ce qui nous paraît un peu exclusif et limité.

Nous nous proposons de poursuivre ce travail initial en le confrontant à :

- des méthodes d'analyse dynamique de fluctuations irrégulières, mises au point sur ce type de réponses par le groupe de T. Tschudi [DENZ et al. 1990]
- l'analyse des instabilités faite par Belic et al. [BELIC et al. 1993], basée sur des réseaux multiples et la théorie de la bifurcation.

CHAPITRE V

VERS UN STANDARD DE CARACTÉRISATION DES MIROIRS A CONJUGAISON DE PHASE AUTOPOMPES PHOTORÉFRACTIFS

Nous présentons dans ce chapitre les potentialités de l'appareil, d'une part dans la version que nous avons développée au cours de cette thèse, mais également dans une version nettement plus ambitieuse permettant d'une part de tester d'autres configurations de couplage et d'autre part intégrant dans sa partie logicielle des modèles physiques. Nous pensons que cet outil peut être à la base d'un standard de caractérisation du comportement des miroirs et peut-être même de caractérisation des échantillons photoréfractifs en tant que tels.

*Si les fleurs le long des routes
Se mettaient à marcher,
C'est à la Margot sans doute
Qu'elles feraient songer*

Georges BRASSENS

1. Les objectifs et les potentialités de l' ICAMCAT

L'ICAMCAT, Instrument de Caractérisation Automatique de Miroirs CAT, mis au point au cours de cette thèse, permet non seulement d'établir des cartographies complètes du comportement des différents échantillons testés, mais peut être utilisé aussi pour comparer les performances de différentes géométries de montages (CAT et dérivés). A ce titre, il est capable de trouver, de façon automatique, pour un échantillon et une géométrie de montage donnés, et compte tenu d'un critère de qualité préalablement défini, les conditions optimales d'utilisation conduisant à la meilleure réflectivité.

1.1. Caractérisation systématique et automatique

1.1.1. Caractérisation des échantillons

La caractérisation des échantillons est une étape indispensable pour la connaissance fine des phénomènes mis en jeu dans le processus de conjugaison de phase autopompée dans les miroirs CAT. Nous avons testé, à titre d'illustration deux échantillons de titanate de baryum de géométries et d'origines différentes. Mais il est bien clair qu'il serait très instructif d'appliquer à un grand nombre d'échantillons différents, de proportions et de dimensions variées, de dopages différents, de manière à disposer de bases de données complètes. De plus, d'autres cristaux (SBN, KNSBN, KNbO₃ etc..) peuvent être étudiés de la même manière par notre appareil.

Par ailleurs, il est important de noter que l'on peut aisément mener des études de répétabilité, critère très important si l'on veut passer de la curiosité de laboratoire au dispositif industriel.

En outre, en changeant (ou accordant) simplement la source (et au besoin le détecteur) il est possible d'étudier la réponse des échantillons à d'autres longueurs d'ondes.

Enfin il est possible également de jouer sur d'autres paramètres physiques tels que : largeur du faisceau incident, polarisation, température de l'échantillon, faisceau d'effacement etc. afin de déterminer leur influence respective sur la réflectivité.

1.1.2. Comparer des géométries de montages

La configuration qui a fait l'objet de cette étude est celle du miroir à conjugaison de phase autopompé de type CAT, du fait de la variété de son comportement. Cependant il peut être très intéressant d'appliquer le même type de caractérisation systématique à des configurations dérivant de cette dernière : en particulier pour les montages conduisant à des réseaux par réflexion dans la

zone d'entrée du cristal et que l'on trouve dans la littérature sous l'appellation "Stimulated Back Scattering [WHITTEN and RAMSEY 1984][MULLEN et al.] [CHANG and HELLWARTH 1985] ainsi que pour les montages mettant en œuvre des cristaux taillés sous forme de prismes tels que l'on a connaissance des réseaux par transmission qui s'inscrivent à l'intérieur de l'échantillon [SKUNOV et al. dans KNbO₃ en 1992] [HE et al. 1994] [HONDA and MATSUMOTO 1994]. Dans ce dernier cas, il est alors possible de remonter à des constantes physiques de l'échantillon.

1.1.3. Obtenir des cartographies

Une cartographie d'un cristal signifie, dans ce contexte, une représentation 3D d'un critère de qualité de l'onde conjuguée en fonction de deux paramètres physiques. Par exemple, il est possible d'obtenir, de manière automatisée, le temps de réponse d'un cristal en fonction de l'angle d'incidence et de la position transversale du point d'incidence sur le cristal.

1.1.4. Tester de nouveaux modèles physiques

Un de nos objectifs initiaux est de comprendre ce qui peut se passer à l'intérieur d'un cristal lorsqu'il se comporte en miroir autopompé. Nous avons montré dans le chapitre IV comment l'appareil que nous proposons permet de mettre au point des modèles physiques. Nous avons développé à titre d'exemple un modèle améliorant celui de MacDonald et Feinberg en lui ajoutant une distribution continue de fanning. Mais d'autres modèles peuvent être imaginés et testés de la même manière. De plus, par rapport à un modèle donné, il est possible, par l'expérimentation systématique, de déterminer des paramètres internes (par exemple la longueur effective d'interaction dans chaque zone de mélange à quatre ondes, dans le cas du modèle de Feinberg et MacDonald) inaccessibles par ailleurs.

1.2. Autres potentialités de l'ICAMCAT

Nous nous proposons d'aller plus loin dans l'utilisation possible de l'appareil :

- tester la qualité de l'onde conjuguée elle-même
- analyser d'autres types de mélanges d'ondes comme le mélange à deux ondes
- le mettre à la disposition des fabricants de cristaux pour un contrôle de production
- établir un standard dans la caractérisation des photoréfractifs.

1.2.1. Contrôler la qualité de l'onde conjuguée en fonction de la puissance de l'aberration

L'appareil proposé ne détecte pour l'instant que l'intensité totale de l'onde conjuguée, mais il est tout à fait envisageable de faire une acquisition numérique par l'intermédiaire d'une barrette CCD et de caractériser la qualité de la conjugaison de phase en termes non plus de stabilité, de réflectivité ni même de temps de réponse mais en termes de Fonction de Transfert Optique, c'est à dire de sa capacité à restaurer de hautes fréquences spatiales après (double) passage à travers des systèmes fortement aberrants au niveau de la phase. De plus un interféromètre de Michelson permet de détecter des variations de phase ou de fréquence entre l'onde conjuguée et l'onde incidente.

1.2.2. Tendre vers un contrôle systématique des échantillons à la production

Nous proposons de mettre cet appareil à la disposition des "croiseurs" de cristaux, pour qui un test systématique à la production de chaque échantillon permettrait d'une part de s'orienter vers une production plus reproductible et d'autre part vers l'établissement de bases de données contenant les valeurs de différents paramètres photoréfractifs. La configuration CAT ou variante pourrait être appliquée à des cristaux de titanate de baryum (pur ou dopé au cobalt), de SBN60 (pur dopé au cérium), SBN75:Ce, BSKNN:Ce, niobate de potassium (pur ou dopé au fer) KNSBN (pur ou dopé au cobalt). Les matériaux semiconducteurs qui ont des propriétés photoréfractives peuvent aussi être soumis au même régime (avec une source infrarouge).

Il peut être extrêmement utile, enfin, de pouvoir caractériser de manière volumique des cristaux de très grande taille (par exemple des échantillons de titanate de baryum de 20x20mm).

2. Vers un standard de caractérisation systématique des miroirs à conjugaison de phase autopompés photoréfractifs

Au delà de la possibilité de tester et d'optimiser les miroirs à conjugaison de phase de type CAT (et variantes), nous pensons que l'ICAMCAT - assorti de procédures d'utilisation adéquates - peut être à la base de l'établissement d'un

standard de caractérisation des cristaux photoréfractifs en tant que tels. Le but de cette caractérisation serait de créer des bases de données fiables et complètes de manière à répertorier les paramètres physiques des échantillons, en particulier ceux obtenus par calcul à partir de résultats expérimentaux et de modèles physiques que l'on pourrait ainsi valider - ou invalider -. Il est clair que les résultats obtenus sur les comportements des miroirs à conjugaison de phase en eux-mêmes, dans leur diversité, et sur les mélanges d'ondes de manière plus générale, constituent également des renseignements intéressants en soi.

2.1. Description des différentes versions de l'ICAMCAT

Nous proposons trois versions de notre appareil, de la plus dépouillée (version 1) à la plus sophistiquée (version 3). Chacune d'entre elles répond au même souci scientifique de mener des expériences systématiques permettant de remonter aux mécanismes physiques de la conjugaison de phase dans les miroirs CAT, mais avec des ambitions différentes : la version 3 permet également de tester d'autres configurations.

La version 1

Il s'agit d'une version économique, permettant avec un minimum de matériel et par suite un coût réduit, de mettre en œuvre le concept exposé ci-dessus. Il s'agit de la configuration de base, décrite à la figure V.2.1.

Cette configuration devrait intéresser non seulement les fabricants de cristaux photoréfractifs mais également les institutions d'Enseignement Supérieur qui disposeraient ainsi d'une maquette dont elles pourraient utiliser les indéniables qualités didactiques, à la fois pour des mesures expérimentales et pour des expériences démonstratives pour illustrer un cours dans le domaine de l'optique non-linéaire et de la photoréfractivité.

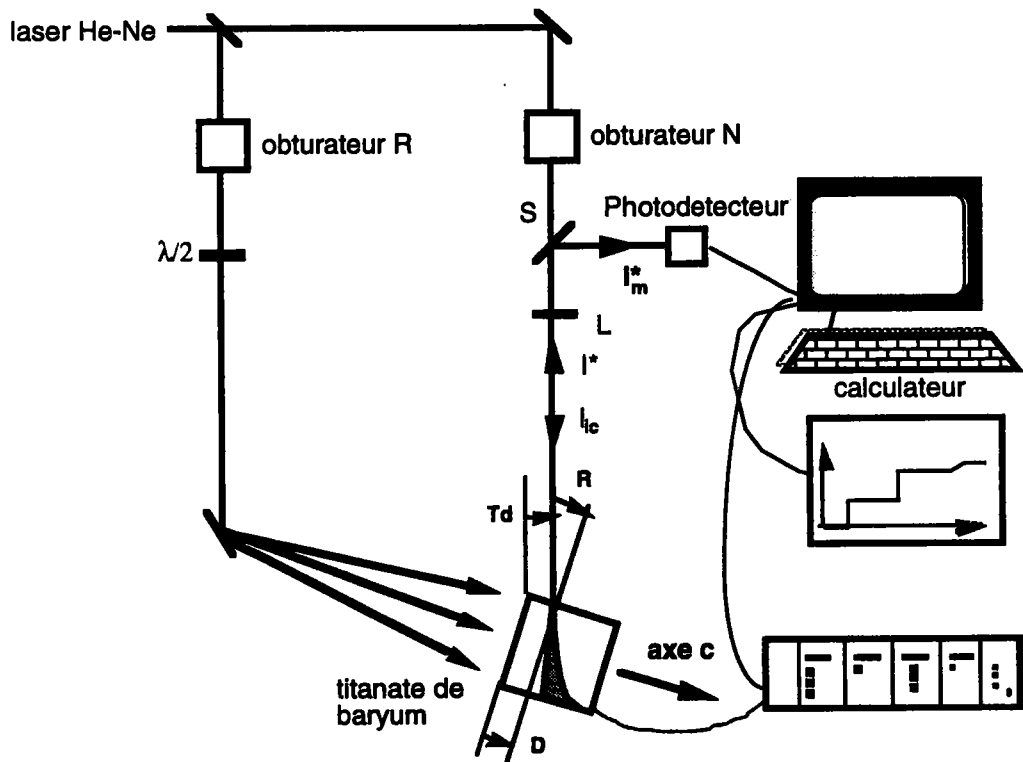


Figure V.2.1. Vue générale de la version 1 de l'ICAMCAT, montrant la source, le porte-échantillon, les éléments motorisés et le système d'acquisition.

La source optique

La version de base est équipée d'un laser Hélium Néon polarisé d'une puissance de quelques milliwatts.

Les éléments optiques

La polarisation extraordinaire que l'onde incidente doit avoir dans l'échantillon est obtenue en tournant le laser sur lui-même. La puissance de la source n'est pas réglable. Une lame séparatrice suivie d'une lame demi-onde permettent d'obtenir un faisceau d'effacement en polarisation croisée.

Le support de cristal

Un support simplifié est constitué d'un simple plateau tournant (cf le nouveau porte-échantillon de Newport R.C.) permettant de régler la normale à la face d'entrée du cristal dans l'axe du faisceau incident (réglage du zéro de l'angle d'incidence). Aucun réglage de basculement du support de l'échantillon n'est prévu car le support du laser réglable donne le degré de liberté nécessaire.

Le cristal de démonstration

Les ICAMCAT en version 1 et servant de maquettes démonstratives seront équipés d'un cristal de titanate de baryum.

Les tables motorisées

Deux tables MicroControle, UT100 et UR100, munies d'un moteur pas à pas, permettent respectivement de piloter la position transversale du point d'incidence et l'angle d'incidence. Un boîtier TL78S MicroControle contient l'électronique de puissance et un interface GPIB.

L'acquisition

Un détecteur de type photodiode SIEMENS du type SFH 202 est relié à un boîtier contenant un convertisseur courant/tension suivi d'un échantillonneur bloqueur réalisé spécifiquement pour cette application. Le signal arrivera à l'ordinateur par l'intermédiaire d'une carte d'entrée/sortie (voir plus loin).

Les obturateurs

Deux obturateurs permettent de couper alternativement le faisceau d'écriture et le faisceau d'effacement. La conception et la réalisation tant de la partie mécanique, à base de moteurs pas à pas, que de la partie électronique de commande sont spécifiques à l'application. L'ensemble est relié à l'ordinateur par l'intermédiaire de la carte d'entrée sortie (voir plus loin).

L'ordinateur

L'ensemble peut être piloté indifféremment par un PC ou un MacIntosh. De nombreux modèles conviennent ; en ce qui concerne la version pour PC, choisir un modèle muni d'un microprocesseur du type 80286, 386 ou 486 travaillant sous DOS (ou Windows de base) ; en ce qui concerne la version MacIntosh,

prévoir un modèle muni d'un système 7 et pouvant être muni de cartes additionnelles.

Les cartes à insérer

Il convient d'installer au préalable les cartes suivantes et de suivre la procédure d'installation préconisée par le fabricant :

Pour la version PC, une carte IND4 (MicroContrôle) assure le pilotage du boîtier TL78S ; et une carte DT2801 (Data Translation) gère les entrées/sorties (acquisitions + obturateurs).

Pour la version MacIntosh, une carte d'interface GPIB gère le pilotage du TL78S alors qu'une carte d'entrées/sorties National Instrument gère l'acquisition et les obturateurs.

Le logiciel et l'utilisation

Le logiciel est fourni sur une disquette ; il dépend du type d'ordinateur que l'on désire utiliser : pour PC, on choisira la disquette CRYSTAL v2.1 et pour MacIntosh la disquette CRYSTALMAC v2.5. L'installation des logiciels est standard et ne requiert aucune compétence particulière, de plus l'initialisation est complètement automatique.

Les logiciels permettent de décrire la séquence des mesures à effectuer sur l'échantillon. On peut le faire soit directement au clavier, soit à l'aide d'un fichier de configuration, de type texte (un fichier de démonstration est fourni, il sert de paradigme).

La version CRYSTALMAC est plus sophistiquée ; elle gère en particulier les arrêts d'urgence d'une manière plus rapide, coupe le faisceau incident immédiatement ; dans tous les cas, la gestion de la reprise des mesures après arrêt (d'urgence ou non) est assurée. La version CRYSTALMAC permet également de tracer les résultats (tableaux, courbes, etc...) de mesure en temps réel et permet à l'ordinateur de fonctionner en "multitâche". Il est donc possible de travailler sur l'ordinateur, d'exploiter les résultats avec un logiciel de traitement de texte au fur et à mesure qu'ils arrivent par exemple, tout en ayant l'assurance que les acquisitions gérées en même temps par ce même ordinateur se font avec un parfait synchronisme.

La version 2

Il s'agit en fait de la version que nous avons développée pour cette thèse. Elle est représentée sur la figure V.2.2.

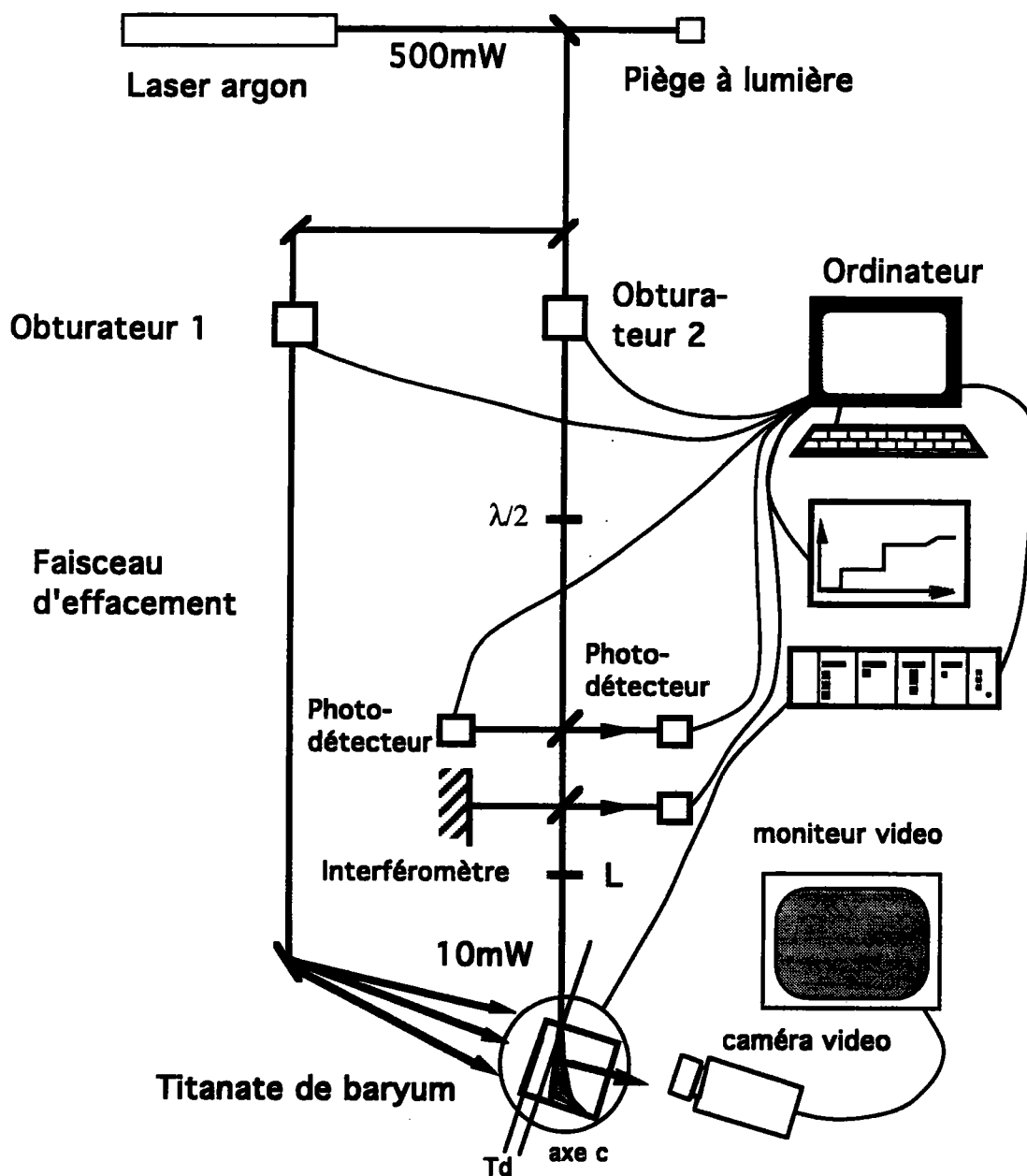


Figure V.2.2. Vue générale de la version 2 de l'ICAMCAT.

La source optique

La version 2 est équipée d'un laser Argon Coherent Innova200 (ou équivalent) muni d'un Fabry-Perot, polarisé et d'une puissance pouvant atteindre quelques watts en monomode longitudinal et transversal.

Les éléments optiques

La polarisation extraordinaire que l'onde incidente doit avoir dans l'échantillon est obtenue par une lame quart d'onde motorisée (dans le but de pouvoir étudier l'influence de la polarisation du faisceau incident). La puissance du laser est réglable ; il est possible à priori de la piloter à distance par l'ordinateur à l'aide d'une liaison RS232. Toutefois, l'asservissement en puissance de notre laser étant mal conçu, toute consigne visant à modifier la puissance du laser entraîne un éclair dû à une pointe de courant (d'environ 50 ampères ou plus), la puissance se stabilisant ensuite à la valeur désirée. Outre le danger potentiel de ce genre d'incident (surtout lorsqu'il est inattendu) pour l'utilisateur, il y a risque d'endommagement du cristal.

Une lame séparatrice suivie d'une lame demi-onde permettent d'obtenir un faisceau d'effacement en polarisation croisée.

Un jeu de lentilles, de différentes focales, permet d'obtenir des waists de tailles différentes à l'entrée du cristal.

Le support de cristal

Un support étudié et réalisé spécifiquement pour cet appareil (technologie "MarioControle") est constitué d'un porte échantillon régulé en température (PT100 + cellule Peltier) monté sur un PO40 (support de prisme MicroControle donnant trois degrés de liberté en rotation) permettant de régler la normale à la face d'entrée du cristal dans l'axe du faisceau incident (réglage du zéro de l'angle d'incidence).

Les tables motorisées

Le support d'échantillon est lui-même monté sur trois tables MicroControle : 2 tables UT100 et 1 table UR100 munies d'un moteur pas à pas permettant respectivement de piloter la position transversale et l'"altitude" du point d'incidence ainsi que l'angle d'incidence. Une autre table de rotation UR100 motorisée permet de piloter, par le biais d'une lame quart d'onde, la polarisation du faisceau incident. Un boîtier TL78S MicroControle contient l'électronique de puissance et une interface GPIB.

L' acquisition

On peut installer soit un détecteur de type photodiode SIEMENS du type SFH 202, ou alors un détecteur UDT, de diamètre plus large ; il est relié à un boîtier contenant un convertisseur courant/tension suivi d'un échantillonneur bloqueur réalisé spécifiquement pour cette application. Le signal arrivera à l'ordinateur par l'intermédiaire d'une carte d'entrée/sortie (voir plus loin).

Les obturateurs

Deux obturateurs permettent de couper alternativement le faisceau d'écriture et le faisceau d'effacement. La conception et la réalisation tant de la partie mécanique, à base de moteurs pas à pas, que de la partie électronique de commande sont spécifiques à l'application. L'ensemble est relié à l'ordinateur par l'intermédiaire de la carte d'entrée sortie (voir plus loin).

L'ordinateur

L'ensemble peut être piloté indifféremment par un PC ou un MacIntosh. Toutefois nous recommandons l'utilisation d'un MacIntosh Quadra muni d'un système 7. La version pour PC n'a pas été mise à jour depuis un an, tandis que la version pour Mac est une version qui évolue et qui bénéficie de mises à jour constantes. De plus, elle s'intègre dans l'environnement Mac et dialogue avec d'autres applications en temps réel (tracé des courbes avec le logiciel TraceCourbes, etc...).

Les cartes à insérer

Il convient d'installer au préalable les cartes suivantes et de suivre la procédure d'installation préconisée par le fabricant :

Pour la version PC, une carte IND4 (MicroContrôle) assure le pilotage du boîtier TL78S ; et une carte DT2801 (Data Translation) gère les entrées/sorties (acquisitions + obturateurs).

Pour la version MacIntosh, une carte d'interface GPIB gère le pilotage du TL78S alors qu'une carte d'entrées/sorties National Instrument gère l'acquisition et les obturateurs.

Le logiciel et l'utilisation

Le logiciel est fourni sur une disquette ; il dépend du type d'ordinateur que l'on désire utiliser : pour PC, on choisira la disquette CRYSTAL v2.1 et pour MacIntosh la disquette CRYSTALMAC v2.5. L'installation des logiciels est standard et ne requiert aucune compétence particulière, de plus l'initialisation est complètement automatique.

Les logiciels permettent de décrire la séquence des mesures à effectuer sur l'échantillon. On peut le faire soit directement au clavier, soit à l'aide d'un fichier de configuration, de type texte (un fichier de démonstration est fourni, il sert de paradigme).

La version CRYSTALMAC est plus sophistiquée ; elle gère en particulier les arrêts d'urgence d'une manière plus rapide, coupe le faisceau incident immédiatement ; dans tous les cas, la gestion de la reprise des mesures après arrêt (d'urgence ou non) est assurée. La version CRYSTALMAC permet également de tracer les résultats (tableaux, courbes, etc...) de mesure en temps

réel et permet à l'ordinateur de fonctionner en "multitâche". Il est donc possible de travailler sur l'ordinateur, d'exploiter les résultats avec un logiciel de traitement de texte au fur et à mesure qu'ils arrivent par exemple, tout en ayant l'assurance que les acquisitions gérées en même temps par ce même ordinateur se font avec un parfait synchronisme.

La video de surveillance

Une caméra video, munie d'un objectif macro, située au dessus de l'échantillon permet de visualiser le beam fanning ainsi que l'activité optique à l'intérieur du cristal. La MacIntosh étant muni d'une carte video, il est possible de faire des acquisitions d'images, en particulier pour montrer les boucles de lumière qui se forment dans le cristal.

L'interféromètre

La version que nous avons développée pour cette thèse est également munie d'un interféromètre de Michelson. Il a permis entre autres de mettre en évidence un déphasage croissant (ou variation de fréquence) au moment où l'intensité de l'onde conjuguée chute.

La version 3

Il s'agit d'une évolution de la version 2, permettant l'aboutissement du concept. Tout ce qui est décrit ci-dessous n'est pas encore (totalement) implémenté ; il est prévu non seulement d'utiliser d'autres sources lumineuses, mais encore d'intégrer au logiciel des bibliothèques de modèles physiques (effet photoréfractif, mélange d'ondes, miroir CAT version MacDonad-Feinberg avec extension à une distribution de fanning), susceptibles d'être testés pour déterminer s'ils permettent de modéliser plus ou moins correctement l'échantillon étudié.

De plus, cette version, équipée de l'appareillage adéquat, permet d'étudier les phénomènes de mélange à deux ondes. On sait en effet que, par exemple, le mélange à deux ondes, à partir de la mesure du gain en fonction du pas du réseau d'indice inscrit, permet de remonter par calcul à des grandeurs telles que la densité effective de pièges [GUNTER and HUIGNARD 1988]. Un ajustement automatique des paramètres permettrait de trouver la valeur de k_0 qui fait coïncider les courbes théoriques et expérimentales donnant $\Gamma(\lambda)$.

On pourrait aussi détecter les configurations optimales (c'est à dire donnant le gain maximal) en fonction de paramètres géométriques tels que l'orientation des faisceaux par rapport aux axes cristallins de l'échantillon.

L'étude du gain (et de son signe) en fonction de la puissance incidente est également de toute première importance pour étudier la compétition électrons/trous et déterminer si le mécanisme de photoconduction est dominé par les trous ou par les électrons. Dans le titanate de baryum par exemple, la photoconduction est dominée par les trous pour les faibles puissances et par les électrons pour les fortes puissances. Le changement de signe du gain se situe à une puissance qui semble être très variable d'un échantillon à l'autre : $1\text{MW}/\text{cm}^2$ [MAGER 1994], de 14 à $36\text{MW}/\text{cm}^2$ [DAMZEN and BARRY 1993]. Une étude systématique sur un grand nombre d'échantillons pourrait certainement présenter un grand intérêt.

La source optique

La version 3 est équipée soit d'un laser Argon, soit d'un laser YAG pompé par diode, doublé ou non. L'intérêt de ce dispositif est de pouvoir disposer d'un faisceau dont la position transversale est parfaitement déterminée par la cavité, alors que l'on constate en général un léger décalage transversal du faisceau de l'argon lorsqu'on l'éteint et on le rallume ; ce qui peut être gênant pour la continuité d'une expérience qui a lieu sur plusieurs jours. Le YAG travaille aussi en régime pulsé ; on pourrait soit synchroniser les impulsions avec l'échantillonnage de l'acquisition pour faire une étude sur une longue durée, ou

soit faire une étude sur une impulsion. Par ailleurs, il serait intéressant d'utiliser un laser pompant un titane saphir.

Les éléments optiques

Un isolateur optique permet d'éviter tout retour de lumière dans la cavité laser. On sait bien en effet qu'une rétrodiffusion peut jouer le rôle d'une surcavité et perturber ainsi le laser.

La polarisation extraordinaire que l'onde incidente doit avoir dans l'échantillon est obtenue par une lame quart d'onde motorisée (dans le but de pouvoir étudier l'influence de la polarisation du faisceau incident).

La puissance du laser, le déclenchement, sont a priori pilotables par ordinateur. Une lame séparatrice suivie d'une lame demi-onde permettent d'obtenir un faisceau d'effacement en polarisation croisée.

Un jeu de lentilles, de différentes focales, permet d'obtenir des waists de tailles différentes à l'entrée du cristal.

Le support de cristal

Un support étudié et réalisé spécifiquement pour cet appareil (*MarioControle*) est constitué d'un porte échantillon réglé en température (PT100 + cellule Peltier) monté sur un PO40 (support de prisme *MicroControle* donnant trois degrés de liberté en rotation) permettant de régler la normale à la face d'entrée du cristal dans l'axe du faisceau incident (réglage du zéro de l'angle d'incidence).

