



HAL
open science

Optimisation du contraste image en microscopie optique : application à l'inspection microélectronique

Frédéric Moisan

► **To cite this version:**

Frédéric Moisan. Optimisation du contraste image en microscopie optique : application à l'inspection microélectronique. Modélisation et simulation. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 1988. Français. NNT: . tel-00331501

HAL Id: tel-00331501

<https://theses.hal.science/tel-00331501>

Submitted on 17 Oct 2008

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.

THÈSE

présentée par

Frédéric MOISAN

pour obtenir le titre de

DOCTEUR

de

L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER - GRENOBLE I

(Arrêté ministériel du 5 juillet 1984)

Mention Physique

Spécialité Microélectronique

OPTIMISATION DU CONTRASTE IMAGE EN MICROSCOPIE OPTIQUE Application à l'inspection microélectronique

Soutenue le 28 septembre 1988

JURY

M.	A. CHEHIKIAN	Président
MM.	B. COURTOIS	
	P. BOUSQUET	
	F. STOECKEL	
	M. LACOMBAT	
	C. DOCHE	

*Thèse préparée au sein du Service d'Electronique et d'Informatique pour Systèmes de Traitement
de la Division d'Electronique, de Technologie et d'Instrumentation
Commissariat à l'Energie Atomique*

Ce travail a été effectué au sein de la Division d'Electronique, de Technologie et d'Instrumentation (D.LETI) du Centre d'Études Nucléaires de Grenoble.

Je remercie Messieurs B. DUPEYRAT et J. MONGE de m'avoir accueilli respectivement dans le département et le service qu'ils dirigent.

Je remercie vivement Monsieur A. CHEHIKIAN, qui me fait l'honneur de présider ce jury.

Je suis très reconnaissant à Messieurs B. COURTOIS, P. BOUSQUET, F. STOECKEL et M. LACOMBAT de l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et d'avoir accepté de faire partie du jury.

J'exprime mes remerciements à Monsieur C. DOCHE qui a assuré l'encadrement de cette étude.

Messieurs Gilles GRAND et Michel DARBOUX, par leurs nombreux conseils, m'ont été d'une aide précieuse; qu' ils en soient remerciés.

J'adresse également toute ma sympathie à l'ensemble de l'équipe Inspection Microélectronique avec qui j'ai eu grand plaisir à travailler.

Je remercie tout le personnel du Service d'Electronique et d'Informatique pour Systèmes de Traitement pour l'accueil chaleureux qu'il m'a réservé.

Je ne peux terminer sans remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce document, en particulier Mlle Denise BRUNET qui en a assuré la dactylographie.

OPTIMISATION DU CONTRASTE IMAGE EN MICROSCOPIE OPTIQUE
APPLICATION A L'INSPECTION MICRO-ELECTRONIQUE

RESUME

Dans le domaine de l'inspection visuelle automatique de circuits intégrés, le contraste des images est un paramètre qu'il est important de maîtriser.

La méthode d'optimisation proposée utilise l'effet des variations de réflectivité optique en fonction de la longueur d'onde pour les structures de couches minces. Elle consiste à déterminer le filtrage en longueur d'onde optimisant un "facteur de qualité" de l'image (taux d'utilisation de la dynamique de la caméra), à partir des spectres de réflectivité des différentes structures présentes sur la plaquette.

Cette étude a été limitée au cas des circuits intégrés à deux structures, mais une extension à un nombre quelconque de celles-ci est possible.

Différentes voies permettant d'obtenir les spectres de réflectivité sont précisées. Une expérimentation basée sur des mesures photométriques a permis de montrer la fiabilité de la méthode proposée.

Son association avec un appareillage optique original rend possible une application dans le cadre d'une machine d'inspection automatique.

Mots clés : Microscopie optique, couches minces optiques, spectrométrie, filtrage en longueur d'onde, circuits intégrés, inspection microélectronique.

IMAGE CONTRAST OPTIMIZATION IN OPTICAL MICROSCOPY
APPLICATION TO IN-PROCESS INTEGRATED CIRCUIT INSPECTION

ABSTRACT

Image contrast is a critical parameter of automated visual inspection of integrated circuits.

The method we propose is based on the reflectance variations of thin film structures in function of the light wavelength. It consists in determining the right wavelength filter in order to optimize a "quality factor" (the utilization of the dynamic range of the image sensor) using the reflectance spectrum of each structure of the wafer.

We restrict the investigations to integrated circuits having only two structures, but they could be extended to any number of structures.

We give different methods to obtain the reflectance spectra. An experimentation based on photometric measurements attests the reliability of our method.

The association of our method with an original optical device allows implementation in an automatic inspection machine

Key words : Optical microscopy, optical thin films, spectrometry, wavelength filter, integrated circuits, microelectronic inspection

SOMMAIRE

<u>Introduction</u>	1
<u>Chapitre I</u> Imagerie optique des circuits intégrés : contexte général	2
I.1 - Nature physique de l'objet	3
I.1.1 Structure d'un circuit intégré	3
I.1.2 Comportement optique	9
I.2 - Le microscope optique. La technique d'imagerie "fond clair"	10
I.3 - Intérêt de l'optimisation spectrale de l'éclairage	14
<u>Chapitre II</u> Etude théorique de l'optimisation du contraste	16
II.1 - Données	17
II.2 - Problème de l'optimisation du contraste	19
II.3 - Résolution du problème de l'optimisation sans contrainte	22
II.4 - Problème général de l'optimisation avec contraintes	25
II.5 - Optimisation avec contraintes dans le cas de filtres "porte"	26
II.6 - Exemple concret de résolution pour des filtres "porte"	29
II.7 - Filtre "porte" optimal pour différentes structures	36
<u>Chapitre III</u> Obtention des spectres de réflectivité de l'objet	38
III.1 - Méthode théorique	39
III.1.1 Cas d'une onde plane	39
III.1.1.1 Données et hypothèses	39
III.1.1.2 Formulation mathématique	41
III.1.1.3 Comparaison théorie-expérience	43
III.1.2 Cas de l'éclairage du microscope	45
III.1.2.1 Formulation	45
III.1.2.2 Forme de la caractéristique d'incidence $f(\theta)$	46
III.1.2.3 Comparaison théorie-expérience	51
III.1.3 Conclusion	53

III.2 - Méthode expérimentale	54
III.2.1 Principes d'appareillages	54
III.2.2 Obtention du spectre de réflectivité	56
III.3 - Choix de la méthode applicable en inspection	57
<u>Chapitre IV</u> Validation expérimentale de la méthode	59
IV.1 - Procédure de validation	60
IV.1.1 Description de la procédure	60
IV.1.2 Obtention des résultats théoriques à partir des spectres	61
IV.1.3 Obtention des résultats expérimentaux à partir d'une image	63
IV.2 - Montage expérimental	65
IV.2.1 Description	66
IV.2.1.1 Acquisition des spectres	67
IV.2.1.2 Acquisition des images	69
IV.2.2 Etalonnage de la chaîne de prise d'image	70
IV.3 - Echantillons	77
IV.4 - Résultats	78
IV.5 - Interprétation des résultats	85
IV.5.1 Calculs d'incertitude	85
IV.5.2 Interprétation et conclusion	91
<u>Chapitre V</u> Adaptation de la méthode à un équipement industriel	93
V.1 - Principes de l'inspection automatique de plaquettes	94
V.2 - Applications de la méthode	96
V.2.1 Le champ de test des conditions d'imagerie	96
V.2.2 Exemples d'applications	98
V.2.2.1 Obtention des images modèles	98
V.2.2.2 Inspection d'une puce	101
V.3 - Adaptation de l'appareillage	104
V.3.1 Spectrophotomètre	104
V.3.2 Dispositif d'éclairage	105
V.3.3 Logiciel de détermination du filtrage	107

<u>Conclusion</u>	111
<u>Bibliographie</u>	113
<u>Annexe 1</u>	
Caractéristique d'incidence de l'éclairage du microscope	
Approche théorique	117

INTRODUCTION

L'optimisation du contraste d'image constitue d'une manière générale un sujet d'étude important. En effet, des images bien contrastées sont plus facilement interprétables pour un opérateur humain. D'autre part, lorsque les images sont destinées à subir des traitements informatiques, l'optimisation du contraste permet souvent de réduire la complexité des algorithmes.

Ainsi, dans le domaine de l'inspection visuelle automatique des circuits intégrés cette optimisation s'avère particulièrement bénéfique : elle permet dans de nombreux cas d'améliorer la détectabilité des défauts de fabrication.

La microscopie optique est un outil largement utilisé pour l'inspection microélectronique [1], [2]. En effet, cette technique, de mise en œuvre rapide, permet un contrôle non destructif de l'objet, contrôle qui peut donc être effectué en cours de fabrication entre deux étapes technologiques.

La méthode dite "fond clair" qui est la technique standard d'observation microscopique fournit l'information la plus complète sur ce type d'objet.

Pour un échantillon donné, le contraste des images est variable suivant l'éclairage et peut parfois être très faible dans des conditions classiques d'observation (éclairage de l'objet en lumière blanche).

Or, la nature physique des circuits intégrés, qui sont constitués de couches minces, fait que le contraste d'images obtenu est très dépendant de la longueur d'onde d'éclairage.

Il est intéressant de mettre à profit ce phénomène dans une technique d'optimisation du spectre en longueur d'onde de l'éclairage.

La technique proposée utilise un appareillage relativement simple et peut être mise en œuvre dans une machine d'inspection automatique [28].

Après avoir présenté le contexte de l'étude par quelques rappels de base sur la structure physique des circuits intégrés et les mécanismes de formation d'une image microscopique fond clair, nous montrerons sur un exemple l'intérêt vis à vis du contraste que représente l'optimisation du spectre en longueur d'onde de l'éclairage (chapitre I).

Nous étudierons ensuite (chapitre II) d'un point de vue théorique le problème de l'optimisation du contraste.

La méthode proposée utilisant en tant que données les spectres de réflectivité de l'objet étudié en fonction de la longueur d'onde, nous exposerons au cours du chapitre III les différentes techniques permettant d'obtenir ces caractéristiques.

La méthode d'optimisation du contraste a fait l'objet d'une validation expérimentale effectuée à l'aide d'un montage de laboratoire spécialement réalisé et portant sur quelques échantillons représentatifs d'une filière technologique. Cette étude sera exposée au chapitre IV.

Enfin, nous proposerons des solutions pour l'adaptation de cette méthode à une machine d'inspection automatique (chapitre V).

CHAPITRE I

IMAGERIE OPTIQUE DES CIRCUITS INTEGRES : CONTEXTE GENERAL

1 NATURE PHYSIQUE DE L'OBJET

1.1 STRUCTURE D'UN CIRCUIT INTEGRE

D'un point de vue physique, un circuit intégré microélectronique, à une étape quelconque de sa fabrication, est constitué d'une superposition de couches de différents matériaux gravées localement et reposant sur un substrat généralement en matériau semiconducteur (ex: Silicium) [3].

La figure I.1 rappelle les étapes successives de la fabrication d'un circuit intégré CMOS dans une technologie standard actuelle.

La fabrication consiste en une suite d'étapes de photolithographie alternant avec des opérations d'oxydation ou de dépôt (formation d'une couche de matériau), de gravure et d'implantation ionique (dopage du substrat Silicium).

La figure I.2 représente quelques coupes schématiques d'un circuit réalisé à l'aide de la technologie présentée figure I.1.

Ces coupes montrent en particulier l'accroissement de la complexité de l'objet lors de la superposition des niveaux de masques successifs, se traduisant par la multiplication du nombre d'empilements de couches présents.

Les coupes correspondant aux étapes B et C, situées après le premier niveau de masquage, sont celles d'un objet "mononiveau". Un tel objet ne contient que deux empilements différents: le motif et le fond ⁽¹⁾ sont tous deux uniformes.

A l'étape D, le circuit a subi les niveaux de masquage 1 et 2 : il s'agit de l'objet "multiniveau" le plus simple. Il comprend quatre empilements de couches différents : le motif est le fond sont tous deux constitués de deux empilements de natures distinctes.

(1) Le motif reproduit les géométries de chrome du dernier masque transféré dans le cas où une résine photosensible positive est utilisée; le fond correspond au reste de la plaquette.

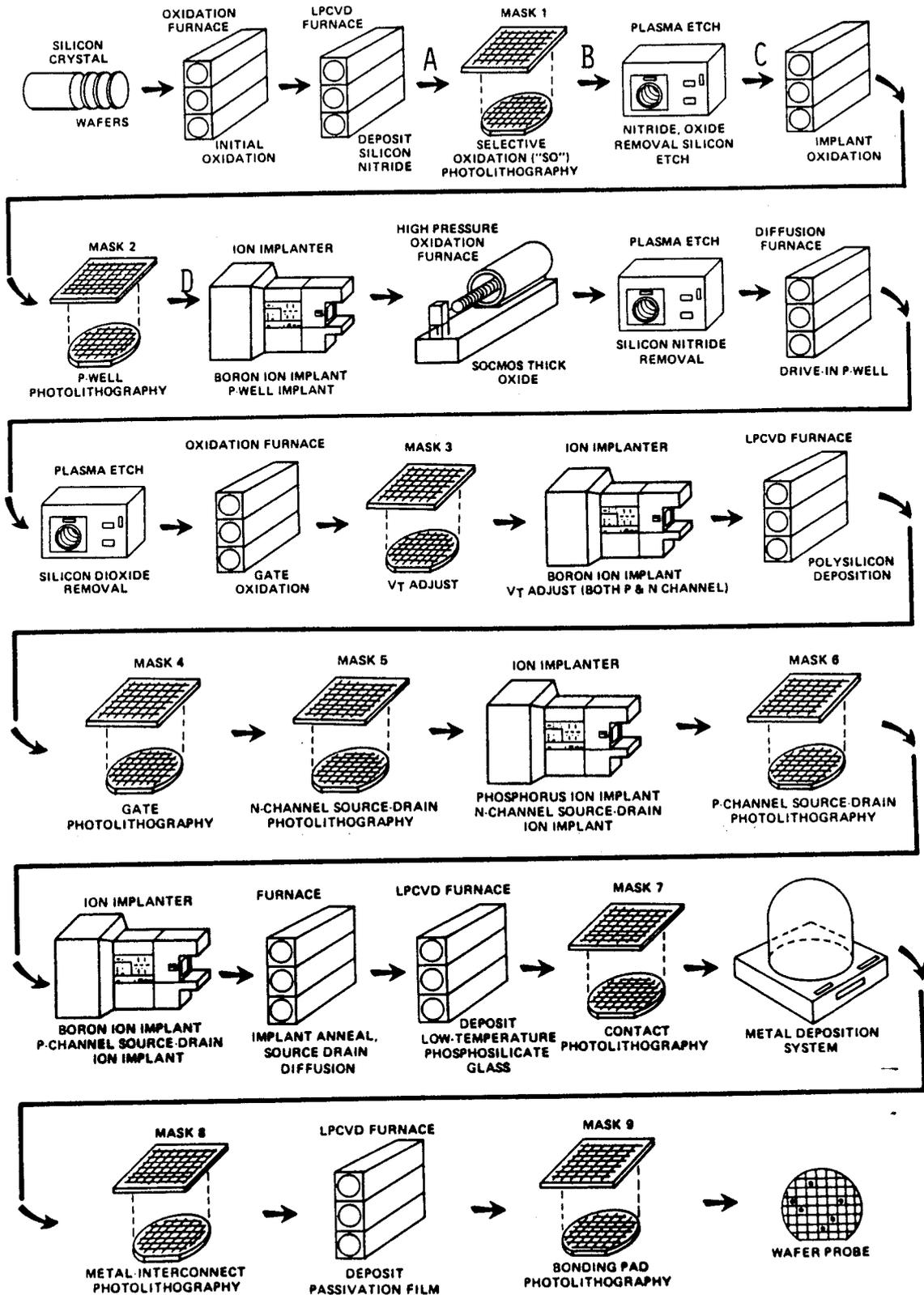


Figure I.1 : Fabrication d'un circuit intégré CMOS d'après [3].