Les tables motorisées

Le support d'échantillon est lui-même monté sur trois tables *MicroControle* : 2 tables UT100 et 1 table UR100 munies d'un moteur pas à pas permettant respectivement de piloter la position transversale et l'"altitude" du point d'incidence (au 10000^{ème} de mm) ainsi que l'angle d'incidence (au 100^{ème} de degré). Une autre table de rotation UR100 motorisée permet de piloter, par le biais d'une lame quart d'onde, la polarisation du faisceau incident. Un boîtier TL78S *MicroControle* contient l'électronique de puissance et une interface GPIB.

L' acquisition

On peut installer soit un détecteur de type photodiode SIEMENS du type SFH 202, ou alors un détecteur UDT, de diamètre plus large ; il est relié à un boîtier contenant un convertisseur courant/tension suivi d'un échantillonneur bloqueur réalisé spécifiquement pour cette application. Le signal arrivera à l'ordinateur par l'intermédiaire d'une carte d'entrée/sortie (voir plus loin).

Les obturateurs

Deux obturateurs permettent de couper alternativement le faisceau d'écriture et

le faisceau d'effacement. La conception et la réalisation tant de la partie mécanique, à base de moteurs pas à pas, que de la partie électronique de commande sont spécifiques à l'application. L'ensemble est relié à l'ordinateur par l'intermédiaire de la carte d'entrée sortie (voir plus loin).

L'ordinateur

L'ensemble sera piloté par un MacIntosh muni d'un système 7. Une version sera développée pour des MacIntosh munis d'un microprocesseur PowerPC.

Les cartes à insérer

Il convient d'installer au préalable les cartes suivantes et de suivre la procédure d'installation préconisée par le fabricant :

Pour la version PC, une carte IND4 (MicroContrôle) assure le pilotage du boîtier TL78S ; et une carte DT2801 (Data Translation) gère les entrées/sorties (acquisitions + obturateurs).

Pour la version MacIntosh, une carte d'interface GPIB gère le pilotage du TL78S alors qu'une carte d'entrées/sorties National Instrument gère l'acquisition et les obturateurs.

Le logiciel et l'utilisation

Le logiciel est fourni sur une disquette ; il dépend du type d'ordinateur que l'on désire utiliser : pour PC, on choisira la disquette CRYSTAL v3.1 et pour MacIntosh la disquette CRYSTALMAC v3.1. L'installation des logiciels est standard et ne requiert aucune compétence particulière, de plus l'initialisation est complètement automatique.

Les logiciels permettent de décrire la séquence des mesures à effectuer sur l'échantillon. On peut le faire soit directement au clavier, soit à l'aide d'un fichier de configuration, de type texte (un fichier de démonstration est fourni, il sert de paradigme). Les logiciels gèrent tous les deux les arrêts d'urgence d'une manière plus rapide et coupent le faisceau incident immédiatement ; dans tous les cas, la gestion de la reprise des mesures après arrêt (d'urgence ou non) est assurée. La version CRYSTALMAC permet également de tracer les résultats (tableaux, courbes, etc...) de mesure en temps réel et permet à l'ordinateur de fonctionner en "multitâche". Il est donc possible de travailler sur l'ordinateur, d'exploiter les résultats avec un logiciel de traitement de texte au fur et à mesure qu'ils arrivent par exemple, tout en ayant l'assurance que les acquisitions gérées en même temps par ce même ordinateur se font avec un parfait synchronisme. Le même genre d'environnement peut être envisagé sur PC avec une version évoluée de Windows.

La grosse différence entre la version 3 et la version 2 réside dans le fait que la version 3 contiendra en standard des modèles de comportements physiques, dont il sera possible de déterminer les paramètres en fonction de l'échantillon étudié. Il sera de plus possible d'intégrer ses propres modèles afin de les tester et

de les valider -ou non-.

La video de surveillance

Une caméra video, munie d'un objectif macro, située au dessus de l'échantillon permet de visualiser le beam fanning ainsi que l'activité optique à l'intérieur du cristal. Le MacIntosh étant muni d'une carte video, il est possible de faire des acquisitions d'images, en particulier pour montrer les boucles de lumière qui se forment dans le cristal.

L'interféromètre

Cette version pourra également être munie d'un interféromètre de Michelson pour faire interférer l'onde incidente et l'onde conjuguée.

CONCLUSION

*Ecrire, c'est une façon de parler
sans être interrompu.*

Jules RENARD

Comme nous l'avons signalé au début de ce mémoire, notre travail a été effectué dans le cadre d'une étroite collaboration entre le Service Électronique de Supélec et le groupe Matériaux Optiques à Propriétés Spécifiques du Centre Lorrain d'Optique et d'Électronique des Solides (Université de Metz).

C'est pourquoi il présente les deux aspects, complémentaires, que peut recouvrir la recherche : l'ingénierie instrumentale d'une part, permettant de créer des instruments performants, et d'autre part l'utilisation de l'instrument pour l'observation des phénomènes physiques et la modélisation.

Après avoir rappelé les différentes manières d'obtenir optiquement une onde conjuguée, nous nous sommes plus particulièrement intéressés au miroir photoréfractif autopompé de type CAT.

La grande diversité des comportements temporels observés avec ce type de dispositif, ainsi que le contraste entre la relative facilité de sa mise en œuvre et la grande difficulté à en expliquer le fonctionnement interne nous ont conduit à entreprendre une étude portant sur l'évolution temporelle de l'onde conjuguée obtenue à l'aide du miroir CAT.

Nous avons donc, pour ce faire, créé un banc de mesure automatisé permettant d'acquérir l'onde conjuguée en fonction du temps, en ayant la maîtrise des paramètres physiques pertinents. Nous avons essentiellement orienté notre travail vers l'étude de l'influence de la température, de l'angle d'incidence et de la position transversale du point d'incidence.

Nous avons créé un logiciel permettant de déterminer les conditions expérimentales optimales d'utilisation du miroir, en fonction d'un critère de qualité donné. Nous avons particulièrement insisté sur la subjectivité du choix d'un tel critère : le bon choix ne peut en effet se faire sans connaître l'application finale du miroir. C'est pourquoi le logiciel est très ouvert et permet à l'utilisateur d'entrer son propre critère et d'optimiser en conséquence les paramètres à sa disposition.

Les résultats expérimentaux peuvent se visualiser à l'état brut, ou sous forme de cartographie en trois dimensions. Nous avons présenté, à titre d'exemple, le temps de réponse, la valeur moyenne et la valeur maximale en fonction de l'angle d'incidence, de la position transversale du point d'incidence et de la température, et ce pour deux échantillons. Les échantillons en question ne présentent pas des performances extraordinaires, ils ont été utilisés à titre d'illustration des potentialités du banc de caractérisation.

Nous avons mis à profit nos observations expérimentales pour proposer deux

modélisations. La première est relative à la valeur de l'onde conjuguée à saturation, c'est à dire en régime permanent. Il s'agit d'un modèle basé sur celui de MacDonald et Feinberg auquel nous avons ajouté une distribution angulaire de fanning ainsi qu'une hypothèse sur la longueur effective d'interaction dans les deux régions de mélange à quatre ondes. Il est ainsi possible de calculer la réflectivité à saturation en fonction de l'angle d'incidence et de la position transversale du point d'incidence sur le cristal. Il est possible de tenir compte de la température par l'intermédiaire des coefficients électrooptiques.

La second modèle permet de décrire le comportement temporel du miroir CAT comme un signal aléatoire régi par une loi de probabilité. Nous étudions en détail l'influence de la forme de cette loi sur les propriétés du signal généré.

Au delà des deux modélisations que nous avons développées, nous voulons insister sur le fait que l'appareil que nous avons mis au point permet de tester d'autres hypothèses, elle mêmes reposant éventuellement sur d'autres théories, et de vérifier si elles peuvent être validées ou non. Par ailleurs, il constitue en lui même un outil de caractérisation systématique des cristaux photoréfractifs dont l'utilisation pourrait être utile directement après synthèse des échantillons.

ANNEXES

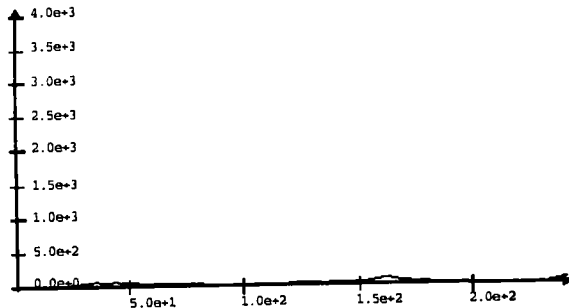
*Si tous ceux qui croient avoir raison
n'avaient pas tort...
la vérité ne serait pas loin !*

Pierre DAC

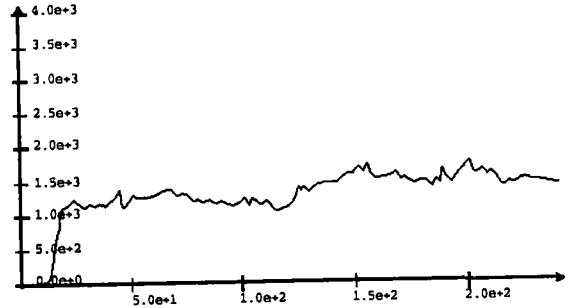
Séries de courbes expérimentales

$R = 5^\circ$; T_d variant de 2,2mm à 1,4mm ; échantillon n°2

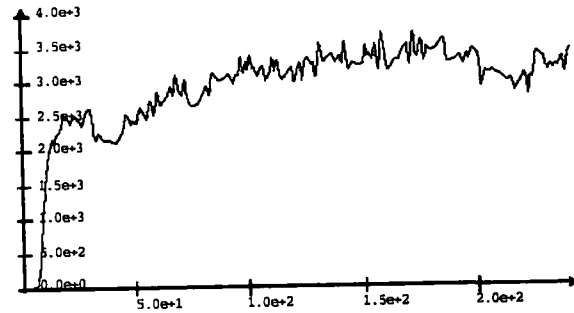
$r = 5^\circ$ $d = -2200\mu$ $T = 25000a^\circ C$ $II = 10mM$ Acqu de 240s Relax de 60s
_930418.021



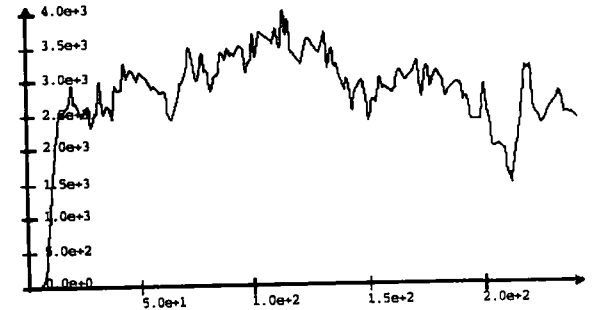
$r = 5^\circ$ $d = -2000\mu$ $T = 25000a^\circ C$ $II = 10mM$ Acqu de 240s Relax de 60s
_930418.022



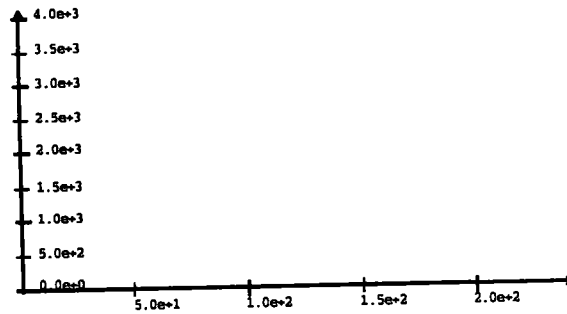
$r = 5^\circ$ $d = -1800\mu$ $T = 25000a^\circ C$ $II = 10mM$ Acqu de 240s Relax de 60s
_930418.023



$r = 5^\circ$ $d = -1600\mu$ $T = 25000a^\circ C$ $II = 10mM$ Acqu de 240s Relax de 60s
_930418.024

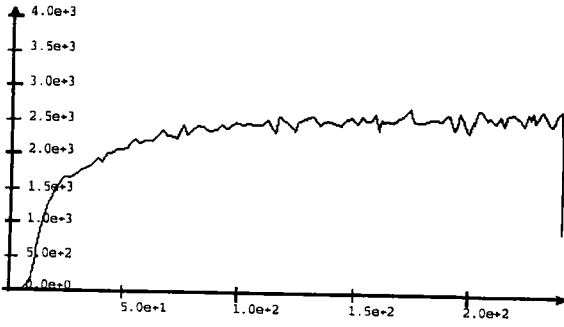


$r = 5^\circ$ $d = -1400\mu$ $T = 25000a^\circ C$ $II = 10mM$ Acqu de 240s Relax de 60s
_930418.025

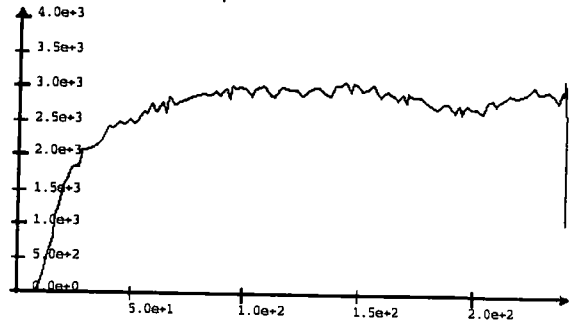


$R = 6^\circ$; Td variant de 2,8mm à 1,6mm; échantillon n°1

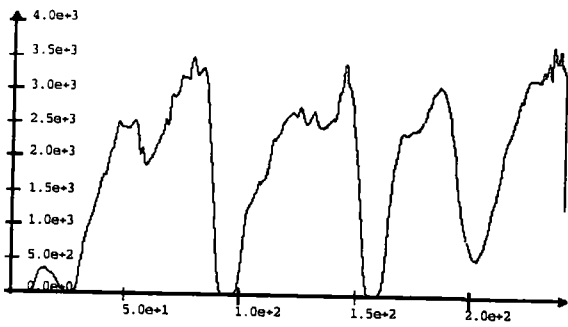
$r = 6^\circ d = -2800\mu T = 25000a^\circ C II = 10mV$ Acqu de 240s Relax de 60s
_930306.006



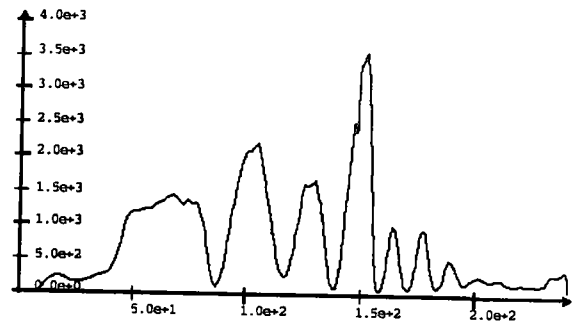
$r = 6^\circ d = -2600\mu T = 25000a^\circ C II = 10mV$ Acqu de 240s Relax de 60s
_930306.007



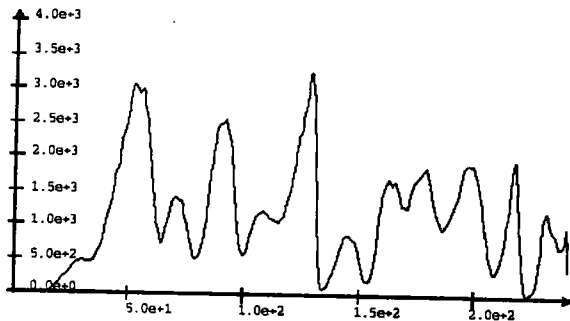
$r = 6^\circ d = -2400\mu T = 25000a^\circ C II = 10mV$ Acqu de 240s Relax de 60s
_930306.008



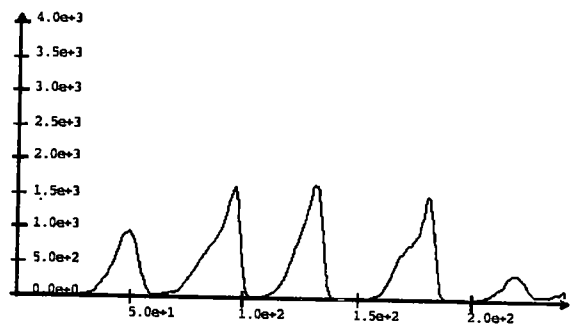
$r = 6^\circ d = -2200\mu T = 25000a^\circ C II = 10mV$ Acqu de 240s Relax de 60s
_930306.009



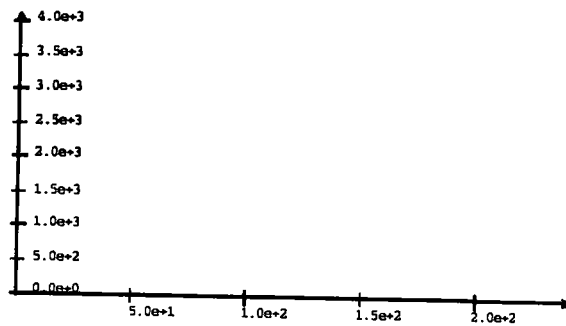
$r = 6^\circ d = -2000\mu T = 25000a^\circ C II = 10mV$ Acqu de 240s Relax de 60s
_930306.010



$r = 6^\circ d = -1800\mu T = 25000a^\circ C II = 10mV$ Acqu de 240s Relax de 60s
_930306.011



$r = 6^\circ d = -1600\mu T = 25000a^\circ C II = 10mV$ Acqu de 240s Relax de 60s
_930306.012



Connections des cartes

PORT A		PORT BC		PORT ANALOG	
1	DGND	1	PB0	1	ACH0
2	PA0	2	PB2	2	ACH1
3	PA2	3	DGND	3	ACH2
4	DGND	4	PB5	4	ACH3
5	PA5	5	PB7	5	ACH4
6	PA7	6	DGND	6	ACH5
7		7		7	ACH6
8		8	5V	8	ACH7
9		9	PC0	9	AGND
10		10	PC2	10	GATB1
11		11	PC4	11	GATB0
12		12	PC6	12	AGND
13		13	PC7	13	AGND
14	DGND	14	DGND	14	EXTUPDATE*
15	PA1	15	PB1	15	OUTB0
16	PA3	16	PB3	16	OUTB1
17	PA4	17	PB4	17	CLKB1
18	PA6	18	PB6	18	GATB2
19	5V	19	DGND	19	EXCONV*
20	15V	20	EXTTRIG	20	DGND
21		21	15V	21	CLKB2
22		22		22	AGND
23		23	PC1	23	OUTB2
24		24	PC3	24	DAC0 OUT
25		25	PC5	25	DAC1 OUT

Connections des ports de la carte LabNB.

DB25	cts	connecteur 50 points						cts	DB25
P ANALOG	1		ACH0	1	2	ACH1		2	P ANALOG
P ANALOG	3		ACH2	3	4	ACH3		4	P ANALOG
P ANALOG	5		ACH4	5	6	ACH5		6	P ANALOG
P ANALOG	7		ACH6	7	8	ACH7		8	P ANALOG
P ANALOG	9;12		AIGND	9	10	DAC0 OUT		24	P ANALOG
P ANALOG	13;22		AOGND	11	12	DAC1 OUT		25	P ANALOG
PORT A	1;4;14		DGND	13	14	PA0	HSM	2	PORT A
PORT A	15	STEP	PA1	15	16	PA2	STEP	3	PORT A
PORT A	16	DIR	PA3	17	18	PA4	INH	17	PORT A
PORT A	5	DIR	PA5	19	20	PA6	INH	18	PORT A
PORT A	6	HSM	PA7	21	22	PB0		1	PORT B/C
PORT B/C	15		PB1	23	24	PB2		2	PORT B/C
PORT B/C	16		PB3	25	26	PB4		17	PORT B/C
PORT B/C	4		PB5	27	28	PB6		18	PORT B/C
PORT B/C	5		PB7	29	30	PC0		9	PORT B/C
PORT B/C	23		PC1	31	32	PC2		10	PORT B/C
PORT B/C	24		PC3	33	34	PC4		11	PORT B/C
PORT B/C	25		PC5	35	36	PC6		12	PORT B/C
PORT B/C	13		PC7	37	38	EXTRIG		20	PORT B/C
P ANALOG	14		EXTUPDATE*	39	40	EXCONV*		19	P ANALOG
P ANALOG	15		OUTB0	41	42	GATB0		11	P ANALOG
P ANALOG	16		OUTB1	43	44	GATB1		10	P ANALOG
P ANALOG	17		CLKB1	45	46	OUTB2		23	P ANALOG
P ANALOG	18		GATB2	47	48	CLKB2		21	P ANALOG
P ANALOG			5V	49	50	DGND		20	P ANALOG

Affectation des connexions de la carte LabNB.

L'automate sur PC

Le projet : CRISTAL.PRJ

cristal.c
shut.c
dt2801.c

Le programme principal : CRISTAL.C

```
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <time.h>
#include <dos.h>
#include <alloc.h>
#include <float.h>
#include "shut.h"
#include "dt2801.h"
#include "myown.h"

struct resultat {
    int voie1, voie2;
};
struct resultat *resu;

ETAT    etat;           /* Variables d'état */
BOOLEAN fin_manip;     /* TRUE si fin d'une manipulation. */
BOOLEAN abandon;      /* TRUE si abandon complet demandé. */
int manip_num;        /* numéro de la manipulation */
FILE * listing;       /* fichier pour lister les acquisitions */
ENTREES    entrees;   /* entrées du système: configuration */
INFOS    infos;      /* informations complémentaires */
BOOLEAN debug;

/*****/
void set_shutter_noir(ouvert)
    BOOLEAN    ouvert;

    /* Positionne le shutter noir ouvert si "ouvert" est */
    /* TRUE et fermé si "ouvert" est FALSE. */
    /* Met la variable d'état à jour. */

{
    if (ouvert)    {
        shutter_noir_on();
    } else {
        shutter_noir_off();
    }
}
```

```

};
etat.noir_on = ouvert;
};

/*****/
void set_shutter_rouge(ouvert)
    BOOLEAN    ouvert;

    /* Positionne le shutter rouge ouvert si "ouvert" est      */
    /* TRUE et fermé si "ouvert" est FALSE.                    */
    /* Met la variable d'état à jour.                          */

{
    if (ouvert)        {
        shutter_rouge_on();
    } else {
        shutter_rouge_off();
    };
    etat.rouge_on = ouvert;
};

/*****/
int position ( axe, pos, mode )
    int axe;                /* Numéro de l'axe de 0 à 3      */
    long int pos;           /* Position à atteindre en pas  */
    int mode;              /* RELATIF ,ABSOLU ou RETOUR au 0 méca */

    /* Positionne le moteur de l'axe indiqué à la position    */
    /* demandée. Mode indique le mode de positionnement :    */
    /* RETOUR : recherche le zéro mécanique (pos indifférent)  */
    /* ABSOLU : positionnement absolu. Il faut avoir recherché */
    /* le zéro mécanique avant de pouvoir utiliser            */
    /* le positionnement absolu.                              */
    /* RELATIF: déplacement relatif à la position courante.   */

{
    union REGS regs;

    switch (mode)        {
        case ABSOLU: regs.h.ah = 0x01; break;
        case RELATIF: regs.h.ah = 0x05; break;
        case RETOUR:  regs.h.ah = 0x08; break;
    };
    regs.x.bx = (int) (pos & (long int)(MAXINT));
    regs.x.cx = (int) ((unsigned long int)pos >> 16);
    regs.h.al = axe;
    int86(IND4,&regs,&regs);
    return(regs.x.ax);
};

```

```

};

/*****/
void reset_all()

/* Remise a zéro du système: fermeture des shutters et          */
/* recherche de la position zéro mécanique des moteurs.          */

{      char sortie = DAC0;
  int nombre_ech = 3;
  int periode = 8000;          /* 1/100 sec */

  write_command_dt2801(SET_DA_PARAMETERS);
  write_byte_dt2801(&sortie);
  write_data_dt2801(&nombre_ech);
  write_command_dt2801(SET_INTERNAL_CLOCK);
  write_data_dt2801(&periode);

  set_shutter_rouge(FALSE);
  set_shutter_noir(FALSE);

  position (AXE_ROTATION, 0, RETOUR);
  etat.r = 0;
  position (AXE_TRANSLATION, 0, RETOUR);
  etat.d = 0;
};

/*****/
void set_r(r,physique)
  long int r;
  BOOLEAN physique;

/* Positionne le moteur de rotation à la position indiquée      */

{      if (physique) position (AXE_ROTATION,r,ABSOLU);
  etat.r = r;
};

/*****/
void set_d(d,physique)
  long int d;
  BOOLEAN physique;

/* Positionne le moteur de translation à la position indiquée  */

{      if (physique) position (AXE_TRANSLATION,d,ABSOLU);
  etat.d = d;
};

```

```

/*****
void acquisit(voie1,voie2)
    int *voie1,*voie2;

    /* Cette fonction réalise l'acquisition des deux voies */

{
    char port;
    char dig;

    write_command_dt2801(WRITE_DIG_OUT_IMM);
    port = 1;
    write_byte_dt2801(&port);
    dig = 0xFF;
    write_byte_dt2801(&dig);

    *voie1 = lire(7);          /* lecture de la voie 1 */
    *voie2 = lire(6);          /* lecture de la voie 2 */

    write_command_dt2801(WRITE_DIG_OUT_IMM);
    port = 1;
    write_byte_dt2801(&port);
    dig = 0x00;
    write_byte_dt2801(&dig);

    if (entrees.acq_periode == 0) entrees.acq_periode = 1;
    delay(entrees.acq_periode - 1);

    if (debug) printf("%6i %6i\n",*voie1,*voie2);
};

/*****
BOOLEAN user_ask()

{
    char reponse[100];

    printf("\n\n Voulez-vous quitter en sauvegardant la manip ?\n\n");
    printf(" Votre réponse svp [O ou N] : ");

    while(
        (scanf("%s",reponse)==0) ||
        ( (*reponse!='O')&&(*reponse!='N')
          &&(*reponse!='o')&&(*reponse!='n')
        )
    )
    {
        printf("\n Votre réponse svp [O ou N] : ");

```

```

        while (getchar()!='\n');
    };
    if ((*reponse=='O')||(*reponse=='o')) return (TRUE);
        else return(FALSE);
};

/*****/
BOOLEAN init_acquisit(entrees,etat_ptr,infos)
    ENTREES entrees;
    ETAT *etat_ptr;
    INFOS infos;

{
    int nb_points;

    if (etat.exit_demande) {
        if (user_ask()) {
            return(FALSE);
        };
    };

    nb_points = (entrees.dura_time / entrees.acq_periode) + 1;
    if(debug)
        fprintf(stderr, "\nnb_points %d\n",nb_points);
    resu = (struct resultat *)calloc(nb_points,sizeof(struct resultat));
    if (resu==NULL) {
        printf("....Nouvelle acquisition...pas de mémoire\n");
        return (FALSE);
    };

    printf(".....Nouvelle acquisition (r:%6ld d:%6ld) %s\n",
        etat_ptr->r, etat_ptr->d,
        infos.manip);

    etat_ptr->instant = 0;
    etat_ptr->inst_relax = entrees.relax_time;
    etat_ptr->exit_demande = FALSE;
    return(TRUE);
};

/*****/
FILE * existing_file(rep,name,basename)
    char rep[], name[];
    char basename[];

{
    FILE * fb;
    char end_char;

```



```

char nom[100];

/* Création du nom complet avec extension.      */

end_char=rep[strlen(rep)-1];
sprintf(basename, "%s", name);

if (rep[0]==0)
    sprintf(nom, "%s", basename);
else if ((end_char!=':') && (end_char!='\\'))
    sprintf(nom, "%s\\%s", rep, basename);
else
    sprintf(nom, "%s%s", rep, basename);
fb=fopen(nom, "at");
return(fb);
};

/*****
FILE * unique_file(rep,name,basename)
char rep[], name[];
char basename[];

{
    FILE * fb;
char end_char;
int i;
char nom[100];

    fb=(FILE*)-1;
for (i=1;(fb!=NULL)&&(i<=999);i++) {

    /* Création du nom complet avec extension.      */

end_char=rep[strlen(rep)-1];
sprintf(basename, "%s.%03d", name, i);

if (rep[0]==0)
    sprintf(nom, "%s", basename);
else if ((end_char!=':') && (end_char!='\\'))
    sprintf(nom, "%s\\%s", rep, basename);
else
    sprintf(nom, "%s%s", rep, basename);

    if((fb = fopen(nom, "r")) != NULL) fclose(fb);
};
fb = NULL;
if (i<=1000) fb=fopen(nom, "wt");
return(fb);

```

```

};

/*****/
void close_acquisit(entrees,etat_ptr,infos)
    ENTREES entrees;
    ETAT *etat_ptr;
    INFOS infos;

{
    FILE *fb;
    char dateChaine [14];
    int i,nb_points;
    char basename[20];

    if (etat.noir_on) set_shutter_noir(FALSE);
    if (etat.rouge_on) set_shutter_rouge(FALSE);

    /* Création de la partie principale du nom du fichier      */

    sprintf(dateChaine,"%02i%02i%02i",
            entrees.laDate.da_year,
            entrees.laDate.da_mon,
            entrees.laDate.da_day);
    dateChaine[0]='_';
    dateChaine[1]='_';

    /* Si on a ouvert le fichier, on écrit le résultat      */

    fb = unique_file(entrees.dest_dir,dateChaine,basename);
    if (fb != NULL) {

        printf(".....Ecriture du fichier résultat %s\n",
            basename);

        if (listing!=NULL)
            fprintf(listing,
                "%12s %6ld %6ld #fichier, angle, position\n",
                basename, etat_ptr->r, etat_ptr->d);

        /* Entête du document : */

        fprintf(fb,"{\n");
        fprintf(fb,"%02i %02i %02i\n",
            entrees.laDate.da_day,
            entrees.laDate.da_mon,
            entrees.laDate.da_year);
        fprintf(fb,"%s\n",infos.manip);
        fprintf(fb,"%s\n",infos.user_name);
    }
}