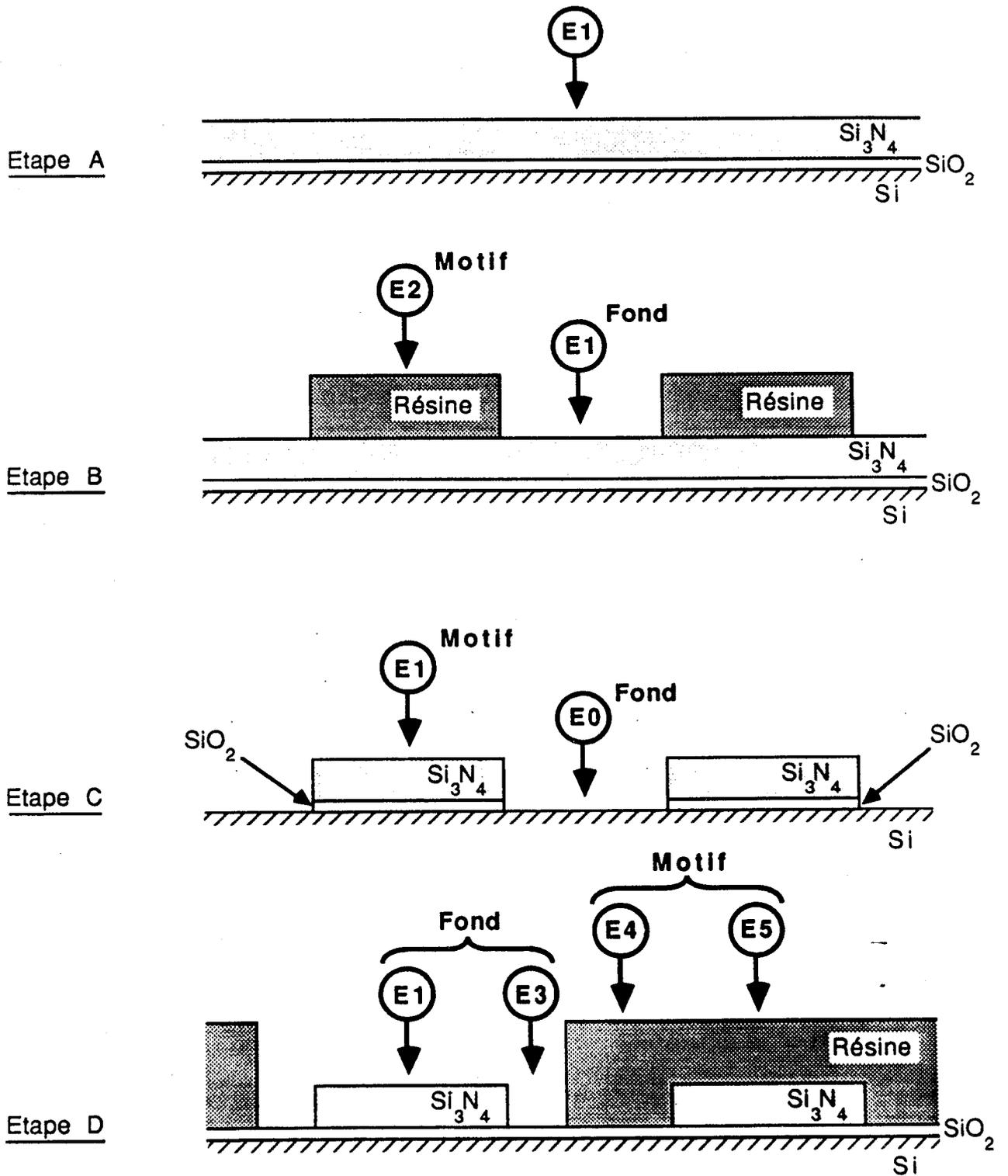


Figure I.2 : Coupes schématiques d'un circuit CMOS à différentes étapes du processus de fabrication (cf: figure I.1)

Il est donc prévisible qu'un circuit intégré en vue de dessus, apparaisse comme une juxtaposition de zones uniformes, chacune d'elles correspondant à un empilement donné, ces zones étant séparées par des frontières (contours ou transitions) qui sont les bords des couches gravées.

A l'étape D par exemple, la structure en vue de dessus est représentée figure I.3.

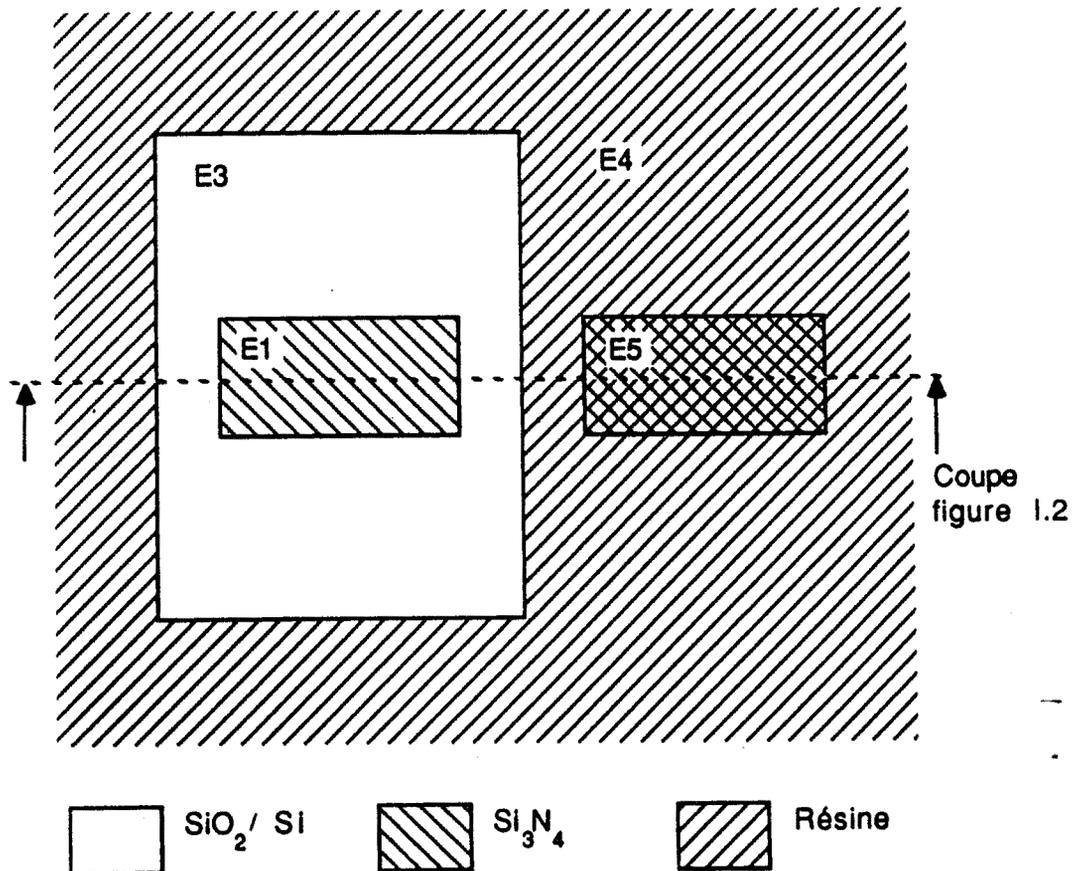


Figure I.3 : Schéma de la structure (figure I.2 - Etape D) en vue de dessus.

Le problème en imagerie pour l'inspection est de renforcer le contraste entre le motif et le fond, c'est à dire de faire ressortir les géométries du dernier niveau de fabrication par rapport à tous les niveaux précédents.

Le problème se résoud facilement dans le cas d'un objet mononiveau mais devient plus complexe pour les objets multiniveaux dans la mesure où le motif et le fond sont tous deux constitués d'un ensemble d'empilements ayant des propriétés différentes.

Il est à remarquer que les objets à un et deux niveaux revêtent une importance particulière en inspection de par la simplicité de leur structure.