```

```

fprintf(fb, "%s\n", infos.name);
fprintf(fb, "%11s      largeur du cristal\n", infos.width);
fprintf(fb, "%11s      profondeur du cristal\n", infos.depth);
fprintf(fb, "%11s      hauteur du cristal\n", infos.height);
fprintf(fb, "%11s      puissance du laser\n", infos.power);
fprintf(fb, "%11s      longueur d'onde laser\n", infos.lambda);
fprintf(fb, "%11ld      polarisation incidente en mdegrés /
horizontale\n", etat_ptr->p);
fprintf(fb, "%11ld durée d'acquisition en ms\n", entrees.dura_time);
fprintf(fb, "%11ld périoded'acquisitionenms\n", entrees.acq_periode);
fprintf(fb, "%11ld      durée de relaxation en
ms\n", entrees.relax_time);
fprintf(fb, "%5ld %5ld angle et position courants\n",
        etat_ptr->r,
        etat_ptr->d);
fprintf(fb, "%5ld %5ld %5ld angle de départ/d'arrivée et pas en
mdegrés\n",
        entrees.r0,
        entrees.r1,
        entrees.rpas);
fprintf(fb, "%5ld %5ld %5ld position transversale de départ /
d'arrivée et ps en µm\n",
        entrees.d0/10,
        entrees.d1/10,
        entrees.dpas/10);
fprintf(fb, "}\n");

/* Liste des points de mesure : */

nb_points = (entrees.dura_time / entrees.acq_periode) + 1;
for (i=0; i<nb_points; i++) {
    fprintf(fb, "%4i %6i %6i\n",
            i,
            resu[i].voie1,
            resu[i].voie2);
};
fclose(fb);
};

printf(".....Fin d'acquisition\n\n\n");
if (resu!=NULL) free((void*)resu);
};

/*****/
void get_manip_params(entrees_ptr, infos_ptr, filename)
ENTREES *entrees_ptr;
INFOS *infos_ptr;

```

```

char filename[];

{
    FILE *fd;
    char ligne[NAMELEN];

    entrees_ptr->r0 = 0;
    entrees_ptr->r1 = 0;
    entrees_ptr->rpas = 1;

    entrees_ptr->d0 = 0;
    entrees_ptr->d1 = 0;
    entrees_ptr->dpas = 1;

    entrees_ptr->dura_time = 0;
    entrees_ptr->relax_time = 0;
    entrees_ptr->acq_periode = 1;

    entrees_ptr->p0=0;
    entrees_ptr->p1=0;
    entrees_ptr->ppas=1;

    entrees_ptr->T0=0;
    entrees_ptr->T1=0;
    entrees_ptr->Tpas=1;

    strcpy(entrees_ptr->dest_dir, "c:");

    strcpy(infos_ptr->lambda, ""); /* Longueur d'onde laser en nm */
    strcpy(infos_ptr->power, ""); /* puissance incidente du laser en mW */
    strcpy(infos_ptr->waist, ""); /* diametre du faisceau en mm */
    strcpy(infos_ptr->width, ""); /* largeur du cristal en mm */
    strcpy(infos_ptr->height, ""); /* hauteur du cristal en mm */
    strcpy(infos_ptr->depth, ""); /* profondeur du cristal en mm */
    strcpy(infos_ptr->name, ""); /* nom du cristal en mm */
    strcpy(infos_ptr->user_name, ""); /* nom de l'utilisateur */
    strcpy(infos_ptr->manip, ""); /* Nom de la manipulation */

    getdate (&entrees_ptr->laDate);

    printf ("Début manip de %s\n",filename);
    fd = fopen(filename, "r");
    if (fd!=NULL)
    {
        fgets(infos_ptr->manip, NAMELEN, fd);
        infos_ptr->manip[strlen(infos_ptr->manip)-1]=0;

        fgets(infos_ptr->user_name, NAMELEN, fd);
        infos_ptr->user_name[strlen(infos_ptr->user_name)-1]=0;
    }
}

```

```

fgets(infos_ptr->name,NAMELEN,fd);
infos_ptr->name[strlen(infos_ptr->name)-1]=0;

fgets(entrees_ptr->dest_dir,NAMELEN,fd);
entrees_ptr->dest_dir[strlen(entrees_ptr->dest_dir)-1]=0;

fgets(ligne,NAMELEN,fd);
sscanf(ligne,"%ld %ld %ld\n",
        &entrees_ptr->r0,
        &entrees_ptr->r1,
        &entrees_ptr->rpas);
fgets(ligne,NAMELEN,fd);
sscanf(ligne,"%ld %ld %ld\n",
        &entrees_ptr->d0,
        &entrees_ptr->d1,
        &entrees_ptr->dpas);
fgets(ligne,NAMELEN,fd);
sscanf(ligne,"%ld %ld %ld\n",
        &entrees_ptr->p0,
        &entrees_ptr->p1,
        &entrees_ptr->ppas);
fgets(ligne,NAMELEN,fd);
sscanf(ligne,"%ld %ld %ld\n",
        &entrees_ptr->T0,
        &entrees_ptr->T1,
        &entrees_ptr->Tpas);
fgets(ligne,NAMELEN,fd);
sscanf(ligne,"%ld %ld %ld\n",
        &entrees_ptr->dura_time,
        &entrees_ptr->relax_time,
        &entrees_ptr->acq_periode);
fgets(ligne,NAMELEN,fd);
sscanf(ligne,"%s %s %s %s %s %s\n",
        infos_ptr->lambda,
        infos_ptr->power,
        infos_ptr->waist,
        infos_ptr->width,
        infos_ptr->depth,
        infos_ptr->height
        );
fclose(fd);
};
};

/*****/
void init_manip(entrees,etat_ptr,filename)
ENTREES entrees;

```

```

ETAT *etat_ptr;
char filename[];

/* Cette procédure initialise la manipulation, c'est à */
/* dire positionne les moteurs sur la position d'origine */
/* et initialise les variables d'état aux valeurs */
/* d'origine. */

{
    FILE * the_file;

    etat_ptr->r = entrees.r0;
    etat_ptr->d = entrees.d0;
    etat_ptr->p = entrees.p0;

    if (filename[0]!=0) {
        the_file = fopen(filename,"r");
        if (the_file!=NULL) {
            fscanf(the_file,"%ld %ld %ld",
                &etat_ptr->r,
                &etat_ptr->d,
                &etat_ptr->p);
            fclose(the_file);
        };
    };

    if (etat_ptr->noir_on) set_shutter_noir(FALSE);
    if (etat_ptr->rouge_on) set_shutter_rouge(FALSE);

    set_r(etat_ptr->r,TRUE);
    set_d(etat_ptr->d,TRUE);

    fin_manip = FALSE;
};

/*****/
void do_manip(entrees,etat_ptr)
    ENTREES entrees;
    ETAT *etat_ptr;

{
    int voie1, voie2;      /* Résultat d'acquisition des voies */
    int num_point;

    /* On place le shutter rouge allumé ou éteint selon */
    /* le temps d'illumination qui reste à écouler. */

    if ((etat_ptr->inst_relax>0)&&(etat_ptr->rouge_on==FALSE)
        &&(etat_ptr->noir_on==FALSE)) {
        printf("      ----> Relaxation\n");
    }
}

```

```

        set_shutter_rouge(TRUE);
    } else if ((etat_ptr->inst_relax==0)&&(etat_ptr->rouge_on)) {
        set_shutter_rouge(FALSE);
    };

```

```

/* On place le shutter noir allumé ou éteint selon */
/* le temps d'acquisition qui reste à écouler. */

```

```

if ((etat_ptr->instant>0)&&(etat_ptr->noir_on==FALSE)
    &&(etat_ptr->rouge_on==FALSE)) {
    printf("      ----> Acquisition\n");
    set_shutter_noir(TRUE);
} else if ((etat_ptr->instant==0)&&(etat_ptr->noir_on)) {
    set_shutter_noir(FALSE);
};

```

```

/* Si une acquisition doit être menée : */

```

```

acquisit(&voie1, &voie2);
if (etat_ptr->instant>0) {
    num_point = ((entrees.dura_time+1-etat_ptr->instant)
                / entrees.acq_periode);
    resu[num_point].voie1=voie1;
    resu[num_point].voie2=voie2;
    if(debug)
        {
            fprintf(stderr, "\n%8ld %8ld ", entrees.dura_time,
                    etat_ptr->instant);
            fprintf(stderr, "num_point %d\n", num_point);
        }
};
if (etat_ptr->inst_relax>0) {
};

```

```

/* Faire évoluer les paramètres de temps : */
/* Eventuellement, passer en relax si fin d'acqui*/

```

```

if (etat_ptr->inst_relax>0) {
    etat_ptr->inst_relax -= entrees.acq_periode;
    if (etat_ptr->inst_relax<=0) {
        etat_ptr->inst_relax = 0;
        etat_ptr->instant = entrees.dura_time + 1;
    };
};
if (etat_ptr->instant>0) {

```

```

    etat_ptr->instant -= entrees.acq_periode;
    if (etat_ptr->instant<=0) {
        etat_ptr->instant = 0;
    };
};

/* Si idle (ni relax, ni acquisition), on vérifie          */
/* s'il faut passer à une nouvelle acquisition après      */
/* déplacement des moteurs.                               */

if ((etat_ptr->instant==0)&&(etat_ptr->inst_relax==0)
    &&(etat_ptr->rouge_on==FALSE)&&(etat_ptr->noir_on==FALSE)) {
    if (etat_ptr->d < entrees.d1) {
        close_acquisit(entrees, etat_ptr, infos);
        set_d(etat_ptr->d + entrees.dpas, TRUE);
        if (!init_acquisit(entrees, etat_ptr, infos))
            fin_manip = TRUE;
    } else if (etat_ptr->r < entrees.r1) {
        close_acquisit(entrees, etat_ptr, infos);
        set_d(entrees.d0, TRUE);
        set_r(etat_ptr->r + entrees.rpas, TRUE);
        if (!init_acquisit(entrees, etat_ptr, infos))
            fin_manip = TRUE;
    } else fin_manip=TRUE;
};
};

/*****
BOOLEAN user_break()

{
    char c;
    int reponse;

    if (!kbhit()) return(FALSE); /* Pas d'action */
    if (getch()==ESC) {
        etat.exit_demande = TRUE;
        return(FALSE);
    } else {
        printf("\n\n  ARRET UTILISATEUR DEMANDE\n\n");
        set_shutter_noir(FALSE);
        set_shutter_rouge(FALSE);
        printf("Entrez votre choix :\n\n");
        printf("  0 = abandon complet\n");
        printf("  1 = continuer comme si de rien n'était\n");
        printf("  2 = passer à l'acquisition suivante avec
                prérelaxation\n");
        printf("  3 = passer à l'acquisition suivante sans

```



```

        prérelaxation\n");
printf(" 4 = reprendre l'acquisition en cours avec
        prérelaxation\n");
printf(" 5 = reprendre l'acquisition en cours sans
        prérelaxation\n");
printf(" 6 = passer à la manipulation suivante avec
        prérelaxation\n");
printf(" 7 = passer à la manipulation suivante sans
        prérelaxation\n");
printf(" 8 = reprendre la manipulation en cours avec
        prérelaxation\n");
printf(" 9 = reprendre la manipulation en cours sans
        prérelaxation\n");

printf("\n");
printf("          Votre réponse svp : ");
while((scanf("%i",&reponse)==0)|| (reponse<0)|| (reponse>10)) {
    printf("\n          Votre réponse svp : ");
    while (getchar()!='\n');
};

switch (reponse) {
    case 0 : abandon = TRUE; return(TRUE);
    case 1 : break;
    case 2 : etat.instant = 1; break;
    case 3 : etat.instant = 0; break;
    case 4 : set_d(etat.d - entrees.dpas,FALSE);
            etat.instant = 1; break;
    case 5 : set_d(etat.d - entrees.dpas,FALSE);
            etat.instant = 0; break;

    case 6 : set_d(entrees.d1,FALSE);
            set_r(entrees.r1,FALSE);
            etat.instant = 1;
            return(FALSE);
    case 7 : return(TRUE);

    case 8 : set_d(entrees.d1,FALSE);
            set_r(entrees.r1,FALSE);
            etat.instant = 1;
            manip_num -= 1;
            return(FALSE);
    case 9 : manip_num -= 1;
            return(TRUE);

};

return(FALSE);
};

```

```

};

/*****/
void main(argc,argv)
  int  argc;
  char * argv[];

{
  int voie1,voie2,i;
  char dateChaine[20];
  char listing_name[100];
  FILE * stat;
  char stat_name[100];
  char list_name[100];

  abandon = FALSE;
  debug = FALSE;
  stat_name[0]=0;
  list_name[0]=0;

  for(i=1;argv[i][0]!='-';i++) {
    switch (argv[i][1]) {
      case 'r': i++;
                strcpy(stat_name,argv[i]);
                printf("Redémarrage sur %s\n",stat_name);
                break;
      case 'l': i++;
                strcpy(list_name,argv[i]);
                printf("Listing dans %s\n",list_name);
                break;
      case 'd': debug = TRUE; break;
    }
  };
};

reset_all();

for(manip_num=i;(manip_num<argc)&&(!abandon);manip_num++) {
  get_manip_params(&entrees,&infos,argv[manip_num]);
  sprintf(dateChaine,"%02i%02i%02i",
          entrees.laDate.da_year,
          entrees.laDate.da_mon,
          entrees.laDate.da_day);
  dateChaine[0]='$';
  dateChaine[1]='$';
  if (list_name[0]==0)
    listing = unique_file(entrees.dest_dir,dateChaine,
                          listing_name);
  else {
    listing = existing_file(entrees.dest_dir,list_name,
                            listing_name);
  }
}

```

```

        list_name[0]=0;
};
printf("          Fichier listing : %s\n",listing_name);

init_manip(entrees,&etat,stat_name);
stat_name[0]=0;

if (init_acquisit(entrees,&etat,infos))
    while (! (user_break() || fin_manip)) {
        do_manip(entrees,&etat);
    };

if (!etat.exit_demande) {
    close_acquisit(entrees,&etat,infos);
    if (listing!=NULL) fclose(listing);
    listing = NULL;
} else {
    if (listing!=NULL) fclose(listing);
    listing = NULL;
    stat = fopen("cristal.ste","wt");
    fprintf(stat,"%ld %ld %ld",
            etat.r,etat.d,etat.p);
    fclose(stat);
    stat = fopen("reprise.bat","wt");
    fprintf(stat,"@echo off\n");
    fprintf(stat,"if %0_ == _reprise_ copy reprise.bat
$$repris.bat\n");
    fprintf(stat,"if %0_ == _reprise_ $$repris\n");
    fprintf(stat,"del reprise.bat\n");
    fprintf(stat,"ren cristal.ste _cristal.ste\n");
    fprintf(stat,"cristal -r _cristal.ste -l %s",
            listing_name);
    for (i=manip_num;i<argc;i++) {
        fprintf(stat," %s",argv[i]);
    };
    fprintf(stat,"\n");
    fprintf(stat,"del _cristal.ste\n");
    fprintf(stat,"del $$repris.bat");
    fclose(stat);
    printf("\n\n\n\n");
    printf("Manipulation sauvegardée...\n\n");
    printf("pour reprendre, tapez : REPRISE\n");
    break;
};
}
};

```

La commande de la carte : DT2801.C

```

/*****
 * fichier dt2801.c
 * carte DT_2801
 *****/

#include <stdio.h>
#include <dos.h>
#include "dt2801.h"

/* lecture */
int lire(chaine)
    char chaine;
{
    int lect;
    char gain;

    gain = 0;
    write_command_dt2801(READ_AD_IMMEDIATE);
    write_byte_dt2801(&gain);
    write_byte_dt2801(&chaine);
    read_data_dt2801(&lect);
    return(lect);
}

/* attente */
void attente()
{
    int i, bidon;
    write_command_dt2801(14);
    for(i = 0; i < 4; i++)
        read_data_dt2801(&bidon);
}

/* ecriture */
void ecrire (chaine, ech)
    char chaine;
    int ech;
{
    write_command_dt2801(8);
    write_byte_dt2801(&chaine);
    write_data_dt2801(&ech);
}

/* lecture d'un entier en binaire */
void intobi(entier)

```

```

int entier;
{
int i;
for(i = 0;i < 8;i ++)
    {
    if((entier & (1 << (15 - i))) != 0)
        fprintf(stderr,"1");
    else
        fprintf(stderr,"0");
    }
fprintf(stderr," ");
for(i = 8;i < 16;i ++)
    {
    if((entier & (1 << (15 - i))) != 0)
        fprintf(stderr,"1");
    else
        fprintf(stderr,"0");
    }
fprintf(stderr,"\n");
return;
}

/* arret du processus en cours */
void stop_dt2801()
{
outp(BASE + 1,0xF);
inp(BASE);
return;
}

/* ecriture d'une commande */
void write_command_dt2801(commande)
int commande;
{
while((inp(BASE + 1) & 4) != 4);
outp(BASE + 1,commande);
return;
}

/* attente de fin d'execution de la commande */
void wait_command_dt2801()
{
while((inp(BASE + 1) & 4) != 4);
return;
}

/* lecture d'une donnee */

```

```

void read_data_dt2801(data)
int *data;
{
read_byte_dt2801((char*)data);
read_byte_dt2801(((char*)data) + 1);
return;
}

/* ecriture d'une donnee */
void write_data_dt2801(data)
int *data;
{
write_byte_dt2801((char*)data);
write_byte_dt2801(((char*)data) + 1);
return;
}

/* lecture d'un octet */
void read_byte_dt2801(buf)
char *buf;
{
while((inp(BASE + 1) & 1) != 1);
*buf = (char)inp(BASE);
return;
}

/* ecriture d'un octet */
void write_byte_dt2801(buf)
char *buf;
{
while((inp(BASE + 1) & 2) == 2);
outp(BASE, (int)(*buf));
return;
}

```

La commande des obturateurs : SHUT.C

```

/*****
*   fichier shut.c           *
*****/

#include <stdio.h>
#include "dt2801.h"
#include "shut.h"

char longtobin (val)
long val;
{

```

```

int i;
long reste;
char retour,masque;
for(i = 0,retour = 0,masque = 1;i < 8;i ++,val/=10,masque<<=1)
{
    reste = val%10;
    if(reste == 1)
        retour |= masque;
    else if(reste != 0)
        {
            fprintf(stderr,"valeur incorrecte\n");
            exit(0);
        }
}
return retour;
}

/***** allumage du faisceau principal *****/
void shutter_noir_on()
{
    int i,a;
    a = 10;
    sound(3000);
    for(i = 0;i < 5;i ++)
        {
            commande(11000101,a);
            commande(11000001,a);
        }
    nosound();
}

/***** extinction du faisceau principal *****/
void shutter_noir_off()
{
    int i,a;
    a = 10;
    sound(1000);
    for(i = 0;i < 5;i ++)
        {
            commande(11001101,a);
            commande(11001001,a);
        }
    nosound();
}

/***** allumage du faisceau d'effacement *****/
void shutter_rouge_on()

```

```

{
int i,a;
a = 50;
sound(3500);
for(i = 0;i < 5;i ++)
{
    commande(10110011,a);
    commande(10110001,a);
}
    commande(10110001,a);
nosound();
}

/***** extinction du faisceau d'effacement *****/
void shutter_rouge_off()

{
int i,a;
a = 50;
sound(1500);
for(i = 0;i < 5;i ++)
{
    commande(10010011,a);
    commande(10010001,a);
}
    commande(10010001,a);
nosound();
}

void commande (mot,retard)
long mot;
int retard;
{
char port,dig;
port = 0;
dig = longtobin(mot);
write_command_dt2801(WRITE_DIG_OUT_IMM);
write_byte_dt2801(&port);
write_byte_dt2801(&dig);
delay(retard);
}

```


MYOWN.H

```

/*****
*/
/*      struct entrees :
*/
/*
/*      Cette structure définit les entrées du système, c'est à dire
*/
/*      les données concernant la manipulation.
*/
/*
/*****

struct entrees {
    long int r0;          /* angle de départ en 1/1000 degrés          */
    long int r1;          /* angle d'arrivée
*/
    long int rpas;        /* incrément pour r
*/

    long int d0;          /* position transversale de départ en 1/10000mm
*/
    long int d1;          /* position transversale d'arrivée
*/
    long int dpas;        /* incrément de position
*/

    long int p0;          /* polarisation de départ en 1/1000 degrés
*/
    long int p1;          /* polarisation d'arrivée
*/
    long int ppas;        /* incrément pour polarisation
*/

    long int T0;          /* température de départ en 1/100 degré Celcius
*/
    long int T1;          /* température d'arrivée
*/
    long int Tpas;        /* incrément en température
*/

    long int dura_time;   /* durée en 1/1000 seconde
*/
    long int relax_time;  /* durée de relaxation
*/
    long int acq_periode; /* période d'acquisition
*/

    char dest_dir[100];   /* Répertoire dest. résultats
*/

    struct date laDate;   /* date de début de la manipulation
*/
};

/*****
*/
/*      struct infos :
*/
/*
/*      Cette structure définit les informations relatives à la
*/
/*      manipulation devant se trouver dans le fichier de résultats.
*/
/*      Ces informations n'ont aucun effet sur l'acquisition elle-même.
*/
/*****
```

```

/*                                                                 */
/*****                                                             */

#define NAMELEN 200

struct infos {
    char  lambda[20];          /* Longueur d'onde laser en nm          */
    char  power[20];          /* puissance incidente du laser en mW   */
    char  waist[20];          /* diametre du faisceau en mm           */
    char  width[20];          /* largeur du cristal en mm             */
    char  height[20];         /* hauteur du cristal en mm             */
    char  depth[20];          /* profondeur du cristal en mm          */
    char  name[NAMELEN];      /* nom du cristal en mm                 */
    char  user_name[NAMELEN]; /* nom de l'utilisateur                 */
    char  manip[NAMELEN];     /* Nom de la manipulation                */
};

/*****                                                             */
/*                                                                 */
/*      struct etat :                                             */
/*                                                                 */
/*      Cette structure définit l'état d'avancement du système   */
/*      d'acquisition. Les variables définies ici sont modifiées  */
/*      par le déroulement de l'acquisition.                     */
/*                                                                 */
/*****                                                             */

#define      BOOLEAN      char
#define TRUE 1
#define FALSE 0

struct etat {
    long int r;               /* angle courant en 1/100 degrés        */
    long int d;               /* position transversale courante en µm  */
    long int p;               /* état courant de la polarisation      */
    long int T;               /* température courante en 1/100 degrés */
    long int instant;         /* instant d'acquisition en 1/1000 sec  */
    long int inst_relax;      /* instant relaxation                    */
    BOOLEAN noir_on;          /* TRUE si shutter noir ouvert          */
    BOOLEAN rouge_on;         /* TRUE si shutter rouge ouvert         */
    BOOLEAN exit_demande;
};

#define ENTREES struct entrees
#define INFOS struct infos
#define ETAT struct etat

#define IND4 0xF1

```

```

#define ABSOLU 0
#define RELATIF 1
#define RETOUR 2
#define MAXINT 0x0FFFF

#define AXE_ROTATION 4
#define AXE_TRANSLATION 1          /* 1 pour le sens negatif,
                                   2 pour le sens positif */

#define ESC 27

int Nerve(int axis, long steps );
int MoveToStartPos( long ang_range, long tran_range );
int position (int, long int, int);
void set_d(long int,BOOLEAN);
void set_r(long int,BOOLEAN);
void init_manip(ENTREES,ETAT*,char*);
void do_manip(ENTREES,ETAT*);

```

SHUT.H

```

/*****
 *   fichier shut.h
 *****/

```

```

char longtobin      (long);
void shutter_noir_on  (void);
void shutter_noir_off (void);
void shutter_rouge_on (void);
void shutter_rouge_off (void);
void commande      (long,int);

```

DT2801.H

```

/*****
 *   fichier dt2801.h
 *****/

```

```

#define BASE 0x2DE

#define RESET          0x0
#define CLEAR_ERROR    0x1
#define READ_ERROR_REGISTER 0x2

```

```

#define      SET_INTERNAL_CLOCK      0x3
#define      SET_DIG_PORT_INPUT      0x4
#define      SET_DIG_PORT_OUTPUT     0x5
#define      READ_DIG_INP_IMM        0x6
#define      WRITE_DIG_OUT_IMM       0x7
#define      WRITE_DA_IMMEDIATE      0x8
#define      SET_DA_PARAMETERS       0x9
#define      WRITE_DA                 0xA
#define      TEST                     0xB
#define      READ_AD_IMMEDIATE       0xC
#define      SET_AD_PARAMETERS       0xD
#define      READ_AD                  0xE
#define      STOP                     0xF

#define      EXT_TRIG                 0x80
#define      EXT_CLK                   0x40
#define      CONTINUOUS               0x20
#define      DMA                      0x10

#define      DAC0                     0x0
#define      DAC1                     0x1

```

```

int lire (char);
void attente(void);
void ecrire (char,int);
void intobi (int);
void stop_dt2801 (void);
void write_command_dt2801(int);
void wait_command_dt2801 (void);
void read_data_dt2801 (int*);
void write_data_dt2801 (int*);
void read_byte_dt2801 (char*);
void write_byte_dt2801 (char*);

```

MAKEFILE

```

crystal.exe: cristal.c dt2801.c shut.c dt2801.h myown.h shut.h
    tccconfig tccconfig.tc turboc.cfg
    tcc cristal shut dt2801

```

L'automate sur Mac

Cristal.c

```

/*****
version          23.08.93
fichier          cristal.c
machine          mac quadra
gestion de la manip de photoréfractivité :
    entrees des paramètres de la manip :
        soit au clavier
        soit directement par défaut dans le programme
        soit à l'aide d'un fichier de cconfiguration
    pilotage des quatre axes microcontrole par la carte GPIB
    pilotage des shutters et acquisition de l'onde conjuguee
    avec la carte Lab NB
    creation de fichiers resultats contenant les points de mesure
    au format TraceCourbe, ces fichiers resultats ont pour nom
    date.numero ie : 930212.001
*****/

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <time.h>
#include <float.h>
#include <events.h>
#include "shut.h"
#include "myown.h"
#include "moteur.h"
#include "inconnu.h"
#include "NI_DAQ_MAC.h"

extern short int LDSysError;

struct resultat {
    int voie1, voie2;
};
struct resultat *resu;

ETAT  etat;          /* Variables d'état
*/
BOOLEAN fin_manip;  /* TRUE si fin d'une manipulation.
*/
BOOLEAN abandon;    /* TRUE si abandon complet demandé.
*/
int manip_num;      /* numéro de la manipulation
```

```

*/
FILE * listing;          /* fichier pour lister les acquisitions
*/
ENTREES      entrees;    /* entrées du système: configuration
*/
INFOS  infos;          /* informations complémentaires
*/
BOOLEAN debug;

/*****
26.03.93
void set_shutter_noir(ouvert)
Positionne le shutter noir ouvert
    si "ouvert" est TRUE et si "etat.noir_on" est FALSE
Positionne le shutter noir fermé
    si "ouvert" est FALSE et si "etat.noir_on" est TRUE
Met la variable d'état etat.noir_on à jour
*****/
void set_shutter_noir(BOOLEAN ouvert)

{
  if ((ouvert)&&(!etat.noir_on))    {
    shutter_noir_on();
  }
  if ((!ouvert)&&(etat.noir_on))    {
    shutter_noir_off();
  }
  etat.noir_on = ouvert;
}

/*****
26.03.93
void set_shutter_rouge(ouvert)
Positionne le shutter rouge ouvert
    si "ouvert" est TRUE et si "etat.rouge_on" est FALSE
Positionne le shutter rouge fermé
    si "ouvert" est FALSE et si "etat.rouge_on" est TRUE
Met la variable d'état etat.rouge_on à jour
*****/
void set_shutter_rouge(BOOLEAN ouvert)

{
  if ((ouvert)&&(!etat.rouge_on))    {
    shutter_rouge_on();
  }
  if ((!ouvert)&&(etat.rouge_on))    {
    shutter_rouge_off();
  }
}

```

```

}
etat.rouge_on = ouvert;
}

/*****
17.02.93
int position ( axe, pos, mode)
a été définie dans le fichier moteur.c
positionne l'axe indiqué a la position demandée
*****/

/*****
14.04.93
void reset_all()
initialisation du système :
    vérification du bon fonctionnement des shutters
    fermeture des shutters
    recherche de la position zéro mécanique des moteurs de position
*****/
void reset_all()

{
    short port;
port = 0;                               /* port A de la carte LabNB */
entrees.slot = 2;                       /* la carte LabNB est dans */
                                          /* le slot 2 (par défaut) */

    DIG_Prt_Config(entrees.slot,port,1,0);
        /* confuguration du port A de la carte LabNB
        3ieme champ :
        1 signifie port en sortie
        0 signifie port en entree
        4ieme champ :
        0 signifie nonlatched mode
        1 signifie latched mode
        */
printf("CRISTAL version 2.4 du 14 mai 1993\n\n\n\n\n\n\n");

printf("séquence d'intialisation des shutters\n");
printf("ouverture des shutters\n");
    etat.noir_on = FALSE;
    etat.rouge_on = FALSE;
        set_shutter_noir(TRUE);
        set_shutter_rouge(TRUE);
        delay(60);
printf("fermeture des shutters\n");

```

```

        set_shutter_noir(FALSE);
        set_shutter_rouge(FALSE);
        delay(60);
printf("fin de la séquence d'initialisation des shutters\n");
printf("les shutters doivent être en position fermée\n");
        delay(60);

printf("séquence d'initialisation des moteurs microcontrole\n");
position (AXE_ROTATION,0,RETOUR);
etat.r = 0;
position (AXE_TRANSLATION,0,RETOUR);
etat.d = 0;
}

/*****
17.02.93
void set_r(long r,BOOLEAN physique)
Positionne le moteur de rotation à la position indiquée ssi
un déplacement physiaue est souhaité
*****/
void set_r(long r,BOOLEAN physique)

{
    if (physique) position (AXE_ROTATION,r,ABSOLU);
    etat.r = r;
}

/*****
17.02.93
void set_d(long d,BOOLEAN physique)
Positionne le moteur de translation à la position indiquée ssi
un déplacement physique est souhaité
*****/
void set_d(long d,BOOLEAN physique)

{
    if (physique) position (AXE_TRANSLATION,d,ABSOLU);
    etat.d = d;
}

/*****
10.05.93
void acquisit(voie1,voie2)
Cette fonction réalise l'acquisition des deux voies
*****/
void acquisit(voie1,voie2)

```



```

int *voie1,*voie2;

{
int16 valeur1,valeur2;
int canal1,canal2;

    canal1 = 6;
    canal2 = 7;
    AI_Clear(entrees.slot);          /* pour la carte LabNB : nettoyage et
*/
    AI_Config(entrees.slot,0,0,1); /* configuration du port analogique
*/
                                /* en entrée                                */

    AI_Read(entrees.slot,canal1,entrees.gain,&valeur1);
    AI_Read(entrees.slot,canal2,entrees.gain,&valeur2);
    *voie1 = valeur1;
    *voie2 = valeur2;

}

/*****
17.02.93
BOOLEAN user_ask()
*****/
BOOLEAN user_ask()

{
    char reponse[100];
    printf("\n\n  Voulez-vous quitter en sauvegardant la manip ?\n\n");
    printf("    Votre réponse svp [O ou N] : ");

    while(
        (scanf("%s",reponse)==0) ||
        ( (*reponse!='O')&&(*reponse!='N')
          &&(*reponse!='o')&&(*reponse!='n')
        )
    )
    {
        printf("\n    Votre réponse svp [O ou N] : ");
        while (getchar()!='\n');
    };
    if ((*reponse=='O')||(*reponse=='o')) return (TRUE);
    else return(FALSE);
}

/*****

```

10.05.93

```
BOOLEAN init_acquisit()
initialise l'acquisition :
    calcule le nombre de points de la courbe
    alloue dynamiquement de la mémoire à la structure résultat
    initialise etat.instant à la valeur 0
    initialise etat.instant_relax à la valeur entree.relax_time
    parce que l'on fait une relaxation avant toute acquisition
*****/
BOOLEAN init_acquisit()

{
    if (etat.exit_demande) {
        if (user_ask()) {
            return(FALSE);
        };
    };

    entrees.nb_points = (entrees.dura_time / entrees.acq_periode) + 1;
    resu = (struct resultat *)calloc(entrees.nb_points, sizeof(struct
resultat));
    if (resu==NULL) {
        printf("...Nouvelle acquisition...pas de mémoire\n");
        return (FALSE);
    };

    printf(".....Nouvelle acquisition (r:%6ld d:%6ld) %s\n",
        etat.r, etat.d,
        infos.manip);

    etat.instant = 0;
    etat.inst_relax = entrees.relax_time;
    etat.T = entrees.T0;
    etat.exit_demande = FALSE;
    etat.num_point = 0;
    return(TRUE);
}
```

/*****

25.02.93

```
FILE * existing_file(rep,name,basename)
création du nom complet avec extension (pour distinguer deux
fichiers créés le même jour.
*****/
FILE * existing_file(rep,name,basename)
    char rep[], name[];
    char basename[];
```

```

{
FILE * fb;
char end_char;
char nom[100];

/* Création du nom complet avec extension.      */
end_char=rep[strlen(rep)-1];
sprintf(basename, "%s", name);
if (rep[0]==0)
    sprintf(nom, "%s", basename);
else if ((end_char!=':') && (end_char!='\\'))
    sprintf(nom, "%s\\%s", rep, basename);
else
    sprintf(nom, "%s%s", rep, basename);
fb=fopen(nom, "at");
return(fb);
}

/*****
25.02.93
FILE * unique_file(rep,name,basename)
*****/
FILE * unique_file(rep,name,basename)
char rep[], name[];
char basename[];

{
    FILE * fb;
char end_char;
int i;
char nom[100];

    fb=(FILE*)-1;
for (i=1;(fb!=NULL)&&(i<=999);i++) {

    /* Création du nom complet avec extension.      */

end_char=rep[strlen(rep)-1];
sprintf(basename, "%s.%03d", name, i);

if (rep[0]==0)
    sprintf(nom, "%s", basename);
else if ((end_char!=':') && (end_char!='\\'))
    sprintf(nom, "%s\\%s", rep, basename);
else
    sprintf(nom, "%s%s", rep, basename);
if((fb = fopen(nom, "r")) != NULL) fclose(fb);

};
}

```

```
fb = NULL;
if (i<=1000) fb=fopen(nom, "wt");
return(fb);
}
```

```

/*****
14.04.93
void close_acquisit()
fin d'une acquisition, création d'un fichier résultat (génération
automatique du nom sous la forme 930217.001) et remplissage du
fichier avec les points de mesure, le fichier est ensuite complété
par les instructions pascal permettant à TraceCourbe de le traiter
*****/
void close_acquisit()

{
    FILE *fb;
    char dateChaine [14];
    int i;
    char basename[20];
    time_t now;

    if (etat.noir_on) set_shutter_noir(FALSE);
    if (etat.rouge_on) set_shutter_rouge(FALSE);

/* Création de la partie principale du nom du fichier          */

    now = time(NULL);
    entrees.date = localtime(&now);
    printf("La date d'aujourd'hui est : %d %d %d\n",
           entrees.date->tm_mday,
           entrees.date->tm_mon+1,
           entrees.date->tm_year);

    sprintf(dateChaine, "__%02i%02i%02i",
            entrees.date->tm_year,
            entrees.date->tm_mon+1,
            entrees.date->tm_mday);

/* Si on a ouvert le fichier, on écrit le résultat          */

    fb = unique_file(entrees.dest_dir,dateChaine,basename);
    if (fb != NULL) {

        printf(".....Ecriture du fichier résultat %s\n",
               basename);

        if (listing!=NULL)
            fprintf(listing,
                   "%12s %6ld %6ld #fichier, angle, position\n",
                   basename, etat.r, etat.d);

/* Entête du document (en commentaires dans le pg pascal) : */

```

```

fprintf(fb, "{\n");
fprintf(fb, "%02i %02i %02i\n",
        entrees.date->tm_year,
        entrees.date->tm_mon+1,
        entrees.date->tm_mday);
fprintf(fb, "%s\n", infos.manip);
fprintf(fb, "%s\n", infos.user_name);
fprintf(fb, "%s\n", infos.name);
fprintf(fb, "%11s      largeur du cristal\n", infos.width);
fprintf(fb, "%11s      profondeur du cristal\n", infos.depth);
fprintf(fb, "%11s      hauteur du cristal\n", infos.height);
fprintf(fb, "%11s      puissance du laser\n", infos.power);
fprintf(fb, "%11s      longueur d'onde laser\n", infos.lambda);
fprintf(fb, "%11ld      polarisation incidente en mdegrés /
horizontale\n", etat.p);
fprintf(fb, "%11ld      durée d'acquisition en 1/60
s\n", entrees.dura_time);
fprintf(fb, "%11ld      période d'acquisition en 1/60
\n", entrees.acq_periode);
fprintf(fb, "%11ld      durée de relaxation en 1/60
\n", entrees.relax_time);
fprintf(fb, "%5ld %5ld      angle et position courants\n",
        etat.r,
        etat.d);
fprintf(fb, "%5ld %5ld %5ld      angle de départ / d'arrivée et pas en
mdegrés\n",
        entrees.r0,
        entrees.r1,
        entrees.rpas);
fprintf(fb, "%5ld %5ld %5ld      position transversale de départ /
d'arrivée et pas en microns\n",
        entrees.d0/10,
        entrees.d1/10,
        entrees.dpas/10);
fprintf(fb, "}\n");

/* instructions en pascal qui serviront à générer les courbes */

fprintf(fb, "type tableau = array[1..%d] of
integer;\n", 3*entrees.nb_points);
fprintf(fb, "const tab : tableau = ( \n");

/* on replit le tableau à l'aide des points de mesure : */

for (i=0;i<entrees.nb_points;i++) {
    fprintf(fb, "%4i %6i %6i\n",

```

```

        i,
        resu[i].voie1,
        resu[i].voie2);
};

/* instructions en pascal qui serviront à générer les courbes */

    fprintf(fb,"); \n");
    fprintf(fb,"type  points  = record x, y : real; end;\n");
    fprintf(fb,"      fonction = array[1..%d] of
points;\n\n",entrees.nb_points);
    fprintf(fb,"var    i : integer;\n");
    fprintf(fb,"      fct, gct : fonction;\n");
    fprintf(fb,"      t : tableau;\n\n");
    fprintf(fb,"const  debut = 1;\n");
    fprintf(fb,"      fin  = %d;\n",entrees.nb_points);
    fprintf(fb,"      bas  = 0;\n");
    fprintf(fb,"      haut = 4095;\n\n");
    fprintf(fb,"function
f(x:real):real:=interpole(@fct,%d,interpoleSplines,x);\n",
            entrees.nb_points);

    fprintf(fb,"function
g(x:real):real:=interpole(@gct,%d,interpoleSplines,x);\n\n",
            entrees.nb_points);

    fprintf(fb,"begin\n");
    fprintf(fb,"  t := tab;\n");
    fprintf(fb,"  for i := 1 to %d do\n",entrees.nb_points);
    fprintf(fb,"    begin\n");
    fprintf(fb,"      fct[i].x := i;\n");
    fprintf(fb,"      if (t[3 * i - 1] <> 0) then fct[i].y := t[3 *
i - 1]\n");
    fprintf(fb,"      else fct[i].y := fct[ i - 1].y;\n");
    fprintf(fb,"      gct[i].x := i;\n");
    fprintf(fb,"      gct[i].y := t[3 * i];\n");
    fprintf(fb,"    end;\n\n");
    fprintf(fb,"  echelles (lineaire,debut,fin,bas,haut);\n");
    fprintf(fb,"  {tracer (@g,debut,fin);}\n");
    fprintf(fb,"  tracer (@f,debut,fin);\n");
    fprintf(fb,"  WriteString('r = %ld° d = %ldµ T = %ldm°C Ii = %s
Acqu de %lds Relax de %lds',1,1);\n",
            etat.r/1000,
            etat.d/10,
            etat.T,
            infos.power,
            entrees.dura_time/60,
            entrees.relax_time/60);
    fprintf(fb,"  WriteString('%s',1,2);\n",basename);

```

```

    fprintf(fb, "end;\n");

    fclose(fb);
};

printf(".....Fin d'acquisition\n\n\n");
if (resu!=NULL) free((void*)resu);
}

/*****
26.03.93
void get_manip_params()
on demande à l'utilisateur d'entrer les conditions expérimentales,
soit au clavier, soit sous forme d'un fichier de configuration,
soit encore en utilisant des valeurs par défaut
et on remplit les structures info et entrees
*****/
void get_manip_params()

{
    FILE *fd;

    time_t now;
    char ligne[NAMELEN];
    int reponse;

/***** choix pour l'initialisation *****/

    printf("\n\n Initialisation de la manip :\n\n");
    printf("Entrez votre choix :\n\n");
    printf(" 0 = valeurs par défaut\n" );
    printf(" 1 = valeurs entrées au clavier\n");
    printf(" 2 = utilisation d'un fichier de configuration\n");
    printf("\n");
    printf("          Votre réponse svp : ");
    while((scanf("%i",&reponse)==0) || (reponse<0) || (reponse>10)) {
        printf("\n          Votre réponse svp : ");
        while (getchar()!='\n');
    };

    switch (reponse) {

/**** valeurs par défaut *****/
        case 0 :
            entrees.r0 = 10000;
            entrees.r1 = 12000;
            entrees.rpas = 1000;

```



```

        entrees.d0 = 10000;
        entrees.d1 = 12000;
        entrees.dpas = 1000;
        entrees.dura_time = 600;
        entrees.relax_time = 600;
        entrees.acq_periode = 60;
        entrees.p0=0;
        entrees.p1=0;
        entrees.ppas=1;
        entrees.T0=0;
        entrees.T1=0;
        entrees.Tpas=1;
        entrees.gain = 1;
        break;

        case 1 :
/**** valeurs entrées au clavier *****/
printf("angle de départ en 1/1000 degrés ? ");
scanf("%ld",&entrees.r0);
printf("angle d'arrivée en 1/1000 degrés ? ");
scanf("%ld",&entrees.r1);
printf("pas angulaire en 1/1000 degrés ? ");
scanf("%ld",&entrees.rpas);
printf("%ld\n",entrees.rpas);

printf("position transversale de départ en 1/10000mm ? ");
scanf("%ld",&entrees.d0);
printf("position transversale d'arrivée en 1/10000mm ? ");
scanf("%ld",&entrees.d1);
printf("pas transversal en 1/10000mm ? ");
scanf("%ld",&entrees.dpas);

printf(" durée de l'acquisition en 1/60 s ? ");
scanf("%ld",&entrees.dura_time);
printf("durée de relaxation en 1/60 s ? ");
scanf("%ld",&entrees.relax_time);
printf("période d'acquisition en 1/60 s ? ");
scanf("%ld",&entrees.acq_periode);

printf("combien de voies doit on acquérir (entre 1 et 4) ?\n ");
scanf("%d",&entrees.nb_de_voies);
printf("gain pour la carte LabNB (1, 2, 5, 10, 20, 50 ou 100) ?\n ");
scanf("%d",&entrees.gain);

printf("longueur d'onde laser en nm ? ");
scanf("%s",infos.lambda);
    printf("puissance incidente du laser en mW ? ");
scanf("%s",infos.power);
    printf("diametre du faisceau en mm ? ");

```

```

scanf("%s",infos.waist);
    printf("largeur du cristal en mm ? ");
scanf("%s",infos.width);
    printf("hauteur du cristal en mm ? ");
scanf("%s",infos.height);
    printf("profondeur du cristal en mm ? ");
scanf("%s",infos.depth);
    printf("nom de l'utilisateur ? ");
scanf("%s",infos.user_name);
    printf("nom du cristal ? ");
scanf("%s",infos.name);
    printf("nom de la manipulation ? ");
scanf("%s",infos.manip);break;

/***** valeurs lues sur un fichier de configuration *****/
    case 2 :
        now = time(NULL);
        entrees.date = localtime(&now);
printf("La date d'aujourd'hui est : %d %d %d\n",
        entrees.date->tm_mday,
        entrees.date->tm_mon+1,
        entrees.date->tm_year);

printf ("Entrez le nom du fichier de configuration de la manip\n");
    scanf("%s",entrees.filename);

printf ("Début de la manip de %s\n",entrees.filename);
fd = fopen(entrees.filename,"r");
if (fd!=NULL)    {
    fgets(infos.manip,NAMELEN,fd);
    infos.manip[strlen(infos.manip)-1]=0;

    fgets(infos.user_name,NAMELEN,fd);
    infos.user_name[strlen(infos.user_name)-1]=0;

    fgets(infos.name,NAMELEN,fd);
    infos.name[strlen(infos.name)-1]=0;

    fgets(entrees.dest_dir,NAMELEN,fd);
    entrees.dest_dir[strlen(entrees.dest_dir)-1]=0;

    fgets(ligne,NAMELEN,fd);
    sscanf(ligne,"%ld %ld %ld\n",
            &entrees.r0,
            &entrees.r1,
            &entrees.rpas);

```

```

fgets(ligne,NAMELEN,fd);
sscanf(ligne,"%ld %ld %ld\n",
        &entrees.d0,
        &entrees.d1,
        &entrees.dpas);

fgets(ligne,NAMELEN,fd);
sscanf(ligne,"%ld %ld %ld\n",
        &entrees.p0,
        &entrees.p1,
        &entrees.ppas);

fgets(ligne,NAMELEN,fd);
sscanf(ligne,"%ld %ld %ld\n",
        &entrees.T0,
        &entrees.T1,
        &entrees.Tpas);

fgets(ligne,NAMELEN,fd);
sscanf(ligne,"%ld %ld %ld\n",
        &entrees.dura_time,
        &entrees.relax_time,
        &entrees.acq_periode);

fgets(ligne,NAMELEN,fd);
sscanf(ligne,"%d %d %d\n",
        &entrees.gain,
        &entrees.nb_de_voies,
        &entrees.slot);

fgets(ligne,NAMELEN,fd);
sscanf(ligne,"%s %s %s\n",
        infos.lambda,
        infos.power,
        infos.waist
        );

fgets(ligne,NAMELEN,fd);
sscanf(ligne,"%s %s %s %s %s\n",
        infos.width,
        infos.depth,
        infos.height
        );

fclose(fd);
};
break;

};
}

/*****

```

25.02.93

```
void init_manip(filename)
```

Cette procédure initialise la manipulation, c'est à dire
positionne les moteurs sur la position d'origine et initialise
les variables d'état aux valeurs d'origine

```
*****/
```

```
void init_manip(filename)
```

```
char filename[];
```

```
{ FILE * the_file;
```

```
etat.r = entrees.r0;
```

```
etat.d = entrees.d0;
```

```
etat.p = entrees.p0;
```

```
if (filename[0]!=0) {
```

```
the_file = fopen(filename, "r");
```

```
if (the_file!=NULL) {
```

```
fscanf(the_file, "%ld %ld %ld",
```

```
&etat.r,
```

```
&etat.d,
```

```
&etat.p);
```

```
fclose(the_file);
```

```
};
```

```
};
```

```
if (etat.noir_on) set_shutter_noir(FALSE);
```

```
if (etat.rouge_on) set_shutter_rouge(FALSE);
```

```
set_r(etat.r, TRUE);
```

```
set_d(etat.d, TRUE);
```

```
fin_manip = FALSE;
```

```
}
```

```
*****/
```

14.05.93

```
void do_manip()
```

execution de la manip :

gestion des shutters et de l'acquisition

```
*****/
```

```
void do_manip()
```

```
{
```

```
int voie1, voie2; /* Résultat d'acquisition des voies */
```

```

/* on détecte s'il faut démarrer une relaxation
si oui, on ouvre le shutter rouge et on note à quel instant la relaxation
a débuté
si non, on regarde s'il y a lieu de fermer le shutter rouge car fin de
relaxation */

```

```

if ((etat.inst_relax>0)&&(etat.rouge_on==FALSE)
    &&(etat.noir_on==FALSE))    {
    printf("\n      ----> Relaxation\n");
    set_shutter_rouge(TRUE);
    etat.instant_relax_initial = TickCount();
} else if ((etat.inst_relax==0)&&(etat.rouge_on))    {
    set_shutter_rouge(FALSE);
};

```

```

/* on détecte s'il faut démarrer une acquisition,
si oui, on ouvre le shutter noir et on note à quel instant l'acquisition a
démarré,
si non, on regarde s'il y a lieu de fermer le shutter noir car fin
d'acquisition */

```

```

if ((etat.instant>0)&&(etat.noir_on==FALSE)
    &&(etat.rouge_on==FALSE))    {
    printf("\n      ----> Acquisition\n");
    set_shutter_noir(TRUE);
    etat.instant_initial = TickCount();
} else if ((etat.instant<=0)&&(etat.noir_on))    {
    set_shutter_noir(FALSE);
};

```

```

/* Si une acquisition doit être menée :
on lance acquisit(), on remplit le tableau de mesure resu, on incrémente
la variable d'état num_point, et on décrémente la borne fuyante tps_mod de
la période d'acq. */

```

```

if (etat.instant>0)    {
    if(etat.instant<=etat.tps_mod)    {
        acquisit(&voie1, &voie2);
        if((etat.num_point < 0) || (etat.num_point >=
entrees.nb_points))
        {
            printf("erreur debornes\n");
            exit(0);
        }
    }
}

```

```

    resu[etat.num_point].voie1=voie1;
    etat.num_point ++;

    if (entrees.acq_periode>30) {
    printf("%d\n",voie1);
    };
    resu[etat.num_point].voie2=voie2;
    etat.tps_mod-=entrees.acq_periode;

}
};

/* s'il y a des choses à faire pendant la relaxation, le noter ici : */

if (etat.inst_relax>0) {
};

/* actualisation des variables temporelles */

if (etat.instant>0) {
    etat.instant = entrees.dura_time - (TickCount() -
etat.instant_initial);
    if (etat.instant<=0) {
        etat.instant = 0;
    };
};

if (etat.inst_relax>0) {
    etat.inst_relax=entrees.relax_time-(TickCount()-
etat.instant_relax_initial);
    if (etat.inst_relax<=0) {
        etat.inst_relax = 0;
        etat.instant = entrees.dura_time + 1;
        etat.tps_mod = entrees.dura_time + 1;
    };
};

/* Si idle (ni relax, ni acquisition), on vérifie s'il faut passer à une
nouvelle acquisition après déplacement des moteurs. */

if ((etat.instant==0)&&(etat.inst_relax==0)
&&(etat.rouge_on==FALSE)&&(etat.noir_on==FALSE)) {
    if (etat.d < entrees.d1) {
        close_acquisit();
        set_d(etat.d + entrees.dpas,TRUE);
        if (!init_acquisit())
            fin_manip = TRUE;
    } else if (etat.r < entrees.r1) {

```

```

        close_acquisit();
        set_d(entrees.d0,TRUE);
        set_r(etat.r + entrees.rpas,TRUE);
        if (!init_acquisit())
            fin_manip = TRUE;
    } else fin_manip=TRUE;
};
}

/*****
25.02.93
BOOLEAN user_break()
gestion des arrêts d'urgence et possibilité de reprise propre.
*****/
BOOLEAN user_break()

{
    char c;
    int reponse,escape;
    ETAT *etat_ptr;

    if (!kbhit()) return(FALSE); /* Pas d'action */
        scanf("%i",&escape);
    if (escape==0)    {
        etat.exit_demande = TRUE;
        return(FALSE);
    } else {
        printf("\n\n    ARRET UTILISATEUR DEMANDE\n\n");
        set_shutter_noir(FALSE);
        set_shutter_rouge(FALSE);
        printf("Entrez votre choix :\n\n");
        printf("    0 = abandon complet\n" );
        printf("    1 = continuer comme si de rien n'était\n");
        printf("    2 = passer à l'acquisition suivante avec
prérelaxation\n");
        printf("    3 = passer à l'acquisition suivante sans
prérelaxation\n");
        printf("    4 = reprendre l'acquisition en cours avec
prérelaxation\n");
        printf("    5 = reprendre l'acquisition en cours sans
prérelaxation\n");
        printf("    6 = passer à la manipulation suivante avec
prérelaxation\n");
        printf("    7 = passer à la manipulation suivante sans
prérelaxation\n");
        printf("    8 = reprendre la manipulation en cours avec
prérelaxation\n");
        printf("    9 = reprendre la manipulation en cours sans
prérelaxation\n");
    }
}

```

```

printf("\n");
printf("                Votre réponse svp : ");
while((scanf("%i",&reponse)==0) || (reponse<0) || (reponse>10)) {
    printf("\n                Votre réponse svp : ");
    while (getchar()!='\n');
};

switch (reponse) {
    case 0 : abandon = TRUE; return(TRUE);
    case 1 : break;
    case 2 : etat.instant = 1; break;
    case 3 : etat.instant = 0; break;
    case 4 : set_d(etat.d - entrees.dpas,FALSE);
            etat.instant = 1; break;
    case 5 : set_d(etat.d - entrees.dpas,FALSE);
            etat.instant = 0; break;
    case 6 : set_d(entrees.d1,FALSE);
            set_r(entrees.r1,FALSE);
            etat.instant = 1;
            return(FALSE);
    case 7 : return(TRUE);
    case 8 : set_d(entrees.d1,FALSE);
            set_r(entrees.r1,FALSE);
            etat.instant = 1;
            manip_num -= 1;
            return(FALSE);
    case 9 : manip_num -= 1;
            return(TRUE);

};
return(FALSE);
};
}

/*****
17.03.93
void main(void)
programme principal : boucle infinie exécutée très rapidement
*****/

void main(void)

{
    int voie1,voie2,i;
    char dateChaine[20];
    char listing_name[100];
    char stat_name[100];

```



```

char list_name[100];
FILE *stat;
time_t now;

abandon = FALSE;
debug = FALSE;
stat_name[0]=0;
list_name[0]=0;

reset_all();

    get_manip_params();

    printf("La manip s'appelle : %s\n",infos.manip);
    printf("L'utilisateur s'appelle : %s\n",infos.user_name);
    printf("Le cristal est un : %s\n",infos.name);
delay(120);
    printf("angle de départ en 1/1000 degrés : %ld\n ",entrees.r0);
    printf("angle d'arrivée en 1/1000 degrés : %ld\n ",entrees.r1);
    printf("pas angulaire en 1/1000 degrés : %ld\n ",entrees.rpas);
delay(120);
    printf("position transversale de départ en 1/10000mm :
%ld\n",entrees.d0);
    printf("position transversale d'arrivée en 1/10000mm :
%ld\n",entrees.d1);
    printf("pas transversal en 1/10000mm :%ld\n",entrees.dpas);
delay(200);
    printf(" durée de l'acquisition en 1/60 s : %ld\n ",entrees.dura_time);
    printf("durée de relaxation en 1/60 s : %ld\n ",entrees.relax_time);
    printf("période d'acquisition en 1/60 s : %ld\n ",entrees.acq_periode);
delay(120);
    printf("on va acquérir %d voies \n ",entrees.nb_de_voies);
    printf("la carte Lab NB est dans le slot %d \n ",entrees.slot);
    printf("le gain pour la carte LabNB est : %d\n ",entrees.gain);
    printf("longueur d'onde laser en nm : %s\n",infos.lambda);
    printf("puissance incidente du laser : %s\n",infos.power);
    printf("diamètre du faisceau en mm : %d\n ",infos.waist);
delay(120);
    printf("largeur du cristal en mm : %s\n ",infos.width);
    printf("hauteur du cristal en mm : %s\n ",infos.height);
    printf("profondeur du cristal en mm : %s\n ",infos.depth);
delay(120);
    now = time(NULL);
    entrees.date = localtime(&now);
    sprintf(dateChaine,"LIST%02i%02i%02i",
            entrees.date->tm_year,
            entrees.date->tm_mon+1,
            entrees.date->tm_mday);

```

```

if (list_name[0]==0)
    listing = unique_file(entrees.dest_dir,dateChaine,
        listing_name);
else {
    listing = existing_file(entrees.dest_dir,list_name,
        listing_name);
    list_name[0]=0;
};
printf("          Fichier listing : %s\n",listing_name);

init_manip(stat_name);
stat_name[0]=0;

if (init_acquisit())
    while (! (user_break() || fin_manip)) {
        do_manip();
    };

if (!etat.exit_demande) {
    close_acquisit();
    if (listing!=NULL) fclose(listing);
    listing = NULL;
} else {
    if (listing!=NULL) fclose(listing);
    listing = NULL;
    stat = fopen("cristal.ste","wt");
    fprintf(stat,"%ld %ld %ld",
        etat.r,etat.d,etat.p);
    fclose(stat);
    stat = fopen("reprise.bat","wt");
    fprintf(stat,"@echo off\n");
    fprintf(stat,"if %0_ == _reprise_ copy reprise.bat
    $$repris.bat\n");
    fprintf(stat,"if %0_ == _reprise_ $$repris\n");
    fprintf(stat,"del reprise.bat\n");
    fprintf(stat,"ren cristal.ste _cristal.ste\n");
    fprintf(stat,"cristal -r _cristal.ste -l %s",
        listing_name);
    fprintf(stat,"\n");
    fprintf(stat,"del _cristal.ste\n");
    fprintf(stat,"del $$repris.bat");
    fclose(stat);
    printf("\n\n\n\n");
    printf("Manipulation sauvegardÇe...\n\n");

```

```
printf("pour reprendre, tapez : REPRISE\n");
```

```
};
```

```
}
```

Inconnu.c

```
/******  
version          23.08.93  
fichier          inconnu.c  
utilité         définition de fonctions turboC inconnues en ThinkC  
*****/  
#include        "inconnu.h"  
#include        <events.h>  
#include        <time.h>  
#include        <stdio.h>  
  
/******  
23.08.93  
void delay (duree)  
définition de la fonction delay  
duree est la durée exprimée en 1/60 de seconde  
*****/  
  
void delay (long duree)  
{  
long instant_initial;  
long instant;  
EventRecord evt;  
  
instant_initial = TickCount();  
while(((instant_initial-TickCount()+duree)>0)  
{  
if (WaitNextEvent(-1,&evt,0,NULL))    {};  
SysBeep(1);  
}  
}  
  
/******  
17.02.93  
isPressed(k)  
détection que l'on appuyé sur la touche i  
*****/  
isPressed(k)  
unsigned short k;  
{  
unsigned char km[16];  
GetKeys(km);
```

```
return((km[k>>3]>>(k&7))&1);
```

```
}
```

```
/*  
23.02.93  
kbhit()  
détecte que l'on appuyé sur une touche quelconque  
*/  
kbhit()  
{  
char a;  
EventRecord keyEvent;  
return(EventAvail(keyDownMask, &keyEvent));  
a = getchar();  
}
```