En effet, une séquence technologique (dépôt d'une couche de matériau, photolithographie, gravure) correspondant au transfert d'un niveau de masque quelconque, peut être réalisé sur une plaquette témoin vierge. L'inspection de l'objet mononiveau obtenu, soit après l'étape de lithographie (résine développée), soit après l'étape de gravure, donne des indications sur la qualité d'exécution des opérations technologiques concernées.

De même, le contrôle de l'alignement entre un niveau technologique donné et le niveau précédent (contrôle d'"overlay") peut être obtenu en réalisant successivement ces deux niveaux de fabrication sur une même plaque témoin vierge. Le contrôle en question s'effectue alors sur une structure à deux niveaux et s'en trouve donc simplifié.

Pour une filière technologique CMOS choisie comme exemple, nous avons répertorié les différentes couches entrant dans la fabrication de l'objet. Leurs caractéristiques principales (nature, épaisseur) utiles pour notre application sont rassemblées dans le tableau I.1.

TECHNOLOGIE CMOS		FORMATION COUCHE				GRAVURE COUCHE	
Étape techno	Matériau	Épaisseur e	Technique	Granularité	Δe sur plaque	Arrêt	Précision
Oxyde de grille	SiO ₂	250 Å	thermique	nulle	± 10 Å	dans Si	
Oxyde de champ	SiO ₂	5500 Å	thermique	"	± 100 Å	reste 1500 Å à 5500 Å SiO ₂	± 300 Å
Isolant	SiO ₂	1500 Å + 4500 Å	LPCVD LTO intrinsèque + LTO dopé	"	± 400 Å	dans Si	—
Isolant intermétal	Verre	6000 Å		"	± 500 Å		
Masque oxyda- tion de champ	SiO ₂ piédestal	130 Å	Thermique	"	± 15 Å	dans SiO ₂ piédest. ép. restante 80 Å	± 30 Å
	Si ₃ N ₄	800 Å	LPCVD	faible	± 50 Å		
Grille	Si - poly	2000 Å	LPCVD	variable		dans SiO ₂ ép. restante 150 Å	± 30 Å
	Siliciure	2500 Å		très faible	-		
1er niveau de métal	Alliage Aluminium	6000 Å		variable	-		
2e niveau de métal	"	1,2 μ		forte	-		
Micro - Lithographie	Résine positive HPR 204 HPR 206	1,2 μ ou 1,8 μ	étalement	nulle	± 5 %	couche support	

Tableau I.1 : Caractéristiques physiques des couches technologiques.

1.2 COMPORTEMENT OPTIQUE

D'un point de vue optique, une zone uniforme de l'objet est un empilement de couches minces.

Ces couches se caractérisent par des épaisseurs comprises entre une dizaine de nanomètres et quelques microns (cf: tableau I.1), c'est à dire de l'ordre de grandeur des longueurs d'ondes lumineuses visibles : il s'y produit donc des phénomènes d'interférences à ondes multiples, la majorité de ces couches étant transparentes.

De plus, quelques matériaux formant les couches microélectroniques, notamment les résines (opérations de microlithographie), présentent parfois des bandes d'absorption dans certaines régions du spectre lumineux visible.

Ces deux phénomènes font que le coefficient de réflexion en intensité R d'une structure microélectronique (rapport des intensités réfléchie et incidente) varie généralement de façon importante avec la longueur d'onde λ de la lumière.

Le spectre de réflectivité en longueur d'onde $R(\lambda)$ caractérise optiquement la zone uniforme et joue, comme nous allons le voir, un rôle déterminant dans la formation de l'image microscopique "fond clair" du circuit microélectronique.

2 LE MICROSCOPE OPTIQUE - LA TECHNIQUE D'IMAGERIE

"FOND CLAIR"

Le microscope (système optique permettant d'obtenir une image agrandie d'un objet de dimension microscopique) est formé de deux sous-ensembles :

- l'un a pour rôle d'éclairer l'échantillon observé (illuminateur)
- l'autre, dont l'élément principal est l'objectif, permet la formation de l'image à partir de la lumière, soit transmise par l'objet (microscopie en transmission), soit réfléchi par lui (microscopie en réflexion).

En inspection microélectronique, la microscopie en réflexion s'impose généralement en raison de l'opacité des substrats semiconducteurs en lumière visible.

Il existe différentes techniques de microscopie se distinguant par la façon d'éclairer l'objet et de former son image. Chacune d'elles privilégie telle ou telle caractéristique particulière de l'objet (le "fond noir" faisant ressortir les contours par rapport aux zones uniformes, le contraste interférentiel, l'utilisation de la lumière polarisée pour l'observation d'échantillons anisotropes, etc... [4]).

Parmi celles-ci, la technique "fond clair" qui est la plus élémentaire du point de vue de l'appareillage, est bien adaptée au cas des objets microélectroniques sur lesquels elle fournit une information relativement complète.

La formation de l'image fond clair d'un objet réfléchissant résulte des deux phénomènes suivants :

a) Réflexion "spéculaire"

Une zone uniforme de l'objet réfléchit la lumière incidente d'éclairage comme le ferait un miroir parfait (figure I.4). Cette lumière réfléchi (lumière "directe"), après passage par l'objectif, forme en sortie de microscope, l'image de la zone considérée.

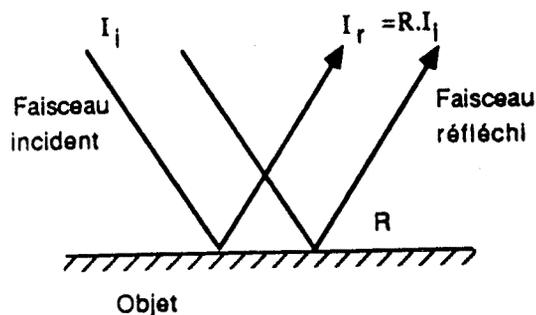


Figure I.4 : Réflexion "spéculaire".

Il existe donc une relation de proportionnalité entre l'intensité lumineuse d'une zone uniforme de l'image et le coefficient de réflexion R de la zone correspondante de l'objet physique.

b) Diffraction

Toute transition de l'objet (marche, bord de couche, granularité) diffracte la lumière incidente c'est à dire la réémet dans toutes les directions de l'espace (figure I.5).

Cette lumière diffractée, après passage à travers l'objectif, forme l'image de la transition.

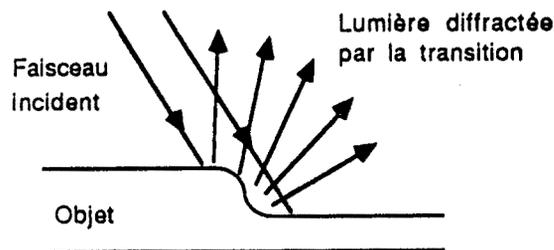


Figure I.5 : Diffraction

La technique fond clair, dont le principe est résumé figure I.6, fournit donc des informations sur les zones uniformes de l'objet (on a accès au coefficient de réflexion des différentes zones et donc indirectement à leur nature physique) et également sur les transitions.

La figure I.7 représente l'image d'un circuit intégré obtenue par cette technique.

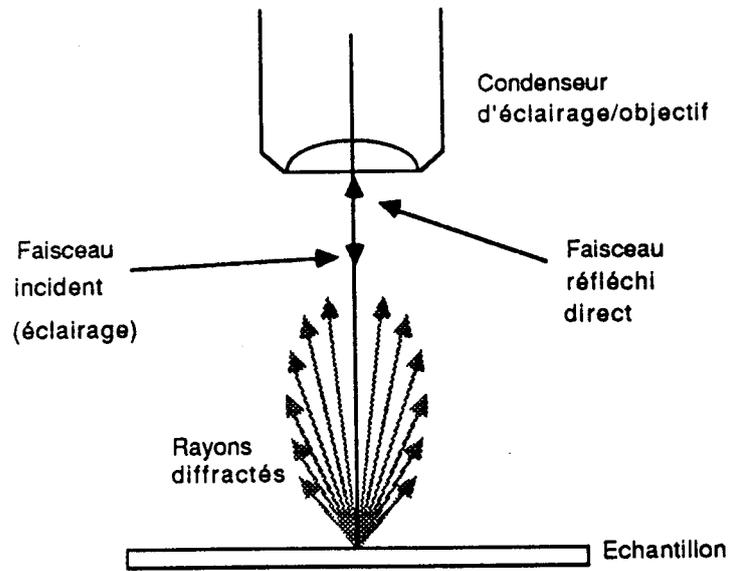


Figure I.6 : Production de faisceaux direct et diffracté en microscopie "fond clair" en lumière réfléchie.