Shut.c

```
/*  
version      24.03.93  
fichier      shut.c  
utilité      commande des shutters avec la carte LabNB  
*/  
#include <stdio.h>  
#include <OSUtils.h>  
#include "shut.h"  
#include "NI_DAO_MAC.h"  
#include "inconnu.h"  
  
char dig;  
  
char longtobin (val)  
long val;  
{  
int i;  
long reste;  
char retour,masque;  
for(i = 0,retour = 0,masque = 1;i < 8;i ++,val/=10,masque<<=1)  
{  
reste = val%10;  
if(reste == 1)  
retour |= masque;  
else if(reste != 0)  
{
```

```

        fprintf(stderr, "valeur incorrecte\n");
        exit(0);
    }
}
return retour;
}

/***** allumage du faisceau principal
*****/
void shutter_noir_on()
{
    int i,a;
    short slot, port;
    port = 0; /* port A */
    slot = 2;

    a = 10;
    for(i = 0;i < 5;i ++)
    {
        commande(1001,a,MN); /* 200 */
        commande(1101,a,MN); /* 204 */
    }
}

/***** extinction du faisceau principal *****/
void shutter_noir_off()
{
    int i,a;
    short slot, port;
    port = 0; /* port A */
    slot = 2;

    a = 10;

    for(i = 0;i < 5;i ++)
    {
        commande(1,a,MN); /* 192 */
        commande(101,a,MN); /* 196 */
    }
}

/***** allumage du faisceau d'effacement
*****/
void shutter_rouge_on()
{
    int i,a;
    short slot, port;
    port = 0; /* port A */

```

```

slot = 2;
a = 10;
for(i = 0;i < 5;i ++)
{
    commande(10000000,a,MR);          /* 145-128 */
    commande(10000010,a,MR);        /* 147-128 */
}
}

/***** extinction du faisceau d'effacement
*****/
void shutter_rouge_off()

{
int i,a;
short slot, port;
port = 0;          /* port A */
slot = 2;
a = 10;
for(i = 0;i < 5;i ++)
{
    commande(10100000,a,MR);        /* 177-128 */
    commande(10100010,a,MR);        /* 179-128 */
}

}

/****fonction commande
23.03.93*****/
void commande (long mot,int retard,char masque)

{
char valeur;
short slot, port;
port = 0;          /* port A */
slot = 2;

valeur = longtobin(mot);
dig &= (~masque);
dig |= (valeur&masque);
DIG_Out_Port(slot,port,dig);
delay(retard/10);
}

```

Moteur.c

```

/*****
11.02.93
moteur.c
*****/
#include <stdio.h>
#define PROTOTYPES
#include "decl.h"
#include "moteur.h"

int bd;

void erreur()
{
    fprintf(stderr, "GPIB function call error:\n");
    fprintf(stderr, "ibsta=0x%x, iberr=0x%d,", ibsta, iberr);
    fprintf(stderr, " ibcnt=0x%ld\n", ibcnt);
}

int position ( axe, pos, mode )
int axe;
long pos;    /* Position à atteindre en pas
*/
int mode;    /* RELATIF ,ABSOLU ou RETOUR au 0 mécanique
*/

    /* Positionne le moteur de l'axe indiqué à la position          */
    /* demandée.                                                    */
    /* RETOUR : recherche le zéro mécanique (pos indifférent)      */
    /* ABSOLU : positionnement absolu. Il faut avoir recherché    */
    /* le zéro mécanique avant de pouvoir l'utiliser              */
    /* RELATIF: déplacement relatif à la position courante.      */
    /*                                                              */

{
    long taille;
    char commande [20];
    char valeur [20];
    bd = ibfind("gpib0");
    if (ibsic (bd) & ERR) erreur();

    switch (axe)
    {
        case AXE_TRANSLATION:

```

```

    bd = ibfind("microconDR");
    if (ibsta & ERR) erreur();
    strcpy(commande, "1");
    break;
case AXE_ROTATION:
    bd = ibfind("microconDR");
    if (ibsta & ERR) erreur();
    strcpy(commande, "2");
    break;
case AXE_POLARISATION:
    bd = ibfind("microconPH");
    if (ibsta & ERR) erreur();
    strcpy(commande, "1");
    break;
case AXE_HAUTEUR:
    bd = ibfind("microconPH");
    if (ibsta & ERR) erreur();
    strcpy(commande, "2");
    break;
default :
    return;
}

switch (mode)
{
case RETOUR:
    strcat(commande, "OR");
    break;
case ABSOLU:
    strcat(commande, "PA");
    break;
case RELATIF:
    strcat(commande, "PR");
    break;
default:
    return;
}

sprintf(valeur, "%ld", pos);

strcat(commande, valeur);
strcat(commande, "\r\n");
taille = strlen(commande);
ibwrt (bd, commande, taille);
if (ibsta & ERR) erreur();
}

```


SCANFICH 2.0

```

/*****
scanfich 2.0
version          02.03.93
fichier          scanfich.c
machine         mac quadra
Exploitation des fichiers Trace Courbe des résultats expérimentaux
*****/

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <time.h>
#include <float.h>
#include <events.h>
#include <Files.h>
#include <string.h>
#include <StandardFile.h>
#include "myown.h"
#include "inconnu.h"

/*****
13.10.93
fonction traduisant getdirent
comment trouver les caractéristiques du fichier situé à la
i-ième ligne du dossier rangé par ordre alphabétique.
Remarque : ne marche pas avec les disquettes 400Ko (???)
*****/
OSErr GetDirEntry (volRef, index, name, fdType, fdCreator)

int          volRef, index;
char* name;
OSType *fdType, *fdCreator;

{
    HParamBlockRec  param;
    OSErr           err;

    param.fileParam.ioCompletion = NULL;
    param.fileParam.ioNamePtr = (StringPtr)name;
    param.fileParam.ioVRefNum = volRef;
    param.fileParam.ioFVersNum = 0;
    param.fileParam.ioFDirIndex = index;
    param.fileParam.ioDirID = 0;
    err = PBGetCatInfo(&param, FALSE);
    if ((param.fileParam.ioFlAttrib&16) == 16) {

```

```

    *(long*)fdCreator = 0;
    *(long*)fdType = 0;
}
else
{
    *fdCreator = param.fileParam.ioFlFndrInfo.fdCreator;
    *fdType = param.fileParam.ioFlFndrInfo.fdType;
    if (*(long*)fdCreator == 0) *fdCreator = '????';
    if (*(long*)fdType == 0) *fdType = '????';
};
return err;
}

/*****
*
03.11.93
void main(void)
*****/

void main(void)

{
    int          i,j,k;
    short        numero1,numero2;      /* numéro du dossier (volume)
                                        dans lequel se trouvent
                                        (resp.) les fichiers à
                                        scanner et le fichier bilan
                                        */

    char         listing_name[100];
    char         name[100];
    char         stat_name[100];
    char         list_name[100];
    char         ligne[NAMELEN];
    char         bidon[NAMELEN];
    char         origName[NAMELEN];
    char         prompt[NAMELEN];
    char         temporaire1[NAMELEN];
    char         temporaire2[NAMELEN];
    char         temporaire3[NAMELEN];
    char         temporaire4[NAMELEN];
    int          tempo1,tempo2,tempo3,tempo4,tmax,lmax,t1,t2,t3;
    long int     tempor1,tempor2,tempor3,tempor4,R,D;
    float        Imoy;
    Boolean      fin,error;
    SFReply      theReply;
    Point        where;

```

```

SFTypeList      typeList;
Str255          fName;
OSType          fdType, fdCreate;

FILE *fd;                /* fichier que l'on va scanner          */
FILE *list;              /* fichier pour lister les résultats */
*/

time_t now;

printf("scanfich version 2.0 du 03.11.93. \n\n\n\n");
printf("Indiquez le dossier à scanner. \n\n\n\n");

/*****
choix d'un dossier source (dossier dans lequel on va scanner
tous les fichiers) ;
on va en fait choisir un fichier par la commande SFGetFile
ce qui permet de sélectionner un fichier et de récupérer
le numéro (numero1) du volume (dossier) contenant ce fichier.
On scannera ensuite tous les fichiers contenus dans le dossier
ayant ce numéro.
*****/
/
typeList[0]='TEXT';
where.h=72;
where.v=72;
SFGetFile(where,
           0,
           NULL,
           1,
           &typeList,
           0,
           &theReply);
numero1 =theReply.vRefNum;

/*****
choix d'un dossier destination (dossier dans lequel on va sauvegarder le
fichier bilan) ;
on va faire apparaitre une fenêtre du style "engeristrer sous".
Ce dossier (volume) sera repéré par le numéro numero2.
*****/
strcpy(promt, (char*)" \pfichier destination ?");
SFPutFile(where,
          promt,
          "\p",
          NULL,
          &theReply);

```

```

numero2 = theReply.vRefNum;
sprintf(list_name, "%#s", theReply.fName);

/*****
création du fichier bilan (fichier destination)
*****/

SetVol(0, numero2);

list = fopen(list_name, "w");
fprintf(list, "%s\t%s\t%s\t%s\t%s\t%s\t%s\t%s\n",
        "BaTiO3 chinois ; ",
        "T = 15°C",
        " paramètre D  ",
        " ",
        " ",
        " ",
        " ",
        " ");

fprintf(list, "%s\t%s\t%s\t%s\t%s\t%s\t%s\t%s\n",
        "angle R (mdeg) ",
        "D (*0.0001mm) ",
        "Maximum de I conjuguée sur 240s  ",
        "t (I conj max) ",
        "Valeur moyenne de I conjuguée sur 240s  ",
        "t1 (s) ",
        "t2 (s) ",
        "Apparition de l'onde conjuguée au bout de ... s  ");

/*****
parcourir le répertoire contenant les fichiers à scanner
*****/

SetVol(0, numero1);
error=FALSE;

for (k=1;!error;k++) {

        error=(GetDirEntry(numero1,
                                k,
                                (char*) fName,
                                &fdType,
                                &fdCreate) !=0);

```

```

sprintf(stat_name, "%#s", fName);
if ((!error)&&(fdType=='TEXT')&&(numero1!=numero2)
    ||(strcmp(list_name,stat_name)!=0)) {
    printf("Nous allons extraire des informations du fichier
%s\n",stat_name);
    fd = fopen(stat_name,"r");
    if (fd!=NULL) {
        fgets(bidon,NAMELEN,fd);
            /*1 accolade*/
        fgets(bidon,NAMELEN,fd);
            /*2 date de la manip*/
        fgets(bidon,NAMELEN,fd);
            /*3 nom de la manip*/
        fgets(bidon,NAMELEN,fd);
            /*4 nom du manipulateur*/
        fgets(bidon,NAMELEN,fd);
            /*5 nom du cristal, gainBob*/
        fgets(bidon,NAMELEN,fd);
            /*6 largeur du cristal*/
        fgets(bidon,NAMELEN,fd);
            /*7 profondeur du cristal*/
        fgets(bidon,NAMELEN,fd);
            /*8 hauteur du cristal*/
        fgets(bidon,NAMELEN,fd);
            /*9 puissance du laser*/
        fgets(bidon,NAMELEN,fd);
            /*10 logueur d'onde du laser*/
        fgets(bidon,NAMELEN,fd);
            /*11 polarisation*/
        fgets(bidon,NAMELEN,fd);
            /*12 duree de l'acquisition*/
        fgets(bidon,NAMELEN,fd);
            /*13 periode d'acquisition*/
        fgets(bidon,NAMELEN,fd);
            /*14 duree de la relaxation*/
        fgets(ligne,NAMELEN,fd);
        sscanf(ligne,"%ld %ld %s %s\n",
                &R,
                &D,
                temporaire3,
                temporaire4);
            /*15 angle et position courants*/
        if
        ((strcmp(temporaire3,"angle")==0)&&(strcmp(temporaire4,"et")==0)) {
            fprintf(list,"%ld\t%ld\t",
                    R,
                    D);
        }
    }
}

```

```

fgets (bidon,NAMELEN,fd);          /*16*/
fgets (bidon,NAMELEN,fd);          /*17*/
fgets (bidon,NAMELEN,fd);          /*18*/
fgets (bidon,NAMELEN,fd);          /*19*/
fgets (bidon,NAMELEN,fd);          /*20*/
fgets (ligne,NAMELEN,fd);
sscanf (ligne,"%i %i %i\n",
        &tempo1,
        &tempo2,
        &tempo3);
if (tempo1==0) {
    fin = FALSE;
    Imax = tempo2;
    tmax = tempo1;
    t1 = tempo1;
    t2 = tempo1;
    t3 = tempo1;
    Imoy = 1;
    for (i=1;!fin;i++) {
        fgets (ligne,NAMELEN,fd);
        if (ligne[0] == ')') {
            fin = TRUE ;
        };
        if (!fin) {
            sscanf (ligne,"%i %i %i\n",
                    &tempo1,
                    &tempo2,
                    &tempo3);
            if(tempo2>Imax) {
                Imax = tempo2;
                tmax = tempo1;
            };
            if((tempo2>20)&&(t1==0)) {
                t1 = tempo1;
            }
            if((tempo2>40)&&(t2==0)) {
                t2 = tempo1;
            }
            if((tempo2>60)&&(t3==0)) {
                t3 = tempo1;
            }
            Imoy += tempo2;
        }
    }
    i--;
    if(i!=0) {
        Imoy = Imoy/i;
    }
}

```

```

    }

    if(t1==0) {
        t1=i;
    }
    if(t2==0) {
        t2=i;
    }
    if(t3==0) {
        t3=i;
    }

    fprintf(list, "%4i\t%4i\t%f\t%4i\t%4i\t%4i\n",
            Imax,
            tmax,
            Imoy,
            t1,
            t2,
            t3);
}
fclose(fd);
/*fermeture du fichier à scanner*/
}

};
/*****
fermer le fichier bilan
*****/
};
fclose(list);
}

```

Coefficient de couplage en fonction des angles

```
{*****
Simulation de la fonction gamma (coeff de couplage) d'un miroir self-pompé
en configuration CAT d'après le modèle de MacDonald a deux regions
couplees
version du 08.02.94
*****}

const corr1 = 1;
      corr2 = 1;
      {termes correctifs dont la valeur normale est 1}

type  tab = array[1..3] of real;
      tenseur = array[1..3] of tab;

var   j : complex;
      debut, fin, min, max ,
      {échelles en x et en y}
      delta,r,d2,d1,c,
      {invariants du système d'équations}
      omega,      {pulsation de l'onde optique
                  en fait : "optical frequency" selon McDonald et Feinberg}
      alpha1,     {angle mesure a l'interieur du cristal entre
                  le faisceau incident et l'axe c}
      alpha2,     {angle mesure a l'interieur du cristal entre
                  le faisceau qui "fane" et l'axe c}
      A1,A2,A3,A4,
      {amplitudes complexes des 4 ondes :
      4 : faisceau incident
      3 : faisceau conjugué
      1 et 2 : faisceaux pompe}
      I1,I2,I3,I4,
      {intensités lumineuses correspondantes}
      L,          {longueur d'interaction de couplage}
      r13,r42,r33,
      {coefficients électrooptiques du BaTiO3}
      nmoy,no,ne,
      {indices de réfraction moyen,ordinaire et extraordinaire}
      kb,         {constante de Boltzman}
      T,          {température}
      q,          {charge électrique des porteurs, ici électrons}
      e1,         {lié à la polarisation}
      e2,         {lié à la polarisation}
      c0,         {célérité de la lumière dans le vide}
```



```

lambda,      {longueur d'onde du faisceau incident}
epsilon0,
      {permittivité diélectrique du vide}
N,          {densité de porteurs}
k0          {paramètre lié à la densité de porteurs}
:extended;
      i:integer;
epsilon:tenseur;
      {tenseur de permittivité diélectrique aux basses
      fréquences}

```

```

{*****}
function kg(alpha1,alpha2:extended)
  kg est le vecteur d'onde du réseau d'indice en fonction
  des 2 angles alpha1 et 2.
  *****)
function kg(alpha1,alpha2:extended):extended;
begin
  kg:=corr1*(2*nmoy*omega/c0)*sin((alpha1-alpha2)/2);
end;

```

```

{*****}
function Elec(alpha1,alpha2:extended)
  Elec est le champ électrique créé par les charges photoexcitées.
  *****)
function Elec(alpha1,alpha2:extended):extended;
begin
  Elec:=kB*T*kg(alpha1,alpha2)*e1*e2
        /(q*(1+sqr(kg(alpha1,alpha2)/k0)));
end;

```

```

{*****}
function reff(alpha1,alpha2:extended)
  coefficient effectif electrooptique dans le cas de la polarisation
  extraordinaire
  *****)
function reff(alpha1,alpha2:extended):extended;
begin
  reff:= (
  sqr(sqr(no))*r13*cos(alpha1)*cos(alpha2)
  +
  2*sqr(ne)*sqr(no)*r42*sqr(cos((alpha1+alpha2)/2))
  +
  sqr(sqr(ne))*r33*sin(alpha1)*sin(alpha2)
  )
  *sin((alpha1+alpha2))/2;
end;

```

```

{*****}
function gamma(alpha1,alpha2:extended)
  gamma est le coefficient de couplage
  *****}
function gamma(alpha1,alpha2:extended):extended;
var resu:extended;
begin
  resu:=
  omega/(2*nmoy*c0)
  )
  *
  (
  (reff(alpha1,alpha2)*Elec(alpha1,alpha2))
  /
  (cos((alpha1-alpha2)/2))
  );
  gamma:=resu;
writestring('gamma : '+resu,10,5);
writestring('gamma*L*r/2) : '+resu*L*r/2,10,6);
writestring('tanh(gamma*L*r/2) : '+tanh(resu*L*r/2),10,4);

end;

{*****}
function a(alpha1,alpha2:extended)
  a est une fonction intermédiaire (cf MacDo)
  *****}
function a(alpha1,alpha2:extended):extended;
begin
  a:=sqr(r)*(1-sqr(tanh(gamma(alpha1,alpha2)*L*r/2)));
end;

{*****}
function b(alpha1,alpha2:extended)
  b est une fonction intermédiaire (cf MacDo)
  *****}
function b(alpha1,alpha2:extended):extended;
begin
  b:=sqr(r- 2*tanh(gamma(alpha1,alpha2)*L*r/2))
  -sqr(r*tanh(gamma(alpha1,alpha2)*L*r/2))
end;

{*****}
function Ref(alpha1,alpha2:extended)

```

Ref est la réflectivité du miroir à conjugaison de phase auto-pompé.

*****}

```
function Ref(alpha1,alpha2:extended):extended;
```

```
begin
```

```
  Ref:=(a(alpha1,alpha2)*b(alpha1,alpha2))
```

```
  /(4*(r*r- 1)*sqr(sqr(tanh(gamma(alpha1,alpha2)*L*r/2))))
```

```
end;
```

{*****}

```
function Atracer(alpha2:extended)
```

```
  permet de tracer gamma en fonction de l'unique variable alpha2 ;
```

```
  alpha1 devient un paramètre.
```

```
  c'est aussi ici que l'on passe du radian au degré
```

*****}

```
function Atracer(alpha2:extended):extended;
```

```
begin
```

```
  Atracer:=Ref(alpha1*pi/180,alpha2*pi/180);
```

```
writestring('a : '+a(alpha1,alpha2),10,2);
```

```
writestring('b : '+b(alpha1,alpha2),10,3);
```

```
writestring('Ref : '+Ref(alpha1,alpha2),10,9);
```

```
end;
```

{*****}

```
PROGRAMME PRINCIPAL
```

*****}

```
begin
```

```
  L:=1e-3;      {longueur d'interaction}
```

```
  r13:=11e-12;  {coeff électrooptique du titanate de baryum pur}
```

```
  r42:=1000e-12; {coeff électrooptique du titanate de baryum pur}
```

```
  r33:=31e-12;  {coeff électrooptique du titanate de baryum pur}
```

```
  nmoy:=2.45;   {indice moyen}
```

```
  no:=2.49;     {indice de réfraction ordinaire du
                 titanate de baryum pur}
```

```
  ne:=2.41;     {indice de réfraction extraordinaire
                 du titanate de baryum pur}
```

```
  kb:=1.38e-23; {constante de Boltzman}
```

```
  T:=300;      {température en K}
```

```
  q:=1.6e-19;  {charge des porteurs (électrons)}
```

```
  e1:=1;       {polarization unit n°1}
```

```
  e2:=1;       {polarisation unit n°2}
```

```

c0:=3e8;      {célérité de la lumière}
lambda:=514.5e-9;
              {longueur d'onde de la raie verte de l'argon}
epsilon0:=8.84e-12;
              {permittivité diélectrique du vide}
epsilon[1][1]:=4300;
epsilon[1][2]:=0;
epsilon[1][3]:=0;
epsilon[2][1]:=0;
epsilon[2][2]:=4300;
epsilon[2][3]:=0;
epsilon[3][1]:=0;
epsilon[3][2]:=0;
epsilon[3][3]:=106;
              {tenseur diélectrique aux basses fréquences}
N:=3e22;      {densité de charges (3e16/cm3=3e22 SI)}

A1:=0.01d0;   {amplitudes complexes des 4 ondes :}
A2:=0.01d0;   {1 et 2 : faisceaux pompe}
A3:=0.01d0;   {3 : faisceau conjugué}
A4:=1d0;      {4 : faisceau incident}

I1:=sqr(A1);
I2:=sqr(A2);
I3:=sqr(A3);
I4:=sqr(A4);
c := (A1*A2)+(A3*A4);
d2:=I2+I3;
d1:=I1+I4;
delta := d2-d1;
{
r:=sqrt(sqr(delta)+4*sqr(c));
}
r:=0.5;
omega:=(2*pi*c0)/lambda;
k0:=corr2*sqrt(N*sqr(q)/(epsilon[1][1]*epsilon0*kb*T));
      {paramètre lié à la densité de chages    }
j := sqrt(complex(-1));

debut := 0;
fin := 90;
min := 0;
max := 1;
      _graduer := true;

```

```

        _axes:=true;
    _pas_min:=1e-3;
        echelles ( lineaire, debut, fin, min, max );

writestring('r : '+r,10,7);
writestring('L : '+L,10,8);
WRITESTRING('Réflectivité(alpha2) ', 1,1);

        for i:= 2 to 9 do
            begin
                alpha1:= i*10 - 5;
writestring('alpha1= '+alpha1,10,12);

                tracer ( @Atracer, alpha1 - 7, alpha1 - 1);
            end;

end;

```

Réflectivité du miroir en fonction des angles

```
{*****}
Simulation de la réflectivité Ref d'un miroir self-pompé en configuration
CAT d'après le modèle de MacDonald à deux régions couplées
version du 08.02.94
*****}

const  corr1 = 1;
      corr2 = 1;
      {termes correctifs dont la valeur normale est 1}

type  tab = array[1..3] of real;
      tenseur = array[1..3] of tab;

var    j : complex;
      debut, fin, min, max ,
      {échelles en x et en y}
      delta,r,d2,d1,c,
      {invariants du système d'équations}
      omega,      {pulsation de l'onde optique
                  en fait : "optical frequency" selon McDonald et Feinberg}
      alpha1,     {angle mesure à l'intérieur du cristal entre
                  le faisceau incident et l'axe c}
      alpha2,     {angle mesure à l'intérieur du cristal entre
                  le faisceau qui "fane" et l'axe c}
      A1,A2,A3,A4,
      {amplitudes complexes des 4 ondes :
      4 : faisceau incident
      3 : faisceau conjugué
      1 et 2 : faisceaux pompe}
      I1,I2,I3,I4,
      {intensités lumineuses correspondantes}
      L,          {longueur d'interaction de couplage}
      r13,r42,r33,
      {coefficients électrooptiques du BaTiO3}
      nmoy,no,ne,
      {indices de réfraction moyen,ordinaire et extraordinaire}
      kb,        {constante de Boltzman}
      T,         {température}
      q,         {charge électrique des porteurs, ici électrons}
      e1,        {lié à la polarisation}
      e2,        {lié à la polarisation}
      c0,        {célérité de la lumière dans le vide}
      lambda,    {longueur d'onde du faisceau incident}
```

```

epsilon0,
    {permittivité diélectrique du vide}
N,    {densité de porteurs}
k0    {paramètre lié à la densité de porteurs}
:extended;
    i:integer;
epsilon:tenseur;
    {tenseur de permittivité diélectrique aux basses
    fréquences}

{*****}
function kg(alpha1,alpha2:extended)
    kg est le vecteur d'onde du réseau d'indice en fonction
    des 2 angles alpha1 et 2.
    *****}
function kg(alpha1,alpha2:extended):extended;
begin
    kg:=corr1*(2*nmoy*omega/c0)*sin((alpha1-alpha2)/2);
end;

{*****}
function Elec(alpha1,alpha2:extended)
    Elec est le champ électrique créé par les charges photoexcitées.
    *****}
function Elec(alpha1,alpha2:extended):extended;
begin
    Elec:=kB*T*kg(alpha1,alpha2)*e1*e2
        / (q*(1+sqr(kg(alpha1,alpha2)/k0)));
end;

{*****}
function reff(alpha1,alpha2:extended)
    coefficient effectif electrooptique dans le cas de la polarisation
    extraordinaire
    *****}
function reff(alpha1,alpha2:extended):extended;
begin
    reff:= (
    sqr(sqr(no))*r13*cos(alpha1)*cos(alpha2)
    +
    2*sqr(ne)*sqr(no)*r42*sqr(cos((alpha1+alpha2)/2))
    +
    sqr(sqr(ne))*r33*sin(alpha1)*sin(alpha2)
    )
    *sin((alpha1+alpha2))/2;
end;

{*****}

```

```

function gamma(alpha1,alpha2:extended)
  gamma est le coefficient de couplage
  ****
function gamma(alpha1,alpha2:extended):extended;
var resu:extended;
begin
  resu:=
  omega/(2*nmoy*c0)
  )
  *
  (
  (reff(alpha1,alpha2)*Elec(alpha1,alpha2))
  /
  (cos((alpha1-alpha2)/2))
  );
  gamma:=resu;
writestring('gamma : '+resu,10,5);
writestring('gamma*L*r/2) : '+resu*L*r/2,10,6);
writestring('tanh(gamma*L*r/2)) : '+tanh(resu*L*r/2),10,4);

end;

{*****
function a(alpha1,alpha2:extended)
  a est une fonction intermédiaire (cf MacDo)
  ****
function a(alpha1,alpha2:extended):extended;
begin
  a:=sqr(r)*(1-sqr(tanh(gamma(alpha1,alpha2)*L*r/2)));
end;

{*****
function b(alpha1,alpha2:extended)
  b est une fonction intermédiaire (cf MacDo)
  ****
function b(alpha1,alpha2:extended):extended;
begin
  b:=sqr(r- 2*tanh(gamma(alpha1,alpha2)*L*r/2))
  -sqr(r*tanh(gamma(alpha1,alpha2)*L*r/2))
end;

{*****
function Ref(alpha1,alpha2:extended)
  Ref est la réflectivité du miroir à conjugaison
  de phase auto-pompé.

```



```

*****}
function Ref(alpha1,alpha2:extended):extended;
begin
  Ref:=(a(alpha1,alpha2)*b(alpha1,alpha2)
  /(4*(r*r- 1)*sqr(sqr(tanh(gamma(alpha1,alpha2)*L*r/2))))
end;

{*****}
function Atracer(alpha2:extended)
  permet de tracer gamma en fonction de l'unique variable alpha2 ;
  alpha1 devient un paramètre.
  c'est aussi ici que l'on passe du radian au degré
*****}
function Atracer(alpha2:extended):extended;
begin
  Atracer:=Ref(alpha1*pi/180,alpha2*pi/180);

writestring('a : '+a(alpha1,alpha2),10,2);
writestring('b : '+b(alpha1,alpha2),10,3);
writestring('Ref : '+Ref(alpha1,alpha2),10,9);

end;

{*****}
PROGRAMME PRINCIPAL
*****}

begin

  L:=1e-3;      {longueur d'interaction}
  r13:=11e-12;  {coeff électrooptique du titanate de baryum pur}
  r42:=1000e-12; {coeff électrooptique du titanate de baryum pur}
  r33:=31e-12;  {coeff électrooptique du titanate de baryum pur}
  nmoy:=2.45;   {indice moyen}
  no:=2.49;     {indice de réfraction ordinaire du
                titanate de baryum pur}
  ne:=2.41;     {indice de réfraction extraordinaire
                du titanate de baryum pur}
  kb:=1.38e-23; {constante de Boltzman}
  T:=300;       {température en K}
  q:=1.6e-19;   {charge des porteurs (électrons)}
  e1:=1;        {polarization unit n°1}
  e2:=1;        {polarisation unit n°2}
  c0:=3e8;      {célérité de la lumière}
  lambda:=514.5e-9;
                {longueur d'onde de la raie verte de l'argon}

```

```

epsilon0:=8.84e-12;
      {permittivité diélectrique du vide}
epsilon[1][1]:=4300;
epsilon[1][2]:=0;
epsilon[1][3]:=0;
epsilon[2][1]:=0;
epsilon[2][2]:=4300;
epsilon[2][3]:=0;
epsilon[3][1]:=0;
epsilon[3][2]:=0;
epsilon[3][3]:=106;
      {tenseur diélectrique aux basses fréquences}
N:=3e22;      {densité de charges (3e16/cm3=3e22 SI)}

      A1:=0.01d0;      {amplitudes complexes des 4 ondes :}
A2:=0.01d0;      {1 et 2 : faisceaux pompe}
A3:=0.01d0;      {3 : faisceau conjugué}
A4:=1d0;      {4 : faisceau incident}

      I1:=sqr(A1);
I2:=sqr(A2);
I3:=sqr(A3);
I4:=sqr(A4);
      c := (A1*A2)+(A3*A4);
      d2:=I2+I3;
      d1:=I1+I4;
      delta := d2-d1;
{
r:=sqrt(sqr(delta)+4*sqr(c));
}
r:=0.5;
      omega:=(2*pi*c0)/lambda;
k0:=corr2*sqrt(N*sqr(q)/(epsilon[1][1]*epsilon0*kb*T));
      {paramètre lié à la densité de chages }
j := sqrt(complex(-1));

debut := 0;
fin := 90;
min := 0;
max := 1;
      _graduer := true;
      _axes:=true;
      _pas_min:=1e-3;
      echelles ( lineaire, debut, fin, min, max );

```

```
writestring('r : '+r,10,7);
writestring('L : '+L,10,8);
WRITESTRING('Réflectivité(alpha2) ', 1,1);

    for i:= 2 to 9 do
        begin
            alpha1:= i*10 - 5;
writestring('alpha1= '+alpha1,10,12);

            tracer ( @Atracer, alpha1 - 7, alpha1 - 1);
        end;

end;
```

Champ électrique d'espace en fonction du pas du réseau

```
{*****
Amplitude du champ électrique en fonction du pas du réseau d'illumination
application à BGO et BaTiO3
15.04.94
*****}

const  corr1 = 1;
      corr2 = 1;
      {termes correctifs dont la valeur normale est 1}

type   tab = array[1..3] of real;
      tenseur = array[1..3] of tab;

var    j : complex;
      debut, fin, min, max ,
      {échelles en x et en y}
      omega,      {pulsation de l'onde optique
en fait : "optical frequency" selon McDonald et Feinberg}
      L,      {longueur d'interaction de couplage}
      r13,r42,r33,
      {coefficients électrooptiques du BaTiO3}
      kb,      {constante de Boltzman}
      T,      {température}
      q,      {charge électrique des porteurs, ici électrons}
      c0,      {célérité de la lumière dans le vide}
      lambda,      {longueur d'onde du faisceau incident}
      epsilon0,
      {permittivité diélectrique du vide}
      NA,      {densité de centres accepteurs}
      ND,      {densité de donneurs}
      k0      {paramètre lié à la densité de porteurs}
      :extended;
      i:integer;
      epsilon:tenseur;
      {tenseur de permittivité diélectrique aux basses
fréquences}

{*****
function Ed(gl:extended):extended;
*****}

```

```

function Ed(gl:extended):extended;
begin
  Ed:=(2*pi/gl)*(kb*T/q);
end;

{*****}
function Eq(gl:extended):extended;
*****}
function Eq(gl:extended):extended;
begin
  Eq:=(q*NA*gl)/(2*pi*epsilon0*epsilon[1][1]);
end;

{*****}
function Atracer(gl:extended):extended;
*****}
function Atracer(gl:extended):extended;
var e1:real;
begin
  Atracer:=e1:=Ed(gl)/(1+(Ed(gl)/Eq(gl)));
  { writestring('E1 = '+e1,30,1);
  }
end;

{*****}
PROGRAMME PRINCIPAL
*****}

begin
  kb:=1.38e-23;    {constante de Boltzman}
  T:=300;         {température en K}
  q:=1.6e-19;     {charge des porteurs (électrons)}
  epsilon0:=8.84e-12;
                  {permittivité diélectrique du vide}

  j := sqrt(complex(-1));
  debut := 0;
  fin := 60e-6;
  min := 0;
  max := 8e4;
  _graduer := true;
  _axes:=true;
  _pas_min:=1e-8;
  echelles ( lineaire, debut-10e-6, fin, min, max );
  WRITESTRING('Champ électrique en fonction du pas du réseau',1,1);

{****titanate*****}

```

```

epsilon[1][1]:=1000;
epsilon[1][2]:=0;
epsilon[1][3]:=0;
epsilon[2][1]:=0;
epsilon[2][2]:=1000;
epsilon[2][3]:=0;
epsilon[3][1]:=0;
epsilon[3][2]:=0;
epsilon[3][3]:=106
      {tenseur diélectrique aux basses fréquences};
      NA:=0.5e21;      {(1e15/cm3->1e21 SI)}
ND:=1e21;
_trait := 2;
      tracer ( @Atracer, debut, fin);
_trait := 1;

      tracer ( @Ed, debut, fin);
      tracer ( @Eq, debut, fin);

{****BSO*****}
epsilon[1][1]:=56;
epsilon[1][2]:=0;
epsilon[1][3]:=0;
epsilon[2][1]:=0;
epsilon[2][2]:=1000;
epsilon[2][3]:=0;
epsilon[3][1]:=0;
epsilon[3][2]:=0;
epsilon[3][3]:=106
      {tenseur diélectrique aux basses fréquences};
      NA:=0.5e21;      {(1e15/cm3->1e21 SI)}
ND:=1e21;

_trait := 2;
      tracer ( @Atracer, debut, fin);
_trait := 1;

      tracer ( @Ed, debut, fin);
      tracer ( @Eq, debut, fin);

{      Writestring('ND = '+ND, 1,4);
      Writestring('NA = '+NA, 1,5);
}
end;

```

Modèle statistique du comportement temporel

```
{ Simulation du comportement temporel d'une onde conjuguée obtenue par un
montage CAT }
{ 15 Novembre 1994 }
program modele;

uses
  appleTalk, serial, init, event, fastio, edtrAE, edtrIO, processes,
  sendAE, sane;

type
  intH = ^intP;
  intP = ^integer;
  tab = array[1..2] of real;

const
  n = 100;
  nt = 5000;

var
  ecran, fichier, fichier3, fichier4: ioParam;

  reponse: str255;
  nom, nom3, nom4: str255;
  ff: text;
  tableau: array[0..n] of integer;
  i, j, k, kk, Ref: integer;
  eventH: handle;
  theProc: processSerialNumber;
  lastTime: longint;
  numero: integer; {numero de la methode}
  x0, y0, x1, y1, x2, y2, x3, y3, x4, y4, x5, y5: real;

{*****}
{générateur de nombre aléatoire entre 0 et 1. (JLG) }
function rrandom: real;
  var
    rndomNbre: extended;
    theTime: longint;
begin
  theTime := (tickCount mod MAXINT + random);
  if theTime < 0 then
    theTime := theTime + MAXINT;
  rndomNbre := theTime / MAXINT;
  rndomNbre := 2653463.465372839 * rndomNbre + 0.3542637482;
```

```

getDateTeme(theTime);
theTime := (theTime + random) mod 128;
if theTime < 0 then
  theTime := theTime + 128;
rdomNbre := rdomNbre + (theTime / 128);
rrandom := rdomNbre - trunc(rdomNbre);
end;

{*****}
{droite ax+b qui passe par les deux points (x1, y1) et (x2, y2) }
{ 27 Juillet 1994 }
function droite (x1, y1, x2, y2: real): tab;
begin
  droite[1] := (y1 - y2) / (x1 - x2);{coeff directeur}
  droite[2] := (x1 * y2 - y1 * x2) / (x1 - x2);{ordonnee a l'origine}
end;

{*****}
{probabilité linéaire par morceaux, définie par le points : }
{ (x0=0,x0), (x1,y1), (x2,y2), (x3,y3), (x4,y4) et (x5=1,y5)}
{15 Novembre 1994 }
function prob (x, x0, y0, x1, y1, x2, y2, x3, y3, x4, y4, x5, y5: real):
real;
  var
    a, b: real;
begin
  if (x < x1) then
    begin
      a := droite(0, y0, x1, y1)[1];
      b := droite(0, y0, x1, y1)[2];
    end
  else if (x < x2) then
    begin
      a := droite(x1, y1, x2, y2)[1];
      b := droite(x1, y1, x2, y2)[2];
    end
  else if (x < x3) then
    begin
      a := droite(x2, y2, x3, y3)[1];
      b := droite(x2, y2, x3, y3)[2];
    end
  end
  else if (x < x4) then
    begin
      a := droite(x3, y3, x4, y4)[1];

```



```

    b := droite(x3, y3, x4, y4)[2];

end
else
begin
    a := droite(x4, y4, 1, y5)[1];
    b := droite(x4, y4, 1, y5)[2];
end;
prob := a * x + b;
end;

{*****}
{p(a,b) correspond à : a puissance b, avec b entier }
{ 27 Juillet 1994 }
function p (a: real; b: integer): real;
var
    i: integer;
    pp: real;
begin
    pp := 1;
    for i := 1 to b do
        pp := pp * a;
    p := pp
end;

{*****}
{coefficient a du polynome de la fonction proba}
{ 27 Juillet 1994 }
function a (M, D, Ea: real): real;
var
    M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11, M12, M13: real;
    D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12, D13: real;
begin
    M2 := p(M, 2);
    M3 := p(M, 3);
    M4 := p(M, 4);
    M5 := p(M, 5);
    M6 := p(M, 6);
    M7 := p(M, 7);
    M8 := p(M, 8);
    M9 := p(M, 9);
    M10 := p(M, 10);
    M11 := p(M, 11);
    M12 := p(M, 12);
    M13 := p(M, 13);
    D2 := p(D, 2);
    D3 := p(D, 3);
    D4 := p(D, 4);

```

```

D5 := p(D, 5);
D6 := p(D, 6);
D7 := p(D, 7);
D8 := p(D, 8);
D9 := p(D, 9);
D10 := p(D, 10);
D11 := p(D, 11);
D12 := p(D, 12);
D13 := p(D, 13);
a := (D * Ea * M8) / (-(D8 * M8) + 7 * D7 * M9 - 19 * D6 * M10 + 25 * D5
* M11 - 16 * D4 * M12 + 4 * D3 * M13) - ((3 * D - M) * (2 * D5 * M3 - 10 *
D4 * M4 + 18 * D3 * M5 - 14 * D2 * M6 + 4 * D * M7)) / (8 * (-(D8 * M8) +
7 * D7 * M9 - 19 * D6 * M10 + 25 * D5 * M11 - 16 * D4 * M12 + 4 * D3 *
M13)) + (4 * D4 * M5 - 12 * D3 * M6 + 12 * D2 * M7 - 4 * D * M8) / (8 * (-(
D8 * M8) + 7 * D7 * M9 - 19 * D6 * M10 + 25 * D5 * M11 - 16 * D4 * M12 +
4 * D3 * M13));
end;

{*****}
{coefficient b du polynome de la fonction proba}
{ 27 Juillet 1994 }
function b (M, D, Ea: real): real;
var
  b1, b2: real;
  M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11, M12, M13: real;
  D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12, D13: real;
begin
  M2 := p(M, 2);
  M3 := p(M, 3);
  M4 := p(M, 4);
  M5 := p(M, 5);
  M6 := p(M, 6);
  M7 := p(M, 7);
  M8 := p(M, 8);
  M9 := p(M, 9);
  M10 := p(M, 10);
  M11 := p(M, 11);
  M12 := p(M, 12);
  M13 := p(M, 13);
  D2 := p(D, 2);
  D3 := p(D, 3);
  D4 := p(D, 4);
  D5 := p(D, 5);
  D6 := p(D, 6);
  D7 := p(D, 7);

```

```

D8 := p(D, 8);
D9 := p(D, 9);
D10 := p(D, 10);
D11 := p(D, 11);
D12 := p(D, 12);
D13 := p(D, 13);
b1 := (-2 * D * Ea * M10) / (-(D8 * M8) + 7 * D7 * M9 - 19 * D6 * M10 +
25 * D5 * M11 - 16 * D4 * M12 + 4 * D3 * M13) - ((3 * D - M) * (-2 * D7 *
M3 + 14 * D6 * M4 - 42 * D5 * M5 + 70 * D4 * M6 - 68 * D3 * M7 + 36 * D2 *
M8 - 8 * D * M9)) / (8 * (-(D8 * M8) + 7 * D7 * M9 - 19 * D6 * M10 + 25 *
D5 * M11 - 16 * D4 * M12 + 4 * D3 * M13));
b := b1 + (-8 * D4 * M7 + 24 * D3 * M8 - 24 * D2 * M9 + 8 * D * M10) /
(8 * (-(D8 * M8) + 7 * D7 * M9 - 19 * D6 * M10 + 25 * D5 * M11 - 16 * D4 *
M12 + 4 * D3 * M13));
end;

{*****}
{coefficient c du polynome de la fonction proba}
{ 27 Juillet 1994 }
function c (M, D, Ea: real): real;
var
  c1, c2: real;
  M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11, M12, M13: real;
  D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12, D13: real;
begin
  M2 := p(M, 2);
  M3 := p(M, 3);
  M4 := p(M, 4);
  M5 := p(M, 5);
  M6 := p(M, 6);
  M7 := p(M, 7);
  M8 := p(M, 8);
  M9 := p(M, 9);
  M10 := p(M, 10);
  M11 := p(M, 11);
  M12 := p(M, 12);
  M13 := p(M, 13);
  D2 := p(D, 2);
  D3 := p(D, 3);
  D4 := p(D, 4);
  D5 := p(D, 5);
  D6 := p(D, 6);
  D7 := p(D, 7);
  D8 := p(D, 8);
  D9 := p(D, 9);
  D10 := p(D, 10);
  D11 := p(D, 11);
  D12 := p(D, 12);

```

```

D13 := p(D, 13);
c1 := (D * Ea * M12) / (-(D8 * M8) + 7 * D7 * M9 - 19 * D6 * M10 + 25 *
D5 * M11 - 16 * D4 * M12 + 4 * D3 * M13) - ((3 * D - M) * (2 * D7 * M5 -
14 * D6 * M6 + 40 * D5 * M7 - 60 * D4 * M8 + 50 * D3 * M9 - 22 * D2 * M10
+ 4 * D * M11)) / (8 * (-(D8 * M8) + 7 * D7 * M9 - 19 * D6 * M10 + 25 * D5
* M11 - 16 * D4 * M12 + 4 * D3 * M13));
c := c1 + (-4 * D8 * M5 + 28 * D7 * M6 - 76 * D6 * M7 + 100 * D5 * M8 -
60 * D4 * M9 + 4 * D3 * M10 + 12 * D2 * M11 - 4 * D * M12) / (8 * (-(D8 *
M8) + 7 * D7 * M9 - 19 * D6 * M10 + 25 * D5 * M11 - 16 * D4 * M12 + 4 * D3
* M13));
end;

```

```

{*****}
{probabilite lissee par une expression polynomiale x^2*(ax^5 + bx^3 + cx)}
{ 27 Juillet 1994 }
function proba (x, M, D, Ea, Eb: real): real;
begin
  if x <= M then
    proba := p(x, 2) * (a(M, D, Ea) * p(x, 5) + b(M, D, Ea) * p(x, 3) +
c(M, D, Ea) * x)
  else
    proba := 1 - (p(1 - x, 2) * (a(1 - M, D, Eb) * p((1 - x), 5) + b(1 - M,
D, Eb) * p((1 - x), 3) + c(1 - M, D, Eb) * (1 - x)));
  end;

var
  M, D, Ea, Eb: real;

```

```

{*****}
{choix de la fonction proba}
{ 27 Juillet 1994 }
function f (x: real): real;
begin
  if (numero = 1) or (numero = 3) then
    f := proba(x, M, D, Ea, Eb)
  else if (numero = 2) or (numero = 4) then
    f := prob(x, x1, x2, y2, x3, y3, x4);
  end;

```

```

{*****}
{gestion des events (JLG)}
{ 27 Juillet 1994 }
procedure myBgTime (val: real);
begin

```

```

if (tickCount > lastTime + 10) then
begin
  lastTime := tickCount;
  giveBgTime;
  writelnString(ecran, stringOf('Avancement : ', val : 4 : 1, '%'));
end;
end;

{*****}
{programme principal 15.11.94}
{ 15 Novembre 1994 }
var
  num: str255;
  coeff1, coeff2, coeff3: real;

begin
  initMgr;
  initEvent;
  sethalt(-1, false);
  lastTime := tickCount;
  ecran := nil;
  if openScreen(ecran, 'Text', false) = noErr then
  begin
    fichier := nil;
    nom := stringOf('modessai');
    if (edtrOuvreDocument(fichier, -1, true, nom) = noErr) then
    begin
      edtrSon;
      numero := 0;
      while (numero <> 1) and (numero <> 2) and (numero <> 3) and (numero
<> 4) do
        begin
          writelnString(ecran, 'Entrez le numero de la methode de calcul :');
          writelnString(ecran, 'methode de calcul 1 : polynome en x7');
          writelnString(ecran, 'methode de calcul 2 : polygone');
          writelnString(ecran, 'methode de calcul 3 : polynome en x7 avec
fichier de config3');
          writelnString(ecran, 'methode de calcul 4 : polygone avec fichier
de config4');
          readString(readlnString(ecran), numero);
        end;
        writelnString(fichier, stringOf('{ Méthode choisie : ', numero, '
}'));
        if (numero = 1) then
        begin
          writeString(ecran, 'Entrez M SVP : ');
          readString(readlnString(ecran), M);
          writelnString(fichier, stringOf('{ M =', M, ' }'));
        end;
      end;
    end;
  end;
end;

```

```

writeString(ecran, 'Entrez D SVP : ');
readString(readlnString(ecran), D);
writelnString(fichier, stringOf('{ D =', D, ' }'));
writeString(ecran, 'Entrez Ea SVP : ');
readString(readlnString(ecran), Ea);
writelnString(fichier, stringOf('{ Ea =', Ea, ' }'));
writeString(ecran, 'Entrez Eb SVP : ');
readString(readlnString(ecran), Eb);
writelnString(fichier, stringOf('{ Eb =', Eb, ' }'));
end
else if (numero = 2) then {prob (x, x1, x2, y2, x3, y3, x4: real)}
begin
  writeString(ecran, 'Entrez x1 SVP : ');
  readString(readlnString(ecran), x1);
  writeString(ecran, 'Entrez x2 SVP : ');
  readString(readlnString(ecran), x2);
  writeString(ecran, 'Entrez y2 SVP : ');
  readString(readlnString(ecran), y2);
  writeString(ecran, 'Entrez x3 SVP : ');
  readString(readlnString(ecran), x3);
  writeString(ecran, 'Entrez y3 SVP : ');
  readString(readlnString(ecran), y3);
  writeString(ecran, 'Entrez x4 SVP : ');
  readString(readlnString(ecran), x4);
  writelnString(fichier, stringOf('{ x1 =', x1, ' }'));
  writelnString(fichier, stringOf('{ x2 =', x2, ' }'));
  writelnString(fichier, stringOf('{ y2 =', y2, ' }'));
  writelnString(fichier, stringOf('{ x3 =', x3, ' }'));
  writelnString(fichier, stringOf('{ y3 =', y3, ' }'));
  writelnString(fichier, stringOf('{ x4 =', x4, ' }'));
end
else if (numero = 3) then
begin
  writeString((ecran), 'Numéro du fichier de config : ');
  readString(readlnString(ecran), num);
  writelnString(ecran,
'*****');
  nom3 := stringof('config3', num);
  Open(ff, nom3);
  if (EOF(ff)) then
  begin
    writeString(ecran, 'le fichier est vide !');
  end
  else
  begin

```

```

read(ff, M);
writelnString(ecran, stringOf(M));
writelnString(fichier, stringOf('{ M =', M, ' }'));
read(ff, D);
writelnString(ecran, stringOf(D));
writelnString(fichier, stringOf('{ D =', D, ' }'));
read(ff, Ea);
writelnString(ecran, stringOf(Ea));
writelnString(fichier, stringOf('{ Ea =', Ea, ' }'));
read(ff, Eb);
writelnString(ecran, stringOf(Eb));
writelnString(fichier, stringOf('{ Eb =', Eb, ' }'));
writelnString(ecran,
'*****:');
flush(ecran);
close(ff);
end;
end
else if (numero = 4) then {prob (x, x1, x2, y2, x3, y3, x4: real)}
begin
writeString((ecran), 'Numéro du fichier de config : ');
readString(readlnString(ecran), num);
writelnString(ecran,
'*****:');
nom4 := stringof('config4', num);
Open(ff, nom4);
if (EOF(ff)) then
begin
writeString(ecran, 'le fichier est vide !');
end
else
begin
readln(ff, x0);
if x0 <> 0 then
begin
writelnString(ecran, stringOf('{ x0 doit être nul !!!}'));
x0 := 0;
end;
writelnString(ecran, stringOf('{ x0 =', x0, ' }'));
readln(ff, y0);
writelnString(ecran, stringOf('{ y0 =', y0, ' }'));
readln(ff, x1);
writelnString(ecran, stringOf('{ x1 =', x1, ' }'));
readln(ff, y1);
writelnString(ecran, stringOf('{ y1 =', y1, ' }'));
readln(ff, x2);
writelnString(ecran, stringOf('{ x2 =', x2, ' }'));
readln(ff, y2);

```

```

writelnString(ecran, stringOf('{ y2 =', y2, ' }'));
readln(ff, x3);
writelnString(ecran, stringOf('{ x3 =', x3, ' }'));
readln(ff, y3);
writelnString(ecran, stringOf('{ y3 =', y3, ' }'));
readln(ff, x4);
writelnString(ecran, stringOf('{ x4 =', x4, ' }'));
readln(ff, y4);
writelnString(ecran, stringOf('{ y4 =', y4, ' }'));
readln(ff, x5);
if x5 <> 1 then
begin
writelnString(ecran, stringOf('{ x5 doit égal à 1 !!!}'));
x5 := 1;
end;
writelnString(ecran, stringOf('{ x5 =', x5, ' }'));
readln(ff, y5);
writelnString(ecran, stringOf('{ y5 =', y5, ' }'));
readln(ff, coeff1);
writelnString(ecran, stringOf('{ coeff1 =', coeff1, ' }'));
readln(ff, coeff2);
writelnString(ecran, stringOf('{ coeff2 =', coeff2, ' }'));
read(ff, coeff3);
writelnString(ecran, stringOf('{ coeff3 =', coeff3, ' }'));
writelnString(ecran,
'*****:');
flush(ecran);
close(ff);
writelnString(fichier, stringOf('{ x0 =', x0, ' }'));
writelnString(fichier, stringOf('{ y0 =', y0, ' }'));
writelnString(fichier, stringOf('{ x1 =', x1, ' }'));
writelnString(fichier, stringOf('{ y1 =', y1, ' }'));
writelnString(fichier, stringOf('{ x2 =', x2, ' }'));
writelnString(fichier, stringOf('{ y2 =', y2, ' }'));
writelnString(fichier, stringOf('{ x3 =', x3, ' }'));
writelnString(fichier, stringOf('{ y3 =', y3, ' }'));
writelnString(fichier, stringOf('{ x4 =', x4, ' }'));
writelnString(fichier, stringOf('{ y4 =', y4, ' }'));
writelnString(fichier, stringOf('{ x5 =', x5, ' }'));
writelnString(fichier, stringOf('{ y5 =', y5, ' }'));
writelnString(fichier, stringOf('{ coeff1 =', coeff1, ' }'));
writelnString(fichier, stringOf('{ coeff2 =', coeff2, ' }'));
writelnString(fichier, stringOf('{ coeff3 =', coeff3, ' }'));
end;
end;

```



```

{debut du remplissage du fichier qui sera lu par Trace Courbe}
  writelnString(fichier, stringOf('const nt = ', nt, ';'));
  writelnString(fichier, stringOf('const n = ', n, ';'));

  writelnString(fichier, 'type');
  writelnString(fichier, stringOf('  tableau = array[1..', nt, '] of
integer;'));
  writelnString(fichier, 'const');
  writelnString(fichier, 'tab: tableau = (');
{écrire ici les valeurs x y de la fonction}
  for i := 0 to n do
    begin
      tableau[i] := 0;
    end;
  writelnString(ecran, '');
  writelnString(ecran, '');
  for i := 1 to nt do
    begin
      myBgTime(100 * (i / nt));
      j := trunc(N * rrandom);
      if tableau[j] = 0 then
        tableau[j] := 1
      else
        tableau[j] := trunc(coeff1 + coeff2 * rrandom + coeff3 * (1 - f(j /
n)));
      k := 0;
      while ((k < n) and (tableau[k] > 0)) do
        begin
          k := k + 1;
        end;
      writelnString(fichier, stringOf(k));
    end;
  writelnString(fichier, ');');
  writelnString(fichier, 'type');
  writelnString(fichier, '  points = record');
  writelnString(fichier, '    x, y: real;');
  writelnString(fichier, '  end;');
  writelnString(fichier, stringOf('fonction = array[1..', nt, '] of
points;'));
  writelnString(fichier, 'var');
  writelnString(fichier, 'i: integer;');
  writelnString(fichier, 'fct: fonction;');
  writelnString(fichier, 't: tableau;');
  writelnString(fichier, 'const');
  writelnString(fichier, 'debut = 1;');
  writelnString(fichier, stringOf('fin = ', nt, ';'));
  writelnString(fichier, 'bas = 0;');

```

```

    writelnString(fichier, stringOf('haut = ', n, '));
    writelnString(fichier, 'function f (x: real): real :=
interpole(@fct,nt, interpolateLineaire, x);');
    writelnString(fichier, 'begin');
    writelnString(fichier, 't := tab;');
    writelnString(fichier, 'for i := 1 to nt do');
    writelnString(fichier, '  begin');
    writelnString(fichier, '    fct[i].x := i;');
    writelnString(fichier, '    fct[i].y := t[i];');
    writelnString(fichier, '  end;');
    writelnString(fichier, 'echelles(lineaire, debut, fin, bas, haut);');
    writelnString(fichier, 'tracer(@f, debut, fin);');
    writelnString(fichier, 'end;');
    writelnString(fichier, '');
    writelnString(fichier, '');
    writelnString(fichier, '');
    writelnString(fichier, '');
    writelnString(fichier, '');
    Ref := edtrRef(fichier);
    closeio(fichier, 0);
    edtrSon;
end;
if getprocess('CRB3', theProc) = noErr then
begin
    eventH := newHandle(sizeof(integer));
    intH(eventH)^ := 1;
    if setFrontProcess(theProc) = noErr then
        if sendAERequest(theProc, 'EDTR', 'MENU', eventH, nil) <> noErr then
            ;
        disposHandle(eventH);
    end;
    closeio(ecran, 0);
end;
end.