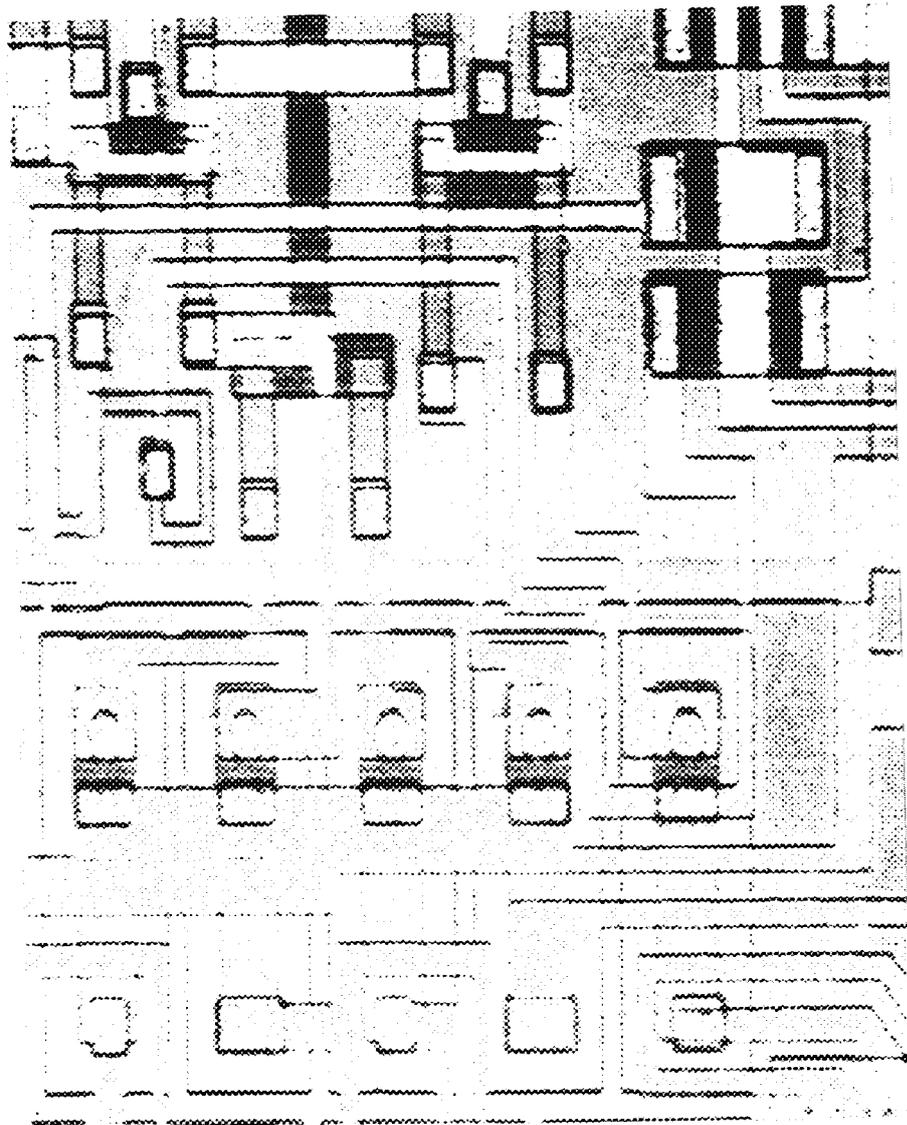


Figure I.7 : Image d'un circuit intégré en microscopie fond clair .

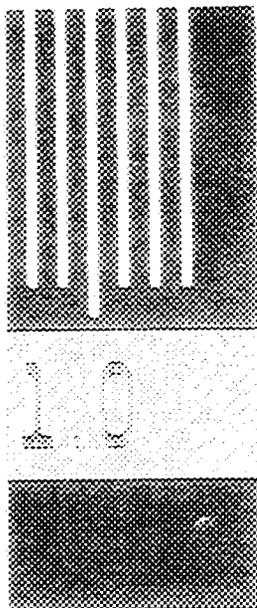
3 INTERET DE L'OPTIMISATION SPECTRALE DE L'ECLAIRAGE

De ce qui vient d'être exposé au cours de ce chapitre, on peut déduire :

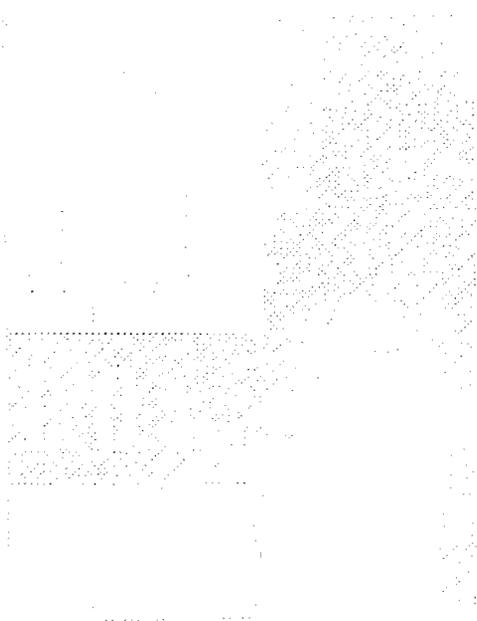
Etant donnée l'image d'un circuit intégré, le contraste (l'écart relatif d'intensité lumineuse) entre deux zones uniformes correspondant à des empilements différents, doit dépendre d'une manière significative de la longueur d'onde d'éclairage.

Une illustration est donnée figure I.8.

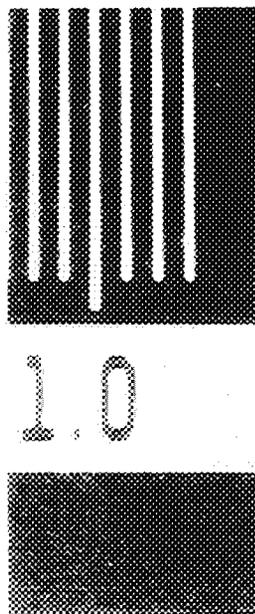
La méthode proposée consiste à rechercher le spectre d'éclairage en longueur d'onde optimisant le contraste, à partir des spectres de réflectivité des empilements constituant l'objet.



Eclairage en lumière blanche :
contraste moyen (60%).



Eclairage en lumière bleue (450 nm) :
contraste faible (20%).



Eclairage en lumière rouge (650 nm) :
contraste élevé (92%).

Figure I.8 : Evolution du contraste image en fonction du spectre d'éclairage.

(Echantillon: motif de résine sur substrat $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}$)

CHAPITRE II

ETUDE THEORIQUE DE L'OPTIMISATION DU CONTRASTE

Dans le cas général, un circuit intégré est une structure multiniveau de complexité plus ou moins grande.

Cependant, on peut le considérer comme un ensemble de structures de type mononiveau, chacune de celles-ci étant définie comme un couple de zones uniformes de réflectivités différentes.

Ce chapitre traitera d'un point de vue théorique de l'optimisation du contraste pour les objets microélectroniques mononiveaux.

Les résultats obtenus pourront être généralisés au cas multiniveau.

1 DONNEES

La chaîne de prise d'image est schématisée figure II.1.

- * On connaît les spectres de réflectivité $R_1(\lambda)$ et $R_2(\lambda)$ des deux structures composant l'objet.
- * On connaît également les caractéristiques suivantes en fonction de la longueur d'onde λ :

- $C(\lambda)$ la réponse du capteur image (caméra)
- $M(\lambda)$ la réponse de l'ensemble optique du microscope
- $I_0(\lambda)$ la densité spectrale d'intensité de la source.

Nous posons :

$$I_0(\lambda) = I \cdot i_0(\lambda) \quad (201)$$

avec :

$i_0(\lambda)$ variation normalisée de la densité spectrale d'intensité (dépend du type de source),

I facteur de puissance.

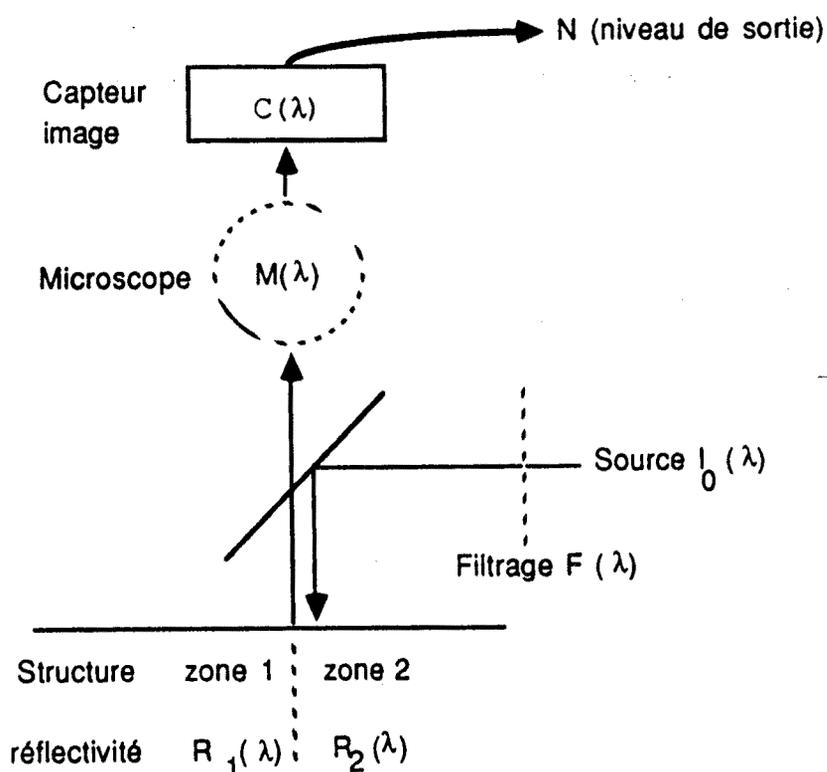


Figure II.1 : Schéma de la chaîne de prise d'image.

Si l'on n'effectue aucun filtrage en longueur d'onde de l'éclairage, le niveau électronique en sortie de capteur pour chaque zone s'écrit :

$$N_i = I \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_i(\lambda) d\lambda \quad (202)$$

avec $\rho_i(\lambda)$ spectre de réflectivité de la zone i pondéré par la caractéristique de l'appareil :

$$\rho_i(\lambda) = R_i(\lambda) \cdot i_0(\lambda) \cdot M(\lambda) \cdot C(\lambda) \quad (203)$$

λ_1 et λ_2 sont les limites du spectre utilisé.

* La puissance de la source est limitée :

$$I \leq I_{\max}$$

* La saturation du capteur se produit pour un niveau de sortie N_{sat} .

* L'amplitude du bruit analogique en sortie de capteur peut être considérée comme constante ⁽¹⁾.

(1)

On peut prendre en compte seulement le bruit temporel.

Les "bruits" de non uniformité affectant le signal d'obscurité et la réponse photométrique peuvent faire l'objet d'une correction numérique sur l'image acquise.

Pour fixer les idées, dans le cas d'un capteur CCD de bonne qualité, les amplitudes du signal de saturation et du bruit temporel d'obscurité (valeur moyenne) sont dans un rapport de mille environ [26], [29].

2 PROBLEME DE L'OPTIMISATION DU CONTRASTE

Compte tenu des données qui viennent d'être exposées, il faut trouver la réponse $F(\lambda)$ d'un filtre telle que le rapport signal sur bruit :

$$\Gamma = \frac{|N_1 - N_2|}{B} \quad \text{soit maximal}$$

avec $\left\{ \begin{array}{l} \text{quel que soit } \lambda, \quad 0 < F(\lambda) < 1 \\ N_i = I \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \rho_i(\lambda) d\lambda \quad (i=1 \text{ ou } 2) \end{array} \right.$

Nous avons supposé $B = \text{Cte}$, donc $B/N_{\text{sat}} = \text{Cte}$

A des fins de normalisation, nous définissons le facteur de qualité

$$Q = \frac{B}{N_{\text{sat}}} \Gamma = \frac{|N_1 - N_2|}{N_{\text{sat}}}$$

(204)

que nous allons chercher à maximiser.

Q est le taux d'occupation de la dynamique $[0, N_{\text{sat}}]$ du capteur.

Le problème général d'optimisation consiste donc à trouver une fonction $F(\lambda)$ bornée ($0 < F < 1$) et définie sur $[\lambda_1, \lambda_2]$ telle que la fonctionnelle :

$$Q(I, F) = \frac{I}{N_{sat}} \left| \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) (\rho_1(\lambda) - \rho_2(\lambda)) d\lambda \right|$$

soit maximale, avec les contraintes :

$$1) I \leq I_{max}$$

$$2) g(I, F) = \text{Max}(N_1, N_2) = I \cdot \text{Max}_{i=1,2} \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \rho_i(\lambda) d\lambda \right] \leq N_{sat}$$

(205)

La 2ème contrainte donne :

$$I \leq \frac{N_{sat}}{\text{Max}_{i=1,2} \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \rho_i(\lambda) d\lambda \right]}$$

Physiquement, l'égalité correspond au cas où le filtre est suffisamment large-bande, et I_{max} est suffisamment élevé pour que l'un des deux niveaux atteigne la saturation du capteur (condition de saturation) :

$$\text{Max}(N_1, N_2) = N_{sat}$$

Si l'on remplace dans l'expression de $Q(I, F)$, cela donne :

$$Q(I, F) \leq Q_m(F) = \frac{\left| \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) (\rho_1(\lambda) - \rho_2(\lambda)) d\lambda \right|}{\text{Max}_{i=1,2} \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \rho_i(\lambda) d\lambda \right]}$$

(206)

avec la même remarque sur l'égalité.

L'égalité ne peut être réalisée (c'est à dire la condition de saturation vérifiée) quelle que soit la fonction $F(\lambda)$ que si I n'est pas limité supérieurement ($I_{\max} \rightarrow \infty$). Cela revient à supprimer la contrainte 1 de la formule (205).

La maximisation de $Q_m(F)$ ou optimisation sans contrainte est un problème simple qui est traité analytiquement ci-dessous (II.3).

Par contre, la résolution du problème général (maximisation de $Q(I,F)$ avec les deux contraintes) n'est pas simple est demande un traitement numérique, comme nous le précisons au (II.4).

Nous verrons au (II.5) que ce problème général peut être considérablement simplifié en faisant des hypothèses sur la forme de la fonction $F(\lambda)$.

3 RESOLUTION DU PROBLEME DE L'OPTIMISATION

SANS CONTRAINTE

Il faut trouver la valeur maximale de $Q_m(F)$ sur l'intervalle $[\lambda_1, \lambda_2]$. Nous pouvons pour cela procéder en deux étapes :

Premièrement: rechercher une expression de Q_0 majorant $Q_m(F)$

Deuxièmement: montrer que cette valeur Q_0 peut toujours être atteinte par $Q_m(F)$, c'est à dire que l'on peut toujours trouver une fonction ou une distribution $F(\lambda)$ pour laquelle $Q_m(F) = Q_0$.