```

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- [ABE et al. 1994] H. ABE and H. OKUDA "Computer simulation of the linear and nonlinear propagation of electromagnetic waves in dielectric media" Opt. Lett. Vol. 19, N°1 (1994)
- [ACKERMAN and LEBOW, 1989] J.R. ACKERMAN and P.S. LEBOW, "Improved performance from nonlinear pumping in a high reflectivity Brillouin enhanced four-wave mixing phase conjugator" I.E.E.E. QE-25, 479 (1989)
- [AMODEI 1971] J.M. AMODEI, RCA Rev. Vol. 32 - 185 (1971)
- [ANASTASSAKIS 1993] E. ANASTASSAKIS, "Photorefractive effects in cubic crystals: explicit treatment of the piezoelectric contribution" I.E.E.E. QE -29, N°7 (1993)
- [ANDERSON et al. 1987] D.Z. ANDERSON, D. LININGER and J. FEINBERG, "Optical Tracking Novelty Filters" Opt. Lett. Vol. 12, N°2 (1987)
- [ANDERSON and FEINBERG 1987] D.Z. ANDERSON and J. FEINBERG, "Optical Novelty Filters" I.E.E.E. QE -25, N°3 (1989)
- [ANDERSON et al. 1993] R.J. ANDERSON, E.J. SHARP, G.L. WOOD, W.W. CLARK III, Q. VUONG, G.J. SALAMO and R.R. NEURGAONKAR, "Mutually pumped phase conjugator as a moving-object correlator" Opt. Lett. Vol. 18, N°12 (1993)
- [AVAKYAN et al. 1978] E.M. AVAKYAN, S.A. ALAVERDYAN, K.G. BALABAEV V.K. SARKISOV and K.M. TUMANYAN, Sov. Phys. State 20, 1401 (1978)
- [AYRAL et al. 1991] J.L. AYRAL, J. MONTEL, T. VERNY and J.P. HUIGNARD, "Phase-conjugate Nd:YAG laser with internal acousto-optic beam steering" Opt. Lett. Vol. 16, n°16 (1991)
- [BAQUEDANO et al. 1987] J. BAQUEDANO, M. CARRASCOSA, L. ARIZMENDI and J.M. CABRERA, "Erasure kinetics and spectral dependence of the photorefractive effect in Fe:LiNbO₃" J. Opt. Soc. Am. B Vol. 4 N°3 (1987)
- [BECKWITH et al. 1987] P.H. BECKWITH, I. McMICHAEL and P. YEH, "Image distortion in multimode fibers and restoration by polarization-preserving phase conjugation" Opt. Lett. Vol. 12, (1987)
- [BECKWITH et al. 1989] P.H. BECKWITH and W.R. CHRISTIAN, "Two-wave Mixing and Phase Conjugation at 830 nm in BaTiO₃" Opt. Lett. Vol. 14, N°12 (1989)
- [BEL'DYUGINA et al. 1993] N.I. BEL'DYUGINA, A.V. MAMAIEV and V. SHKUNOV, "Dynamics of the self starting generation of a phase-conjugate semilinear mirror" Appl. Opt. Vol. 32, N°21 (1993)

- [BELIC and STOJKOV 1990] M.R. BELIC and P. STOJKOV, "Chaos in phase-conjugate resonators as a multimodal mapping" *Opt. and Quant. Electr.* Vol. 22 (1990)
- [BELIC and TIMOTIJEVIC 1991] M.R. BELIC and D. TIMOTIJEVIC, "Multigrating phase conjugation: chaotic results" *J. Opt. Soc. Am. B* Vol. 8 N°8 (1991)
- [BELIC et al. 1993] M.R. BELIC, D. TIMOTIJEVIC and R.W. BOYD, "Wave mixing in photorefractive crystals with saturable couplings: stable solutions and instabilities" *Opt. Com.* 96 (1993)
- [BESPALOV et al. 191] V.I. BESPALOV, A.A. BETIN, K.V. ERGAKOV, E.A. ZHUKOV, O.V. MITROPOL'SKY, D.V. OSIPOV and S.G. TURGENEV, "Self-phase-conjugation of middle infrared radiation by four-wave mixing and stimulated scattering" *S.P.I.E.* Vol. 1841 - 124 (1991)
- [BIAN et al. 1993] S. BIAN, G. ZHAN, X. SU, K. XU, W. SUN, Q. JIANG, H. CHEN and D. SUN, "Self-pumped phase conjugation of 18°-cut Ce-doped KNSBN at 632.8 nm" *Opt. Lett.* Vol. 18 N°10 (1993)
- [BOGODAEV et al. 1991] N.V. BOGODAEV, L.I. IVLEVA, A.S. KORSHUNOV, A.V. MAMAEV, N.N. POLOSZKOV and A.A. ZOZULYA, "Self-pumped passive ring mirror in crystals with strong fanning" *S.P.I.E.* Vol. 1841 (1991)
- [BONIORT et al. 1975] J.Y. BONIORT, C. BREHM, G. DESPLANCHES, J.Y. BARRAUD and P. MARGOTIN, "Crystal growth of Strontium Barium Niobate BaxSr1-xNb2O6" *J. Cryst. Gr.* Vol. 30 (1975)
- [BOUTSIKARIS and DAVIDSON 1993] L. BOUTSIKARIS and F. DAVIDSON, "Two-wave mixing of time-varying non-plane-wave optical fields in photorefractive materials" *Appl. Opt.* Vol. 32 N°9 (1993)
- [BREUGNOT et al. 1994] S. BREUGNOT, D. DOLFI, H. RAJBENBACH, J.P. HUIGNARD and M. DEFOUR, "Enhancement of the signal-to-background ratio in photorefractive two-wave-mixing by mutually incoherent two-beam coupling" *Opt. Lett.* Vol.19 N°14 (1994)
- [BUCK and FORRAI 1993] J.A. BUCK and D.P. FORRAI, "Studies of Long-Pulse Responses in Four-Wave Mixing Using a Step-Modulated Probe" *I.E.E.E. QE* - 29 N°2 (1993)
- [CARRASCOSA and AGULLO-LOPEZ 1986] M. CARRASCOSA and F. AGULLO-LOPEZ, "Kinetics for optical erasure of sinusoidal holographic gratings in photorefractive materials" *I.E.E.E. QE* - 22 N°8 (1986)
- [CARRASCOSA and AGULLO-LOPEZ 1988] M. CARRASCOSA and F. AGULLO-LOPEZ, "Erasure of holographic gratings in photorefractive materials with two active species" *Appl. Opt.* Vol. 27 N°14 (1988)

- [CARRASCOSA et al. 1988] M. CARRASCOSA, J.M. CABRERA and F. AGULLO-LOPEZ, "Role of photovoltaic drift on the initial writing and erasure rates of holographic gratings : some implications" *Opt. Com.* Vol. 69 N°1 (1988)
- [CARRASCOSA et al. 1991] M. CARRASCOSA, J.M. CABRERA and F. AGULLO-LOPEZ, "Steady holographic gratings formed in photorefractive materials: influence of material parameters" *I.E.E.E. QE* - 27 N°3 (1991)
- [CEA 1990] CEA, "Polymères organiques conducteurs et semi-conducteurs" *Clefs CEA*, N° 17 (1990)
- [CHANUSSOT 1978] G. CHANUSSOT, "Physical models for the photoferroelectric phenomena" *Ferroelectrics* Vol. 20 (1978)
- [CHANG and HELLWARTH 1985] T.Y. CHANG and R.W. HELLWARTH, "Optical phase conjugation by backscattering in baryum titanate" *Opt. Lett.* Vol. 10 N°8 (1985)
- [CHARRA and NUNZI 1991] F. CHARRA and D.J.M. NUNZI, "Non degenerate multiwave mixing in polydiacetylene: phase conjugation with frequency conversion" *J. Opt. Soc. Am. B* Vol. 8 N°3 (1991)
- [CHEN et al. 1968] F.S. CHEN, J.T. LAMACCHIA and D.B. FRASER, "Holographic Storage in Lithium Niobate" *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 13, N°7 (1968)
- [CHIOU and YEY 1986] A.E. CHIOU and P. YEY, "Parallel image subtraction using a phase-conjugate Michelson Interferometer" *Opt. Lett.* Vol. 11, N° 5 (1986)
- [CHRISTIAN et al. 1992] W.R. CHRISTIAN, A.R. SAXENA and I. McMICHAEL, "Seeding and grating phase in mutually pumped phase conjugators" *J. Opt. Soc. Am. B* Vol. 9 N°1 (1992)
- [CRONIN-GOLOMB et al. 1982] M. CRONIN-GOLOMB, J.O. WHITE, B. FISCHER, and A. YARIV, "Exact solution of a nonlinear model of four-wave mixing and phase conjugation" *Opt. Lett.* 7, 313 (1982)
- [CRONIN-GOLOMB 1983] M. CRONIN-GOLOMB, "Large nonlinearities in four-wave mixing in photorefractive crystals and applications in passive optical phase conjugation" Thesis Dissertation (1983)
- [CRONIN-GOLOMB et al.1984] M. CRONIN-GOLOMB, B. FISCHER, J.O. WHITE and A. YARIV, "Theory and Applications of Four-wave Mixing in Photorefractive Media" *I.E.E.E. QE* - 20, N°1 (1984)
- [CRONIN-GOLOMB et al.1987] M. CRONIN-GOLOMB, A.M. BIERNACKI, C. LIN and H. KONG, "Photorefractive time differentiation of coherent optical images" *Opt.*

- [DAMZEN and BARRY 1993] M.J. DAMZEN and N. BARRY, "Intensity dependant holeelectron competition and photocarrier saturation in BaTiO₃ when using intense laser pulses", J. Opt. Soc. Am. B Vol. 10 - 600 (1993)
- [DAMZEN et al. 1994] M.J. DAMZEN, R.P.M. GREEN and G.J. CROFTS, "Reflectivity and oscillation conditions of a gain medium in a self-conjugating loop geometry" Opt. Lett. Vol. 19 n°1 (1994)
- [DELBOUBE et al. 1989] A. DELBOULBE, C. FROMONT, J.P. HERRIAU , S. MALLICK and J.P. HUIGNARD, "Quasi-nondestructive readout of holographically stored information in photorefractive BSO crystals" Appl. Phys. Lett. Vol. 55 N°8 (1989)
- [DENZ et al. 1990] C. DENZ, T. RAUCH and T. TSCHUDI, "Analysis of irregular and chaotic fluctuations in a self pumped BaTiO₃ phase-conjugate mirror" S.P.I.E. Vol. 1281 (1990)
- [DING et al. 1992] Y. DING, H.J. EICHLER and B. SMANDEK, "Voltage reduction for photorefractive TWM in InP:Fe by optical gap control" Appl. Phys. A55, 21-24 (1992)
- [DUCHARME and al. 1987] S. DUCHARME, J. FEINBERG and R.R. NEURGAONKAR, "Electrooptic and Piezoelectric Measurements in Photorefractive Barium Titanate and SBN" I.E.E.E. QE-23, N°12 (1987)
- [DUCLOY 1982] M. DUCLOY, "Nonlinear optical phase conjugation" Festkörperprobleme Vol. 22 (1982)
- [DUNNING et al. 1990] G?J. DUNNING, D.M. PEPPER and M.B. KLEIN, "Control of self-pumped phase-conjugate reflectivity using incoherent erasure" Opt. Lett. Vol. 15 N°2 (1990)
- [D'YAKOV et al. 1991] V.A. D'YAKOV, S.A. KOROL'KOV, A.V. MAMAEV and V.V. SHKUNOV, "Phase self-conjugation of pump waves with "boiling" speckle-structure as a result of stimulated difusion backscattering in KnBO₃:Fe" S.P.I.E. Vol. 1841 (1991)
- [EIMERL 1987] D. EIMERL, "Crystal Symmetry and the Electrooptic Effect" I.E.E.E. QE-23, N°12 (1987)
- [ELISEEV et al. 1991] V.V. ELISEEV, V.T. TIKHONCHUK and A.A. ZOZULYA, "Double phase-conjugate mirror: two-dimensional analysis".J. Opt. Soc. Am. B Vol. 8 N°12 (1991)
- [ELISEEV et al. 1992] V.V. ELISEEV, A.A. ZOZULYA, G.D. BACHER G.D and J. FEINBERG, "Self-bending of light beams in photorefractive phase conjugators" J. Opt. Soc.

- [EWBANK et al. 1986] M.D. EWBANK, P. YEH and J. FEINBERG, "Photorefractive conical diffraction in BaTiO₃" Opt. Comm. Vol. 59 N°5,6 (1986)
- [EWBANK et al. 1987] M.D. EWBANK, R.R. NEURGAONKAR, W.K. CORY and J. FEINBERG, "Photorefractive properties of SBN" J. Appl. Phys. 62 , 2 (1987)
- [FAINMAN et al. 1986] Y. FAINMAN, E. KLANCNIK and S.H. LEE, "Optimal coherent image amplification by two-wave coupling in photorefractive BaTiO₃" Opt. Eng. Vol. 25, N°2 (1986)
- [FEINBERG and HELLWARTH 1980] J. FEINBERG and R.W. HELLWARTH, "Phase-conjugating Mirror with continuous-wave gain" Opt. Lett. Vol. 5, N°12 (1980)
- [FEINBERG 1980] J. FEINBERG, "Real-time edge enhancement using the photorefractive effect" Opt. Lett. Vol. 5, N° 8 (1980)
- [FEINBERG et al. 1980] J. FEINBERG J., D. HEIMAN, A.R. TANGUAY and R.W. HELLWARTH, "Photorefractive effects and light-induced charge migration in barium titanate" J. Appl. Phys. Vol. 51, N°3 - 1297 (1980) Erratum J. Appl. Phys. Vol. 52 - 537 (1981)
- [FEINBERG and HELLWARTH 1980] J. FEINBERG and R.W. HELLWARTH, "Phase conjugating mirror with continuous-wave gain" Opt. Lett. Vol. 5 - 519 (1980) Erratum Opt. Lett. Vol. 6 - 257 (1981)
- [FEINBERG 1982-1] J. FEINBERG, "Self-pumped, continuous-wave phase conjugator using internal reflection" Opt. Lett. Vol. 7, N°10 (1982)
- [FEINBERG 1982-2] J. FEINBERG, "Asymmetric self-defocusing of an optical beam from the photorefractive effect" J. Opt. Soc. Am. Vol. 72 N°1 (1982)
- [FEINBERG 1983] J. FEINBERG, "Interferometer with a self-pumped phase-conjugating mirror" Opt. Lett. Vol. 8 N°11, (1983)
- [FEINBERG and BACHER 1986] J. FEINBERG and G.D. BACHER, "Phase-locking lasers with phase conjugation" Appl. Phys. Lett. Vol. 48 N°9 (1986)
- [FIELD and DAVIDSON 1993] C.T. FIELD and F. DAVIDSON, "Photorefractive Two-Wave Mixing in the presence of high-speed optical phase modulation" Appl. Opt. Vol. 32 N°27 (1993)
- [FIELD and DAVIDSON 1994] C.T. FIELD and F. DAVIDSON, "Frequency Acquisition with Photorefractive Two-Wave Mixing" Opt. Lett. Vol. 19 N°2 (1994)

- [FISH et al.] D.A. FISH, A.K. POWELL and T.J. HALL, "The symmetry of FWM with absorption"
- [FISH et al.] D.A. FISH, A.K. POWELL and T.J. HALL, "A steady state solution to FWM in the transmission geometry geometry utilising the SU²" group symmetry"
- [FISCHER et al. 1981] B. FISCHER, M. CRONIN-GOLOMB, J.O. WHITE, and A. YARIV, "Amplified reflexion, transmission, and self-oscillation in real-time holography" Opt. Lett. Vol. 6 N°11 (1981)
- [FISCHER 1986] B. FISCHER, "Theory of self-frequency detuning of oscillations by wave mixing in photorefractive crystals" Opt. Lett. Vol. 11, N°4 (1986)
- [FISCHER et al. 1987-1] B. FISCHER, M. CRONIN-GOLOMB, J.O. WHITE, A. YARIV and R.R. NEURGAONKAR, "Amplifying continuous wave phase conjugate mirror with strontium barium niobate" Appl. Phys. Lett. Vol. 40 N°10 (1987)
- [FISCHER et al. 1987-2] B. FISCHER, S. WEISS, and S. STERNKLAR, "Spatial light modulation and filtering effects and photorefractive wave mixing" Appl. Phys. Lett. Vol. 50 N°9 (1987)
- [FISCHER 1983] R.A. FISCHER, "Optical Phase Conjugation" Academic Press, Quantum Electronics - Principles and Applications 1983
- [FORD et al. 1988] J.E. FORD, Y. FAINMAN and S.H. LEE, "Time-integrating interferometry using Photorefractive fanout" Opt. Lett. Vol. 13, N°10 (1988)
- [FORD et al. 1989] J.E. FORD, Y. FAINMAN and S.H. LEE, "Enhanced photorefractive performance from 45°-cut BaTiO₃" Appl. Opt. Vol. 28 N°22 (1989)
- [FOURKAS 1993] J.T. FOURKAS, R. TREBINO, M.A. DUGAN and M.D. FAYER, "Extra resonances in time-domain four-wave mixing" Opt. Lett. Vol. 18 N°10 (1993)
- [FOX 1973] A.J. FOX, "Longitudinal Electro-Optic effect in barium strontium niobate (Ba_xSr_{1-x}Nb₂O₆)" J. Appl. Phys. Vol. 44, N°1 (1973)
- [FRIDKIN 1977] M. FRIDKIN, Appl. Phys. Vol. 13 - 357 (1977)
- [GARRETT et al. 1993] M.H. GARRETT, J.Y. CHANG, H.P. JENSEN and C. WARDE, "Self-pumped phase conjugation and FWM in 0°- and 45°-cut n-type BaTiO₃:Co" Opt. Lett. Vol. 18 N°6 (1993)
- [GAUTHIER ET AL. 1987] D.J. GAUTHIER, P. NARUM P. and R. BOYD, "Observation of Deterministic Chaos in a Phase-Conjugate Mirror" Phys. Rev. Lett. Vol. 58 N°16 (1987)
- [GERRITSEN 1967] H.J. GERRITSEN, "Nonlinear effects in image formation" Appl. Phys.

- [GIULIANO 1981] C.R. GIULIANO, "Applications of optical phase conjugation" *Physics Today*, April (1981)
- [GLAS et al. 1974] A. GLASS, D. VON DER LINDE and T.J. NEGRAN, "High-voltage bulk photovoltaic effect and the photorefractive process in LiNbO₃" *Appl. Phys. Lett.* Vol. 25, N°4 (1974)
- [GOETZ et al. 1991-1] M. GOETZ, G.E. KUGEL and J.M. VANZO, "Étude temporelle de l'onde conjuguée obtenue par self-pumping dans un cristal de titanate de baryum dans différentes configurations géométriques" Réunion du groupement interrégional "Optique Grand Est" (1991)
- [GOETZ et al. 1991-2] M. GOETZ, G.E. KUGEL and J.M. VANZO, "Optimization of a phase conjugate mirror using a self-pumped photorefractive baryum titanate crystal" *Photorefractive Materials, effects and devices, Technical Digest Vol. 14 Beverly* (1991)
- [GOETZ et al. 1991-3] M. GOETZ, G.E. KUGEL and J.M. VANZO, "Optimization of a phase conjugate mirror using a self-pumped photorefractive baryum titanate crystal" *International Summer School on Optical Phase Conjugation, Prague* (1991)
- [GOETZ et al. 1992] M. GOETZ, G.E. KUGEL and J.M. VANZO, "Non-linear materials for optical phase-conjugation" SAAR-LOR-LUX Meeting on Advanced Materials and Nanocomposite Techniques (1992)
- [GOETZ et al. 1995] M. GOETZ, G.E. KUGEL and J.M. VANZO, "Temporal Behaviour of the Phase Conjugate Wave obtained by means of a BaTiO₃ Crystal in a CAT Configuration" à paraître dans *Opt. Materials* Janvier 1995
- [GOWER 1988] M.C. GOWER, "Phase conjugation" *J. Mod. Opt.* Vol. 35 N°3 - 449 (1988)
- [GOWER and HRIBECK 1988] M.C. GOWER and P. HRIBECK, "Mechanisms for internally self-pumped phase-conjugate emission from BaTiO₃ crystals" *J. Opt. Soc. Am. B* Vol. 5 N°8 - 1750 (1988)
- [GOWER and PROCH 1994] M.C. GOWER and D. PROCH, "Optical Phase Conjugation" Springer Verlag 1994.
- [GRYNBERG et al. 1992] G. GRYNBERG, A. PETROSSIAN, M. PINARD and M. VALLET, "Phase-contrast mirror based on four-wave mixing" *Europhys. Lett.* 17, 3 (1992)
- [GU and YEH 1991-1] C. GU and P. YEH, "Theory of photorefractive phase-conjugate ring

oscillators" J. Opt. Soc. Am. B Vol. 8 N°7 (1991)

- [GU and YEH 1991-2] C. GU and P. YEH, "Scattering due to randomly distributed charge particles in photorefractive crystals" Opt. Lett. Vol. 16 N°20 (1991)
- [GU et al. 1991] C. GU, R. SAXENA, L.C. HUANG, Q.B. HE and P. YEH, "Self-pumped ring phase conjugation using reflection gratings in Kerr media" S.P.I.E. Vol. 1841 (1991)
- [GUHA and CONNER 1992] S. GUHA and P. CONNER, Opt. Comm. Vol. 89 - 107 (1992)
- [GUNTER 1974] P. GUNTER, "Electro-Optical Properties of KNbO₃" Opt. Comm. Vol. 11, N°3 (1974)
- [GUNTER and MICHERON 1978] P. GUNTER and F. MICHERON, "Photorefractive Effects and Photocurrents in KNbO₃ : Fe" Ferroelectrics, Vol. 18 (1978)
- [GUNTER 1982] P. GUNTER, "Holography, Coherent light amplification and optical phase conjugation with photorefractive materials" Phys. Rep. Vol. 93, N°4 (1982)
- [GUNTER 1982] P. GUNTER, "Electric-field dependence of phase-conjugate wave-front reflectivity in reduced KNbO₃ and Bi₁₂GeO₂₀" Opt. Lett. Vol. 7, N°1 (1982)
- [GUNTER et al. 1985] P. GUNTER, E. VOIT, M.Z. ZHA and J. ALBERS, "Self-pulsation and Optical Chaos in Self-pumped Photorefractive BaTiO₃" Opt. Comm. Vol. 55, N°3 (1985)
- [GUNTER and HUIGNARD 1988] P. GUNTER and J.P. HUIGNARD Editors., "Photorefractive materials and their applications" Springer Verlag, Topics in Applied Physics Vol. 61 and 62 (1988)
- [HATTCOCK et al. 1987] R.S. HATHCOCK, D.A. TEMPLE and C. WARDE, "Photorefractive Properties of BaTiO₃ : Cr" I.E.E.E. QE-23, N°12 (1987)
- [HAYES et al. 1977] C.L. HAYES, R.A. BRANDEWIE, W.C. DAVIS and G.E. MEVERS, J. Opt. Soc. Am. Vol. 67 - 269 (1977)
- [HE et al. 1992] Q.B. HE , P. YEH, C. GU and R.R. NEURGAONKAR, "Multigrating competition effects in photorefractive mutually pumped phase conjugation" J. Opt. Soc. Am. B Vol. 9 N°1 (1992)
- [HE et al. 1994] Q.B. HE, S. CAMPBELL, P. YEH, X. MA and D. SHEN, "Compact reflection-grating-based phase conjugator in KNbO₃:Fe crystals" Appl. Opt. Vol. 33 No. 19 - 4320 (1994)
- [HELLWARTH 1977] R.W. HELLWARTH, "Generation of time-reversed wave fronts by nonlinear refraction" J. Opt. Soc. Am. Vol. 67 - 1 (1977)

- [HERMANNNS et al. 1992] A. HERMANNNS, C. BENKERT, D. LINIGER and D.Z. ANDERSON, "The transfert function and impulse response of photorefractive two-beam coupling" I.E.E.E. QE - 28 N°3 (1992)
- [HERRIAU et al. 1983] J.P. HERRIAU, A. DELBOULBE, B. LOISEAUX and J.P. HUIGNARD, "Commutation Spatiale par Réseau Holographique Photo-induit" Revue Technique THOMSON-CSF, Vol. 15, N°3 (1983)
- [HERRIAU and HUIGNARD 1986] J.P. HERRIAU and J.P. HUIGNARD, "Hologram fixing process at room temperature in photorefractive BSO crystals" Appl. Phys. Lett. Vol. 49 N° 18 (1986)
- [HERRIAU et al. 1987] J.P. HERRIAU, D. ROJAS, J.P. HUIGNARD, J.M. BASSAT and J.C. LAUNAY, "Highly efficient diffraction in photorefractive BSO-BGO crystals at large applied fields" Ferroelectrics, Vol. 75 (1987)
- [HILLION 1993] P. HILLION, "Spacetime geometrical optics" P. Appl. Opt. Vol. 2 (1993)
- [HOFMEISTER et al. 1993] R. HOFMEISTER, A. YARIV, A. KEWITSCH and S. YAGI, "Simple methods of measuring the net photorefractive phase shift and coupling constant" Opt. Lett. Vol. 18 N°7 (1993)
- [HONDA and MATSUMOTO 1991] T. HONDA and H. MATSUMOTO, "Effects of BaTiO₃ self-pumped phase-conjugation in 400m atmospheric optical path" Jap. J. Appl. Phys. Vol. 30 N°12A (1991)
- [HONDA and MATSUMOTO 1994] T. HONDA and H. MATSUMOTO, "Reflection-grating self-pumped phase conjugation with optical feedback free input conditions" Appl. Opt. Vol. 33, N° 20 - 4475 (1994)
- [HONG 1993] Y.H. HONG, P. XIE, J.H. DAI, Y. ZHU, H.G. YANG and H.J. ZHANG, "Fanning effects in photorefractive crystals" Opt. Lett. Vol. 18 N°10 (1993)
- [HOROWITZ et al. 1991] M. HOROWITZ, D. KLIGLER and B. FISCHER, "Time-dependant behavior of photorefractive two- and four-wave mixing" J. Opt. Soc. Am. B Vol. 8 N°10 (1991)
- [HRIBEK and GOWER 1989] P. HRIBEK and M.C. GOWER, "White light phase-conjugate lensless image projection" J. Mod. Opt. Vol. 36 N°8 (1989)
- [HRIBEK and GOWER 1991] P. HRIBEK and M.C. GOWER, "Stability of self-pumped phase-conjugate emission from BaTiO₃ crystal" International Summer School on Optical Phase Conjugation Prague (1991)
- [HUIGNARD and MICHERON 1976] J.P. HUIGNARD and F. MICHERON, "High-sensitivity

read-write volume holographic storage in Bi₁₂SiO₂₀ and Bi₁₂GeO₂₀ crystals" Appl. Phys. Lett. Vol. 29, N°9 (1976)

- [HUIGNARD et al. 1979] J.P. HUIGNARD, J.P. HERRIAU, P. AUBORG and E. SPITZ, "Phase conjugate wavefront generation via real-time holography in BSO" Opt. Lett. Vol. 4 (1979)
- [HUIGNARD et al. 1980] J.P. HUIGNARD, J.P. HERRIAU, G. RIVET and P. GUNTER, "Phase conjugation and spatial-frequency dependence of wavefront reflectivity in BSO crystals" Opt. Lett. Vol. 5 N°3 (1980)
- [HUIGNARD 1984] J.P. HUIGNARD, "Matériaux non linéaires à variation d'indice photoinduite et applications" Revue Technique THOMSON-CSF, Vol. 16 N°3 (1984)
- [HUIGNARD and ROOSEN] J.P. HUIGNARD and G. ROOSEN, "Photorefractive materials for optical precessing"
- [HUIGNARD et al. 1985] J.P. HUIGNARD, H. RAJBENBACH, P. REFREGIER and L. SOLYMAR, "Wave mixing in photorefractive bismuth silicon oxide crystals and its applications" Opt. Eng. Vol. 24 N°4 (1985)
- [HUSSAIN et EASON 1991] G. HUSSAIN and R.W. EASON, "Velocity filtering using complementary gratings in photorefractive BSO" Opt. Comm. Vol. 86 (1991)
- [ING and MONCHALIN 1993] R.K. ING and J.P. MONCHALIN, "Measurement of the photorefractive phase shift by polarization interferometry" Opt. Lett. Vol. 18 N°11 (1993)
- [JA 1984] Y.H. JA, "Optical beam equalisation using degenerate TWM" Electr. Lett. Vol. 20 N°25 (1984)
- [JA 1985-1] Y.H. JA, "Real-time non-destructive testing of phase objects using FWM with photorefractive BGO crystals" Opt. Las. Techn. (1985)
- [JA 1985-2] Y.H. JA, "Real-time optical image differentiation by degenerate four-wave mixing" Appl. Phys. B-36 (1985)
- [JA 1986] Y.H. JA, "Degenerate four-wave mixing in photorefractive BGO crystals involving internal reflections" Appl. Phys. B- 41 (1986)
- [JAMES et al. 1993] S.W. JAMES, K.E. YODEN, P.M. JEFFREY, R.W. EASON, P.J. CHANDLER, L. ZHANG and P.D. TOWNSEND, "BaTiO₃ waveguide self-pumped phase conjugator" Opt. Lett. Vol. 18 N°14 (1993)
- [JAMES et al. 1993] S.W. JAMES, K.E. YODEN, P.M. JEFFREY, R.W. EASON, P.J. CHANDLER, L. ZHANG and P.D. TOWNSEND, "Waveguide mutually pumped phase conjugators" Appl. Opt. Vol. 32 N°27 (1993)

- [JEGANATHAN et al. 1994] M. JEGANATHAN, M. C. BASHAW and L. HESSELINK, "Trapping the grating envelope in bulk photorefractive media" *Opt. Lett.* Vol. 19 N°18 (1994)
- [JONATHAN et al. 1988] J.C. JONATHAN, G. ROOSEN and P. ROUSSIGNOL, "Time-resolved buildup of a photorefractive grating induced in BSO by picosecond light pulses" *Opt. Lett.* Vol. 13 N°3 (1988)
- [JOSEPH et al. 1991] J. JOSEPH, P.K.C. PILLAI and K. SINGH, "High-gain, low-noise signal beam amplification in photorefractive BaTiO₃" *Appl. Opt.* Vol. 30 N°23 (1991)
- [JULLIEN 1992] P. JULLIEN, "Etude des effets électrooptiques et photoréfractifs du titanate de baryum pur et dopé au fer" Thèse d'état, Université de Bourgogne (1992)
- [JULLIEN 1994] P. JULLIEN, "Influence de la température sur les coefficients électrooptiques du titanate de baryum" Communication privée (1994)
- [KAMSHILIN and GARCIA 1992] A.A. KAMSHILIN and P.M. GARCIA, "TWM influence on holographic readout in photorefractive crystals" *S.P.I.E.* Vol. 1626 (1992)
- [KAMSHILIN et al. 1993] A.A. KAMSHILIN, R. SILVENNOINEN, T. JAASKELAINEN, C.J. LIMA, M.R.B. ANDREETA and V.V. PROKOFIEV, "Two-wave mixing in photorefractive Bi₁₂SiO₂₀ fibers" *Opt. Lett.* Vol. 18 N°9 - 690 (1993)
- [KAPOOR et al. 1993] R. KAPOOR, M. MOGHBEL and P. VENKATESWARLU, "Energy-transfer measurement and determination of the phase shift between the holographic grating and the fringe pattern in photorefractive materials" *Opt. Lett.* Vol. 18 N°9 - 696 (1993)
- [KAWATA and KAWATA 1993] Y. KAWATA and S. KAWATA, "Speckle-free image amplification by two-wave coupling in a photorefractive crystal" *Appl. Opt.* Vol. 32 N°5 (1993)
- [KEVITSCH et al. 1993] A. KEVITSCH, M. SEGEV, A. YARIV and R.R. NEURGAONKAR, "Electric-field multiplexing/demultiplexing of volume holograms in photorefractive media" *Opt. Lett.* Vol. 18 N°7 (1993)
- [KHOO et al. 1993] I.C. KHOO, N. BELDYUGINA, H. LI, A.V. MAMAIEV and V.V. SHKUNOV, "Onset dynamics of self-pumped phase conjugation from speckle noise" *Opt. Lett.* Vol. 18 N°7 (1993)
- [KLEIN and VALLEY 1985-1] M.B. KLEIN and G.C. VALLEY, "Beam coupling in BaTiO₃ at 442 nm" *J. Appl. Phys.* Vol. 57 N°11 (1985)