On a d'après la formule (206) :

$$Q_m(F) \leq \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \left| \rho_1(\lambda) - \rho_2(\lambda) \right| d\lambda}{\text{Max}_i \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \rho_i(\lambda) d\lambda} \quad (207)$$

Il existe deux cas possible :

1) Si $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \rho_2(\lambda) d\lambda < \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \rho_1(\lambda) d\lambda$ (208)

$$\text{alors } Q_m(F) \leq \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \rho_1(\lambda) \frac{|\rho_1(\lambda) - \rho_2(\lambda)|}{\rho_1(\lambda)} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \rho_1(\lambda) d\lambda} \quad (209)$$

$$\text{d'où : } Q_m(F) \leq \frac{|\rho_1(\lambda_0') - \rho_2(\lambda_0')|}{\rho_1(\lambda_0')} = y_1(\lambda_0') \quad (210)$$

λ_0' est l'abscisse de la valeur maximale de la fonction :

$$y_1(\lambda) = \frac{|\rho_1(\lambda) - \rho_2(\lambda)|}{\rho_1(\lambda)} \quad (211)$$

sur l'intervalle $[\lambda_1, \lambda_2]$.

$$\text{D'après (208), nous avons de plus : } \rho_1(\lambda'_0) > \rho_2(\lambda'_0) \quad (212)$$

$$2) \text{ Si } \int F(\lambda) \rho_1(\lambda) d\lambda < \int F(\lambda) \rho_2(\lambda) d\lambda \quad (213)$$

$$\text{alors } Q_m(F) \leq \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \rho_2(\lambda) \frac{|\rho_1(\lambda) - \rho_2(\lambda)|}{\rho_2(\lambda)} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \rho_2(\lambda) d\lambda} \quad (214)$$

$$\text{d'où : } Q_m(F) \leq \frac{|\rho_1(\lambda_0'') - \rho_2(\lambda_0'')|}{\rho_2(\lambda_0'')} = y_2(\lambda_0'') \quad (215)$$

λ_0'' étant l'abscisse de la valeur maximale de la fonction :

$$y_2(\lambda) = \frac{|\rho_1(\lambda) - \rho_2(\lambda)|}{\rho_2(\lambda)} \quad (216)$$

sur l'intervalle $[\lambda_1, \lambda_2]$

$$\text{et on a de plus d'après (213) : } \rho_1(\lambda_0'') < \rho_2(\lambda_0'') \quad (217)$$

Compte tenu des inégalités (212) et (217), on peut définir à partir de $y_1(\lambda)$ et $y_2(\lambda)$, une nouvelle fonction :

$$y(\lambda) = \frac{|\rho_1(\lambda) - \rho_2(\lambda)|}{\max(\rho_1(\lambda), \rho_2(\lambda))} \quad (218)$$

Cette fonction est maximale sur $[\lambda_1, \lambda_2]$
pour $\lambda = \lambda_0$ et on a $y(\lambda_0) = Q_0$

On a donc :

$$Q_m(F) \leq Q_0 = \frac{|\rho_1(\lambda_0) - \rho_2(\lambda_0)|}{\max(\rho_1(\lambda_0), \rho_2(\lambda_0))} \quad (219)$$

Q_0 est une valeur majorant $Q_m(F)$ sur l'intervalle de bornes λ_1 et λ_2 .

On peut reconnaître dans l'expression de Q_0 celle du facteur de qualité pour la structure de spectres ρ_1 et ρ_2 , obtenu lors d'un filtrage par un pic infiniment étroit localisé à λ_0 avec une puissance d'éclairage I_{\max} infinie. La valeur Q_0 du facteur de qualité peut donc toujours être atteinte en théorie.

La valeur Q_0 constitue donc un maximum théorique du facteur de qualité pour la structure de spectre ρ_1 et ρ_2 . Toute optimisation dans un cas réel (puissance de source limitée) donnera un facteur de qualité inférieur à Q_0 .

Remarque :

La fonction $y(\lambda)$ peut également se mettre sous la forme :

$$y(\lambda) = \frac{|R_1(\lambda) - R_2(\lambda)|}{\max_{i=1,2} (R_i(\lambda))} \quad (220)$$

Elle représente donc un écart relatif (contraste) entre les spectres de réflectivité des structures 1 et 2 en fonction de la longueur d'onde λ : c'est une grandeur intrinsèque de l'objet.

Cette fonction correspond au contraste entre les zones 1 et 2 de l'objet obtenu en lumière monochromatique de longueur d'onde λ .

4 PROBLEME GENERAL DE L'OPTIMISATION AVEC CONTRAINTES

On peut reformuler le problème général en ne faisant intervenir que des fonctionnelles à une seule variable F.

Il faut trouver une fonction F telle que:

$$Q(F) = \frac{\left| \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\rho_1 - \rho_2) d\lambda \right|}{g(F)} \quad \text{soit maximale}$$

avec

$$\begin{cases} \cdot g(F) = \frac{N_{sat}}{I_{max}} & \text{si } \text{Max}(h_1(F), h_2(F)) \leq \frac{N_{sat}}{I_{max}} \\ \dots g(F) = \text{Max}(h_1(F), h_2(F)) & \text{si } \text{Max}(h_1(F), h_2(F)) \geq \frac{N_{sat}}{I_{max}} \end{cases}$$

avec

$$h_i(F) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F \rho_i d\lambda \quad (i=1 \text{ ou } 2)$$

(221)

Les contraintes 1 et 2 de la formule (205) ont été remplacées par une double formulation de Q suivant que la condition de saturation est réalisée (..) ou non (..).

Comme on a affaire à un rapport d'intégrales (dont la formulation varie, de plus), cette optimisation ne peut être résolue simplement par un calcul variationnel.

En fait, si l'on discrétise l'intervalle $[\lambda_1, \lambda_2]$ en n valeurs de λ , on aboutit à un problème d'optimisation à n variables qui est très complexe, compte tenu de la double formulation de Q.

Dans un premier temps, il est intéressant de poser une hypothèse simplificatrice sur la forme du filtre, pour diminuer le nombre de variables. En particulier, le cas du filtre "passe-bande" doit être traité.

5 OPTIMISATION AVEC CONTRAINTES DANS LE CAS DE FILTRES "PORTE"

Le problème général avec contraintes se ramène alors à un problème à deux variables λ_a et λ_b .

Il faut trouver un couple (λ_a, λ_b) tel que :

- λ_a et λ_b appartiennent tous deux à l'intervalle $[\lambda_1, \lambda_2]$

$$\bullet Q(\lambda_a, \lambda_b) = \frac{\left| \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} (\rho_1(\lambda) - \rho_2(\lambda)) d\lambda \right|}{g(\lambda_a, \lambda_b)} \text{ soit maximal}$$

$$\text{avec } g(\lambda_a, \lambda_b) = \frac{N_{sat}}{I_{max}} \text{ si } \text{Max}_{i=1,2} (h_i(\lambda_a, \lambda_b)) \leq \frac{N_{sat}}{I_{max}}$$

(domaine 1)

$$= \text{Max}_{i=1,2} (h_i(\lambda_a, \lambda_b)) \text{ si } \text{Max}_{i=1,2} (h_i(\lambda_a, \lambda_b)) \geq \frac{N_{sat}}{I_{max}}$$

(domaine 2)

avec

$$h_i(\lambda_a, \lambda_b) = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \rho_i(\lambda) d\lambda$$

Interprétation physique de cette optimisation

Pour comprendre le raisonnement, il faut avoir présent à l'esprit que toutes les fonctions des deux variables λ_a et λ_b citées plus haut sont définies à partir des niveaux de sortie du capteur N_1 et N_2 , du niveau de saturation N_{sat} , et de l'intensité lumineuse incidente I . Les domaines 1 et 2 de définition correspondent aux deux cas suivants :

- Domaine 1 : l'intervalle $[\lambda_a, \lambda_b]$ est faible (filtrage étroit) ; ni N_1 ni N_2 n'atteignent la saturation N_{sat} pour l'intensité $I = I_{max}$.
On a donc :

$$\begin{array}{|l}
 I = I_{max} : \text{il faut envoyer le plus d'énergie possible} \\
 \\
 \text{Max}_{i=1,2} (h_i(\lambda_a, \lambda_b)) = \frac{1}{I_{max}} \cdot \text{Max}(N_1, N_2) < \frac{N_{sat}}{I_{max}} \\
 \\
 Q(\lambda_a, \lambda_b) = \frac{|N_1 - N_2|}{N_{sat}}
 \end{array}$$