- [KLEIN and VALLEY 1985-2] M.B. KLEIN and G.C. VALLEY, "Characteristics of BaTiO₃ for electro-optic devices "Advances in Materials for Active Optics, Vol. 567 (1985)
- [KLEIN and SCHWARTZ 1986] M.B. KLEIN and R.N. SCHWARTZ, "Photorefractive effect in BaTiO₃ : macroscopic origins" J. Opt. Soc. Am. B Vol. 3 N°2 (1986)
- [KLEIN et al. 1986] M.B. KLEIN, D.J. DUNNING, G.C. VALLEY, R.C. LIND and T.R. O'MEARA, "Imaging Threshold detector using a phase-conjugate resonator in BaTiO₃" Opt. Lett. Vol. 11 N°9 (1986)
- [KLEIN et al. 1988] M.B. KLEIN, S.W. McCAHON, T.F. BOGESS and G.C. VALLEY, "High-accuracy, high-reflectivity phase conjugation at 1.06µm by four-wave mixing in photorefractive gallium arsenide" J. Opt. Soc. Am. B Vol. 5 (1988)
- [KNITE et al. 1989] M. KNITE, S. ANSPOK and M. OZOLINSH, "Controlling of visible and infrared radiation by use of holographic gratings in PLZT ceramics" Ferroelectrics Vol. 90 (1989)
- [KOGELNIK 1965] H. KOGELNIK, "Holographic image projection through inhomogenous media", Bell Syst. Tech. J. Vol. 44 - 2451 (1965)
- [KOGELNIK 1969] H. KOGELNIK, "Coupled wave theory for thick hologram gratings" Bell Technical Journal (1969)
- [KOROL'KOV et al. 1991] S.A. KOROL'KOV, A.V. MAMAIEV and V.V. SHKUNOV, "Double phase conjugation of asynchronous optical beams" S.P.I.E. Vol. 1841 (1991)
- [KUKHTAREV et al. 1979] N.V. KUKHTAREV, V.B. MARKOV, S.G. ODULOV, M.S. SOSKIN and V.L. VINETSKII, Ferroelectrics Vol.22 - 949 (1979)
- [KUKHTAREV et al. 1984] N.V. KUKHTAREV, E. KRATZIG, H.C. KULICH, R.A. RUPP and J. ALBERS, "Anisotropic selfdiffraction in BaTiO₃" Appl. Phys. B 35, 17-21 (1984)
- [KRAINAK and DAVIDSON 1989] M.A. KRAINAK and F.M. DAVIDSON, "Two-wave mixing gain in Bi₁₂SiO₂₀ with applied alternating electric fields : self-diffraction and optical activity effects" J. Opt. Soc. Am. B Vol. 6, N°4 (1989)
- [KRATZIG and RUPP 1986] E. KRATZIG and R.A. RUPP, "Holographic Storage Properties of Electrooptic Crystals" S.P.I.E. Vol. 673 International Conference on Holography Applications (1986)
- [KROLIKOVSKI et al. 1991] W. KROLIKOWSKI, B.S. CHEN and M. CRONIN-GOLOMB, "Temporal instabilities in an externally driven ring phase conjugator" J. Opt. Soc. Am. B Vol. 8 N°7 (1991)
- [KRUMINS and GUNTER 1979] A. KRUMINS and P. GUNTER, "Diffraction Efficiency

and Energy Transfer During Hologram Formation in Reduced KNbO_3 " Appl. Phys. Vol. 19 (1979)

- [KUKHTAREV et al. 1977] N.V. KUKHTAREV, V.B. MARKOV and S.G. ODULOV, "Transient Energy Transfer During Hologram Formation in LiNbO_3 in external Electric Field" Opt. Comm. Vol. 23, N°3 (1977)
- [KUKHTAREV et al. 1979] N.V. KUKHTAREV, V.B. MARKOV, S.G. ODULOV and M.S. SOSKIN, "Holographic Storage in Electrooptic Crystals. I. Steady state. II. Beam coupling - Light amplification" Ferroelectrics Vol. 22 (1979)
- [KUKHTAREV and ODULOV 1979] N.V. KUKHTAREV and S.G. ODULOV, J.E.T.P. Lett. 30, 4 (1979)
- [KUKHTAREV and ODULOV 1980] N.V. KUKHTAREV and S.G. ODULOV, Opt. Comm. 32, 183 (1980)
- [KUKHTAREV et al. 1984] N.V. KUKHTAREV, E. KRATZIG, H.C. KULICH, R.A. RUPP and J. ALBERS, "Anisotropic self-diffraction in BaTiO_3 " Appl. Phys. B Vol. 35 17-21 (1984)
- [KUKHTAREV et al.] N.V. KUKHTAREV, T.I. SEMENEC and P. HRIBEK, "The influence of photoelasticity on the self-diffraction of light in cubic photorefractive crystals"
- [KUMAR et al. 1987] J. KUMAR, G. ALBANESE, and W.H. STEIR, "Photorefractive two-beam coupling with applied radio-frequency fields: theory and experiment" J. Opt. Soc. Am. B Vol. 4 N°7 (1987)
- [KWONG et al. 1986] S.K. KWONG, G.A. RAKULJIC and A. YARIV, "Real time image subtraction and "exclusive or" operation using a SPPCM" Appl. Phys. Lett. Vol. 48, N°3 (1986)
- [KWONG et al. 1988] S.K. KWONG, Y. TAMITA and A. YARIV, "Optical tracking filter using transient energy coupling" J. Opt. Soc. Am. B Vol. 5 N°8 (1988)
- [LAM 1985] J.F. LAM, "Origin of phase conjugate waves in self-pumped photorefractive mirrors" Appl. Phys. Lett. Vol. 46 N°10 (1985)
- [LAMBELET et al. 1994] P. LAMBELET, R.P. SALATHE, M. GARRETT and D. RYTZ, "Characterization of a photorefractive phase conjugator by optical low-coherence reflectometry" Appl. Phys. Lett. Vol. 64 N°9 (1994)
- [LEE et al. 1991] W.S. LEE, S. CHI, P. YEH and R. SAXENA, "Theory of phase-conjugate oscillators I. and II." J. Opt. Soc. Am. B Vol. 8 N°7 (1991)

- [LEE 1991] Y.H. LEE, "Numerical calculations of two-beam energy coupling gains in photorefractive BaTiO₃ crystal" I.E.E.E. QE-27 N°20 (1991)
- [LEYVA et al. 1993] V. LEYVA, A. AGRANAT and A. YARIV, "Increased photorefractive sensitivity in double-doped KTa_{1-x}Nb_xO₃:FeTi" Opt. Lett. Vol. 18 N°12 (1993)
- [LIBERMAN et al. 1991] V.S. LIBERMAN, O.P. NESTIORKIN and B.Y. ZELDOVICH, "Higher harmonics of the photorefractive grating under recording through the phase-locked detection mechanism" S.P.I.E. Vol. 1841 (1991)
- [LOVETT] D.R. LOVETT "Tensor Properties of Crystals" Adam Hilger
- [MACCORMACK et al. 1994] S. MACCORMACK, J. FEINBERG and M.H. GARRETT, "Injection locking a Laser-diode array with a phase-conjugate beam" Opt. Lett. Vol. 19, N° 2 (1994)
- [MCDONALD and FEINBERG 1983] K.R. MCDONALD and J. FEINBERG, "Theory of a self-pumped phase conjugator with two coupled interaction regions" J. Opt. Soc. Am. Vol. 73, N° 5 (1983)
- [MACDONALD et al. 1984] K.R. MACDONALD, J. FEINBERG, Z.Z. MING and P. GUNTER, "Asymmetric Transmission through A Photorefractive Crystal of Barium Titanate" Opt. Comm. Vol. 50 N°3 (1984)
- [MAGER 1994] L. MAGER, "Correction de fronts d'onde de faisceaux lasers impulsions par mélange d'ondes photoréfractif" Thèse de l'Université d'Orsay (1994)
- [MAGER et al. 1994] L. MAGER, C. LAQUARNOY, G. PAULIAT, M.H. GARRETT, D.RYTZ and G. ROOSEN, "High-quality self-pumped phase conjugation of nanosecond pulses at 532 nm using photorefractive BaTiO₃" Opt. Lett. Vol. 19 N° 19 (1994)
- [MAGNUSSON and GAYLORD 1974] R. MAGNUSSON and T.K. GAYLORD, "Laser scattering induced holograms in lithium niobate" Appl. Opt. 13, 1545 (1974)
- [MAMAEV and ZOZULIA 1991] A.V. MAMAEV and A.A. ZOZULIA, "Conjugation of mutually incoherent light beams in the geometry of two interconnected ring mirrors" J. Opt. Soc. Am. B Vol. 8 N°7 (1991)
- [MARRAKCHI et al. 1981] A. MARRAKCHI, J.P. HUIGNARD and P. GUNTER, "Diffraction Efficiency and Energy Transfer in TWM Experiments with BSO Crystals" Appl. Phys. Vol. 24 (1981)
- [MARRAKCHI 1988-1] A. MARRAKCHI, "Photorefractive spatial light modulation based on enhanced self diffraction in sillenite crystals" Opt. Lett. Vol. 13 N°8 (1988)
- [MARRAKCHI 1988-2] A. MARRAKCHI, "Two-beam coupling photorefractive spatial light modulation with reversible contrast" Appl. Phys. Lett. Vol. 53 N°8 (1988)

- [MICHÉRON and BISMUTH 1972] F. MICHÉRON and G. BISMUTH, "Electrical control of fixation and erasure of holographic patterns in ferroelectric materials" Appl. Phys. Lett. Vol. 20 N°2 (1972)
- [MICHÉRON] F. MICHÉRON, "Effets et matériaux électrooptiques"
- [MILLER et al. 1987] M.J. MILLER, E.J. SHARP, G.L. WOOD and W.W. CLARK III, "Time response of a cerium-doped SBN self-pumped phase-conjugate mirror" Opt. Lett. Vol. 12 N°5 (1987)
- [MOHARAM et al. 1979] M.G. MOHARAM, T.K. GAYLORD and R. MAGNUSSON, J. "Holography grating formation in photorefractive crystals with arbitrary electron transport lengths" Appl. Phys. Vol. 50 N°9 (1979)
- [MONTEMEZZANI and GUNTER 1990] G. MONTEMEZZANI and P. GUNTER, "Thermal hologram fixing in pure and doped KNbO₃ crystals" J. Opt. Soc. Am. B Vol. 7 N°12 (1990)
- [MONTEMAZZANI et al. 1993] G. MONTEMEZZANI, P. ROGIN, M. ZGONIK and P. GUNTER, "Interband photorefractive effects in KNbO₃ induced by ultraviolet illumination" Opt. Lett. Vol. 18 N°14 (1993)
- [MONTGOMERY et al. 1988] S.R. MONTGOMERY, J. YARRISON-RICE, D.O. FEDERSON, G. SALAMO, M.J. MILLER, W.W. CLARK III, G.L. WOOD, SHARP E.J. and NEURGAONKAR R.R. "Self-pumped phase conjugation in the red in photorefractive Ba_{0.5}Sr_{1.5}K_{0.25}Na_{0.75}Nb₅O₁₅ and Sr_{0.6}Ba_{0.4}Nb₂O₆ with cerium in 9-fold coordinated sites" J. Opt. Soc. Am. Vol. 5 N°8 (1988)
- [MORETTI et al. 1991] P. MORETTI, P. THEVENARD, K. WIRL, P. HERTEL, H. HESSE, E. KRATZIG and G. GODEFROY, "Proton implanted waveguides in LiNbO₃, KNbO₃ and BaTiO₃" EMF7 Dijon (1991)
- [NUNZI 1990] D.J.M. NUNZI, "Conjugaison de phase en régime picoseconde d'absorption à deux photons dans les polydiacétylènes" Thèse de Doctorat
- [NYE 1961] J.F. NYE, "Propriétés physiques des cristaux" Dunod, Paris (1961)
- [PARTANEN et al. 1991] J.P. PARTANEN, P. NOUCHI, J.M.C. JONATHAN and R.W. HELLWARTH, "Comparison between holographic and transient-photocurrent measurements of electron mobility in photorefractive Bi₁₂SiO₂₀" Phys. Rev. B Vol. 44 N°4 - 1487 (1991)
- [PARYGIN and CHIRKOV 1975] V.N. PARYGIN and L.E. CHIRKOV, "Analysis of the linear electro-optic effect in crystals" Opt. Spectrosc. Vol. 38, N°2 (1975)

- [PAULIAT et al. 1985] G. PAULIAT, J.P. HERRIAU, A. DELBOULBE, G. ROOSEN and J.P. HUIGNARD, "Two-dimensional optical beam switching techniques using dynamic holography" S.P.I.E. Vol. 600 (1985)
- [PAULIAT et al. 1986] G. PAULIAT, J.P. HERRIAU, A. DELBOULBE, G. ROOSEN and J.P. HUIGNARD, "Dynamic beam deflection using photorefractive gratings in Bi₁₂SiO₂₀ crystals" Journal d'Optique Vol. 3 N°2 (1986)
- [PEDERSEN and JOHANSEN 1994] H.C. PEDERSEN and P.M. JOHANSEN, "Observation of angularly tilted subharmonic gratings in photorefractive bismuth silicon oxide" Opt. Lett. Vol. 19 N°18 (1994)
- [PEPPER et al. 1990] D. PEPPER, J. FEINBERG and N.V. KUKHTAREV, "L'effet Photoréfractif" Pour la Science N°158 (1990)
- [PETERSEN 1991] P.M. PETERSEN, "Theory of one-grating nondegenerate four-wave mixing and its application to a linear photorefractive oscillator" J. Opt. Soc. Am. B Vol. 8 N°8 (1991)
- [PETROV et al. 1989] M.P. PETROV, S.L. SOCHAVA and S.I. STEPANOV, "Double phase-conjugate mirror using a photorefractive Bi₁₂TiO₂₀" Opt. Lett. Vol. 14 N°5 (1989)
- [PETROV et al. 1991] M.P. PETROV, S.I. STEPANOV and A.V. KHOMENKO, "Photorefractive Crystals in Coherent Optical Systems" Springer Verlag Springer Series on Optical Sciences (1991)
- [PIEPER et al. 1994] W. PIEPER, C. KURTZKE, R. SCHNABEL, D. BREUER, R. LUDWIG, K. PETERMANN and H.G. WEBER, "Nonlinearity-insensitive standard-fibre transmission based on optical-phase conjugation in a semiconductor-laser amplifier" Electron. Lett. Vol. 30 N° 9 (1994)
- [PINO et al. 1995] M. del PINO, M. CARRASCOSA, T. RAUCH and C. DENZ, "Numerical simulation of the time evolution of photorefractive phase conjugate beams: multigratings operation" à paraître dans Opt. Materials Janvier 1995
- [QIAO et al. 1993] Y. QIAO, S. ORLOV, D. PSALTIS and R.R. NEURGAONKAR, "Electrical fixing of photorefractive holograms in SBN" Opt. Lett. Vol. 18 N° 12 (1993)
- [RAJBENBACH et al. 1989] H. RAJBENBACH, A. DELBOULBE and J.P. HUIGNARD, "Noise suppression in Photorefractive image amplifiers" Opt. Lett. Vol. 14 N° 22 (1989)
- [RAKULJIC et al. 1986] G.A. RAKULJIC , A. YARIV and R.R. NEURGAONKAR, "Photorefractive properties of ferroelectric BaTiO₃ and SBN₆₀" Nonlinear Optics and Applications, Vol. 613 (1986)
- [RAKULJIC et al. 1987] G.A. RAKULJIC, K. SAYANO, A. YARIV and R.R. NEURGAONKAR,

"Self-starting passive phase conjugate mirror with Ce-doped strontium barium niobate" Appl. Phys. Lett. Vol. 50 N°1 (1987)

- [RAUCH et al. 1992] T. RAUCH, C. DENZ and T. TSCHUDI, "Analysis of irregular fluctuations in a self-pumped BaTiO₃ phase-conjugate mirror" Opt. Comm. 88, 160-166 (1992)
- [RING HOFER and SOLYMAR 1989] K.H. RINGHOFER and L. SOLYMAR, "Three-wave and four-wave forward mixing in photorefractive crystals" Appl. Phys. B Vol. 48 (1989)
- [ROBLIN et al. 1994] M.L. ROBLIN, C. JOUBERT, H. COIC and F. GIRES, "Optical phase conjugation by degenerate four-wave mixing: spatial and temporal aspects" Pure Appl. Opt. 3 , 73-86 (1994)
- [RODRIGUEZ et al. 1987] J. RODRIGUEZ, A. SIAHMAKOUN, G. SALAMO, M.J. MILLER, W.W. CLARK III, G.L. WOOD, E.J. SHARP and R.R. NEURGAONKAR, "BSKNN as a self-pumped phase conjugator" Appl. Optics, Vol. 26 N°9 (1987)
- [ROOSEN and PLANTAGENEST 1983] G. ROOSEN and M.T. PLANTAGENEST, "Transient hologram in a photorefractive material as a high capacity optical switching device" EMF5 Malaga (1983)
- [ROSS and EASON 1994] G.W. ROSS and R.W. EASON , "Double phase-conjugate mirror with sixfold gain in photorefractive BaTiO₃ at near-infrared wavelengths" Opt. Lett. Vol 18 N°8 (1993)
- [ROY and SINGH 1990] A. ROY and K. SINGH, "Spatially Varying Two Beam Coupling in Photorefractive Media in the Presence of Biasing Incoherent Illumination" J. of Opt. Vol. 21 N°4 (1990)
- [RUPP 1992] R.A. RUPP, "Material characterization by holographic methods" Appl. Phys. A Vol. 55 N°1 (1992)
- [RYTZ and DE ZHONG 1989] D. RYTZ and S. DE ZHONG, "Self-pumped phase conjugation in potassium niobate KNbO₃" Appl. Phys. Lett. Vol.54 N°26 (1989)
- [SALAMO et al. 1986] G. SALAMO, M.J. MILLER, W.W. CLARK III, G. WOOD and E.J. SHARP , "SBN as a self-pumped phase conjugator" Opt. Comm. Vol 59 N°5 (1986)
- [SAXENA et al. 1991] R. SAXENA, C. GU and P. YEH, "Properties of photorefractive gratings with complex coupling constants" J. Opt. Soc. Am. B Vol. 8 N°5 (1991)
- [SAYANOV et al. 1987] K. SAYANOV, A. YARIV and R.R. NEURGAONKAR, "Order-of-magnitude reduction of the photorefractive response time in rhodium-doped

Sr_{0.6}Ba_{0.4}Nb₂O₆ with a dc electric field" Opt. Lett. Vol. 15 N°1 (1987)

- [SCOTT and WAGGOTT 1987] A.M. SCOTT and P. WAGGOTT, "Phase conjugation by self-pumped Brillouin induced four-wave mixing", Opt. Lett. Vol. 12 - 835 (1987)
- [SEGEV et al. 1987] M. SEGEV, S. WEISS and B. FISHER, "Coupling of diode laser arrays with photorefractive passive phase conjugate mirrors" Appl. Phys. Lett. Vol. 50 N°20 (1987)
- [SEGEV et al. 1992] M. SEGEV, B. CROSIGNANI and A. YARIV, "Spatial Solitons in Photorefractive Media" Phys. Rev. Lett. Vol. 68 N°7 (1992)
- [SEGEV et al. 1993-1] M. SEGEV, D. ENGIN, A. YARIV and G.C. VALLEY, "Temporal evolution of fanning in photorefractive crystals" Opt. Lett. Vol. 18 N°12 (1993)
- [SEGEV et al. 1993-2] M. SEGEV, D. ENGIN, A. YARIV and G.C. VALLEY, "Temporal evolution of photorefractive double phase-conjugate mirrors" Opt. Lett. Vol. 18 N°21 (1993)
- [SMOUT et al. 1986] A.M.C. SMOUT, R.W. EASON, M.C. GOWER, "Regular oscillations and self-pulsating in self-pumped BaTiO₃" Opt. Comm. Vol. 59 N°1 (1986)
- [SON et al. 1991] J.Y. SON, H.W. JEON and S.S. CHOI, "Light propagation in a photorefractive BaTiO₃ crystal" S.P.I.E. Vol. 1841 (1991)
- [SON et al. 1993] C.C. SON, M.W. CHANG and K.Y. HSU, "Contrast-reversible photorefractive incoherent-to-coherent optical converter by using an anisotropic strong volume hologram" Opt. Lett. Vol. 18 N°8 (1993)
- [STAEBLER and AMODEI 1972] D.L.STAEBLER and J.J. AMODEI, "Coupled-wave Analysis of Holographic Storage in LiNbO₃" J. Appl. Phys. Vol. 43 N°3 (1972)
- [STANKUS et al. 1994] J.J. STANKUS, S.M. SILENCE, W.E. MOERMER and G.C. BJORKLUND, "Electric)field-switchable stratified volume holograms in photorefractive polymers" Opt. Lett. Vol. 19 N°18 (1994)
- [STEPANOV et al. 1971] B.I. STEPANOV, E.V. IVAKIN and A.S. RUBANOV, "Recording two-dimensional and three-dimensional dynamic holograms in bleachable substances" Sov. Phys. Doct. Tech. Phys. Vol. 16 - 46 (1971)
- [STURMAN et al. 1993] B.I. STURMAN, M. MANN and K.H. RINGHOFER, "Instability of the resonance enhancement of moving photorefractive gratings" Opt. Lett. Vol 18 N°9 - 702 (1993)
- [SUZUKI and SATO 1993] T. SUZUKI and T. SATO, "Improvement of response time with an additional bias beam in a BaTiO₃ self-pumped phase-conjugate mirror" Appl. Opti. Vol. 32 N°21 (1993)

- [TAO et al. 1991] S. TAO, D.R. SELVIAH, B. MOBASHER, P. POON and J.E. MIDWINTER, "Angular selectivity of holographic gratings in BSO" Photorefractive Materials, effects and devices, Technical Digest Vol. 14 Boston (1991)
- [TAO et al. 1993] S. TAO, D.R. SELVIAH and J.E. MIDWINTER, "Spatioangular multiplexed storage of 750 holograms in a Fe:LiNbO₃ crystal" Opt. Lett. Vol. 18 N°11 (1993)
- [TEMPLE and WARDE 1986] D.A. TEMPLE and C. WARDE, "Anisotropic scattering in photorefractive crystals" J. Opt. Soc. Am. B 3, 337 (1986)
- [TOWNSEND and LAMALACCHIA 1970] R.L. TOWNSEND and J.T. LAMACCHIA, "Optically Induced Refractive Index Changes in BaTiO₃" J. of Appl. Phys. Vol. 41 N°13 (1970)
- [VAINOS and EASON 1986] N.A. VAINOS and R.W. EASON, "Real time enhancement by active spatial filtering via five wave mixing in photorefractive BSO" Opt. Comm. Vol. 59 N°3 (1986)
- [VAINOS and GOWER 1991] N.A. VAINOS and M.C. GOWER, "High fidelity phase conjugation and real time orthoscopic three-dimensional image projection in BaTiO₃" J. Opt. Soc. Am. B Vol. 8 N°11 (1991)
- [VALLEY and KLEIN 1983] G.C. VALLEY and M.B. KLEIN, "Optimal properties of photorefractive materials for optical data processing" Opt. Eng. Vol. 22 N°6 (1983)
- [VALLEY and DUNNING 1984] G.C. VALLEY and G.J. DUNNING, "Observation of optical chaos in a phase-conjugate resonator" Opt. Lett. Vol. 9 N°11 (1984)
- [VALLEY 1987] G.C. VALLEY, "Competition between forward- and backward-stimulated photorefractive scattering in BaTiO₃" J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 4, N°1 (1987)
- [VALLEY et al. 1988] G.C. VALLEY, S.W. MACCAHON and M.B. KLEIN, "Photorefractive measurement of photoionization and recombination cross sections in InP:Fe" J. Appl. Phys. Vol. 64 N°12 (1998)
- [VON DER LINDE and GLAS 1975] D. VON DER LINDE and A.M. GLASS, "Photorefractive Effects for Reversible Holographic Storage of Information" Appl. Phys. (1975)
- [VORONOV et al. 1980] V.V. VORONOV, I.R. DOROSH, Yu. S. KUZ'MINOV, and N.V. TKACHENKO, "Photoinduced light scattering in cerium-doped barium strontium niobate crystal" Sov. J. Quantum Electronics, 10, 1346 - 1349 (1980)
- [WEISS et al. 1987] S. WEISS, S. STERNKLAR and B. FISCHER, "Double phase-conjugate mirror : analysis, demonstration, and applications" Opt. Lett. Vol. 12, N°2

(1987)

- [WHITE and YARIV 1980] J.O. WHITE and A. YARIV, "Real-time image processing via four-wave mixing in a photorefractive medium" *Appl. Phys. Lett.* Vol. 37, N°1 (1980)
- [WHITE et al. 1982] J.O. WHITE, M. CRONIN-GOLOMB, B. FISCHER and A. YARIV, "Coherent oscillation by self-induced gratings in the photorefractive crystal BaTiO₃" *Appl. Phys. Lett.* Vol. 40, N°6 (1982)
- [WHITTEN and RAMSEY 1984] W.B. WHITTEN and J.M. RAMSEY, "Self-scanning of a dye laser due to feedback from a BaTiO₃ phase-conjugate reflector" *Opt. Lett.* Vol. 9 - 44 (1984)
- [WILLIAMS et al. 1994] R.B. WILLIAM, P. EWART and A. DREIZLER, "Velocimetry of gas using degenerate four-wave mixing" *Opt. Lett.* Vol. 19 N°18 (1994)
- [WOERDMAN 1971] J.P. WOERDMAN, "Formation of a transient free-carrier hologram in Si", *Opt. Comm.* Vol. 2 - 212 (1971)
- [WOOD et al. 1987] G.L. WOOD, W.W. CLARK III, M.J. MILLER, E.J. SHARP, G.J. SALAMO and R.R. NEURGAONKAR, "Broadband photorefractive properties and self-pumped phase conjugation and Ce-SBN:60" *I.E.E.E. QE* -23 N°12 (1987)
- [WOOD et al. 1992] G.L. WOOD, E.J. SHARP and G.J. SALAMO, "Performance of photorefractive self-pumped phase conjugators" *S.P.I.E.* Vol. 1626 (1992)
- [YANG and SIAHNAKOUN 1993] G. YANG and A. SIAHNAKOUN, "Time Delay Fizeau Phase-Conjugate Interferometer" *Appl. Opt.* Vol. 32 N°9 (1993)
- [YAO and FEINBERG 1993] X.S. YAO and J. FEINBERG, "Temporal shaping of optical pulses using beam coupling in a photorefractive crystal" *Opt. Lett.* Vol. 18 N°8 (1993)
- [YARIV 1977] A. YARIV, *I.E.E.E. JQE* Vol. 13 - 943 (1977)
- [YARIV 1989] A. YARIV, "Quantum Electronics" Holt Saunders, Third edition (1989)
- [YARIV 1991] A. YARIV, "Optical Electronics" Holt Saunders, Fourth edition (1991)
- [YARIV and PEPPER 1977] A. YARIV and D.M. PEPPER, "Amplified reflection, phase conjugation, and oscillation in degenerate four wave mixing" *Opt. Lett.* Vol. 1 - 16 (1977)
- [YEH 1987] P. YEH, "Photorefractive two-beam coupling in cubic crystals" *J. Opt. Soc. Am. B* Vol. 4 N°9 (1987)
- [YEH et al. 1988] P. YEH, A. CHIOU and J. HONG, "Optical interconnection using photorefractive dynamic holograms" *Appl. Opt.* Vol. 27, N°11 (1988)

- [YEH 1993] P. YEH, "Introduction to photorefractive nonlinear optics" Wiley Series in Pure and Applied Optics (1993)
- [YU et al. 1992] Y. YU, Z. JIANG, Q. JIANG and H. CHEN, "The properties of self pumped phase conjugation in KNSBN : Co crystals" S.P.I.E. Vol. 1775 (1991)
- [YUE et al. 1990] X. YUE, Z. SHAO, H. CHEN, Y. SONG, D. SUN and X. WU, "Self-pumped phase conjugation in KNSBN at 633nm" Chin. Phys. Lett. Vol. 7 N°7 (1990)
- [YUE et al. 1993] X. YUE, Z. SHAO, J. CHEN, K. SONG, D. SUN, Q. JIANG, Y. SONG and H. CHEN, "Demonstration of self-pumped phase conjugation with a laser beam incident to strontium barium niobate crystals from a negative c face" Opt. Eng. Vol. 32 N°3 (1993)
- [ZEISEL and HAMPP 1994] D. ZEISEL and N. HAMPP, "Dynamic self-pumped phase-conjugation mirror based on the bacteriorhodopsin variant D96N" Opt. Lett. Vol. 19 N°18 (1994)
- [ZELDIVICH et al. 1972] B.Y. ZELDOVICH, V.J. POPOVICHEV, V.V. RAGULSKIY and F.Z. FAISULLKOV, "Coonnection between the wavefronts of the reflected and exciting light in stimulated Mandel'shtam-Brillouin scattering" J.E.T.P. lett. Vol. 15 - 109 (1972)
- [ZELDIVICH et al. 1985] B.Y. ZELDOVICH, N.F. PLIPETSKY and V.V. SHKUNOV, "Principles of Phase Conjugation" Springer Verlag (1985)
- [ZHA et al. 1993] M. ZHA, D. FLUCK, P. GUNTER, M. FLEUSTER and C. BUCHAL, "TWM in photorefractive ion-implanted KNbO₃ planar waveguides at visible and near-infrared wavelengths" Opt. Lett. Vol. 18 N°8 (1993)
- [ZHANG et al. 1990] Y. ZHANG, X.H. HE, E. CHEN, Y. LIU, S.H. TANG, D.Z. SHEN and D.Y. JIANG, "High-reflectivity self-pumped phase conjugator using total internal reflection in KNbNO₃ : Fe" Appl. Phys. Lett. Vol. 57, N°13 (1990)
- [ZHANG et al. 1993] H.Y. ZHANG, W. SUN, H. ZHAO, S. BIAN, K. XU, M. LI and Y. XU, "Enhancement of the exponential gain coefficient as a result of the light-fanning effect in thin doped LiNbO₃ crystals" Opt. Lett. Vol. 18 N°17 (1993)
- [ZHANG et al. 1994] Y. ZHANG, S. CAMPBELL, P. YEH, D. SHEN, X. MA and J. CHEN, "Submillisecond photorefractive reponse time of KNbO₃:Rb+" Opt. Lett. Vol 19 n°18 (1994)
- [ZOZULYA 1993] A.A. ZOZULYA, "Fanning and photorefractive self-pumped four-wave mixing geometries" I.E.E.E. QE-29 N°2 (1993)