- Domaine 2 : l'intervalle $[\lambda_a, \lambda_b]$ est suffisamment grand pour que $\text{max}(N_1, N_2)$ atteigne la saturation N_{sat} avec $I \leq I_{max}$.
On a donc :

$$\begin{array}{|l}
 I \leq I_{max} : \text{il faut envoyer juste assez d'énergie pour que} \\
 \text{le capteur soit en limite de saturation.} \\
 \\
 \text{Max}_{i=1,2} (h_i(\lambda_a, \lambda_b)) = \frac{1}{I} \text{Max}(N_1, N_2) = \frac{N_{sat}}{I} \\
 \\
 Q(\lambda_a, \lambda_b) = \frac{|N_1 - N_2|}{N_{sat}} = \frac{|N_1 - N_2|}{\text{Max}(N_1, N_2)}
 \end{array}$$

La frontière entre les deux domaines est définie par la saturation du maximum de deux niveaux :

$$\text{Max}_{i=1,2} (h_i(\lambda_a, \lambda_b)) = \frac{N_{sat}}{I_{max}}$$

NB : La fonction $\text{Max}_{i=1,2} (h_i(\lambda_a, \lambda_b))$ est indépendante de I_{max} et de N_{sat} .

Par contre, la fonction $Q(\lambda_a, \lambda_b)$ dépend de N_{sat} , et dépend aussi de I_{max} .

6 EXEMPLE CONCRET DE RESOLUTION POUR DES FILTRES "PORTE"

A partir de la formulation du II.5, un programme informatique a été écrit. Ce programme permet, à partir :

- des spectres de réflectivité $R_1(\lambda)$ et $R_2(\lambda)$ caractérisant l'échantillon,
- de l'intensité maximale I_{max} de la source,
- du niveau de saturation N_{sat} du capteur,

de calculer :

- le facteur de qualité Q ,
- la valeur de l'intensité d'éclairage I ou plus exactement le coefficient d'atténuation $\alpha = \frac{I}{I_{max}}$,
- la position du niveau de sortie maximum par rapport à la saturation : $\frac{N_{max}}{N_{sat}} = \frac{\max(N_1, N_2)}{N_{sat}}$,

ceci pour l'ensemble des filtres porte de bornes inférieure λ_a et supérieure λ_b couvrant la plage des longueurs d'onde visibles : $[\lambda_1 = 400 \text{ nm}, \lambda_2 = 800 \text{ nm}]$.

Les principales étapes de l'algorithme sont les suivantes :

- (1) Pondération des spectres de réflectivité correspondant aux zones 1 et 2 de l'échantillon par la réponse spectrale de l'appareillage (formule 203) :
- $$\rho_1(\lambda) = R_1(\lambda) \cdot A(\lambda)$$
- $$\rho_2(\lambda) = R_2(\lambda) \cdot A(\lambda)$$

- (2) Pour chacun des couples (λ_a, λ_b) :

(2.a) intégration en longueur d'onde :

$$h_1 = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \rho_1(\lambda) d\lambda$$

$$h_2 = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \rho_2(\lambda) d\lambda$$

(2.b) calcul de I, Q, N_{\max} :

$$\underline{\text{Si}} \quad \max(h_1, h_2) \geq \frac{N_{\text{sat}}}{I_{\text{max}}} \quad (\text{condition de saturation})$$

$$\underline{\text{alors}} \quad I = \frac{N_{\text{sat}}}{\max(h_1, h_2)}$$

$$Q = \frac{|h_1 - h_2|}{\max(h_1, h_2)}$$

$$N_{\max} = N_{\text{sat}}$$

$$\underline{\text{sinon}} \quad I = I_{\text{max}}$$

$$Q = \frac{I_{\text{max}}}{N_{\text{sat}}} |h_1 - h_2|$$

$$N_{\max} = I_{\text{max}} \cdot \max(h_1, h_2)$$

Un exemple est donné figure II.2 pour une structure composée d'un motif de SiO_2 sur substrat de Silicium.

La fonction $A(\lambda)$ et les valeurs de I_{max} et N_{sat} ont été choisies comme s'approchant des caractéristiques d'un appareillage réel (chapitre IV).

Les trois fonctions résultats du calcul $f(\lambda_a, \lambda_b)$ sont représentées sous la forme d'images à 17 niveaux de gris (textures), le noir correspondant aux valeurs les plus élevées et le blanc aux valeurs les plus faibles. On remarquera que seule la partie du graphique correspondant à $\lambda_b \geq \lambda_a$ est significative.

Sur ces images il convient de distinguer deux zones séparées par une courbe en pointillés (courbe de saturation).

- Zone A : (zone de non saturation) zone où les filtres sont trop étroits pour que le maximum des deux niveaux puisse atteindre le niveau de saturation du capteur, la lampe étant réglée à son intensité maximum I_{max} .

- Zone B : (zone de saturation) zone où les filtres sont trop larges pour pouvoir utiliser la lampe à son intensité maximum I_{max} , la lampe est donc réglée à une intensité comprise entre 0 et I_{max} ; cette intensité est celle permettant au plus élevé des deux niveaux (Motif ou Fond) d'atteindre la saturation du capteur.

Remarque : les zones A et B sont les représentations graphiques des domaines 1 et 2 respectivement (II.5).

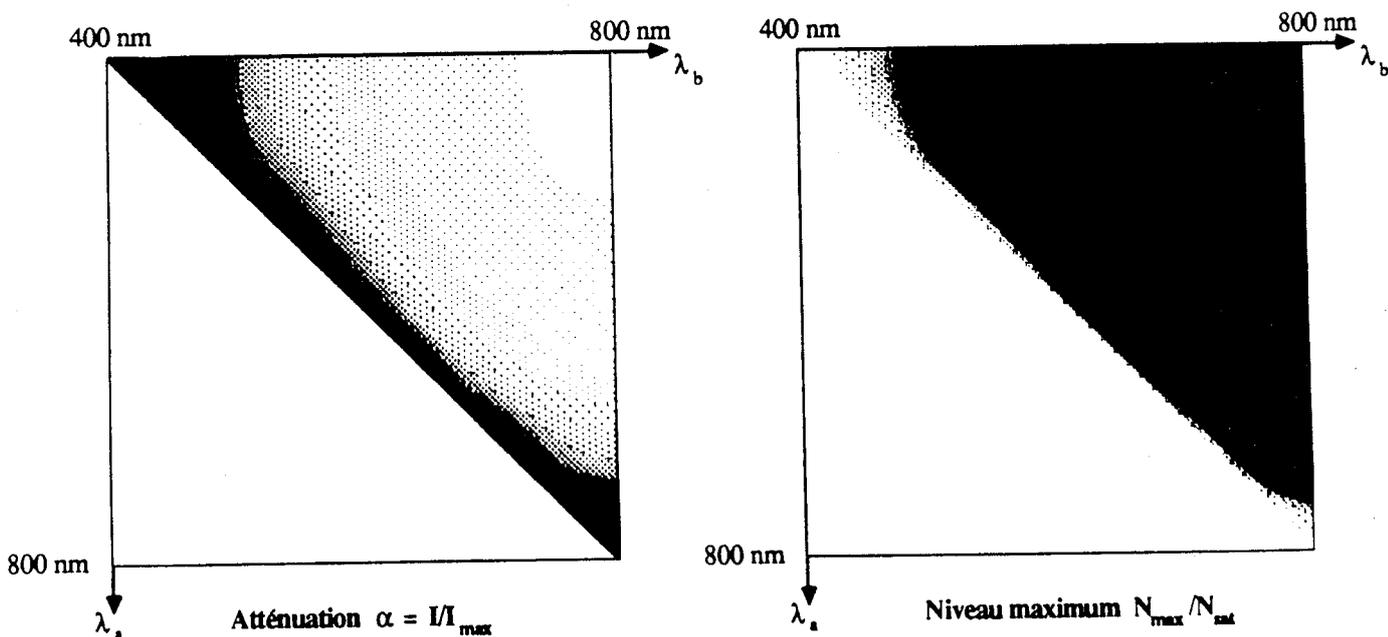
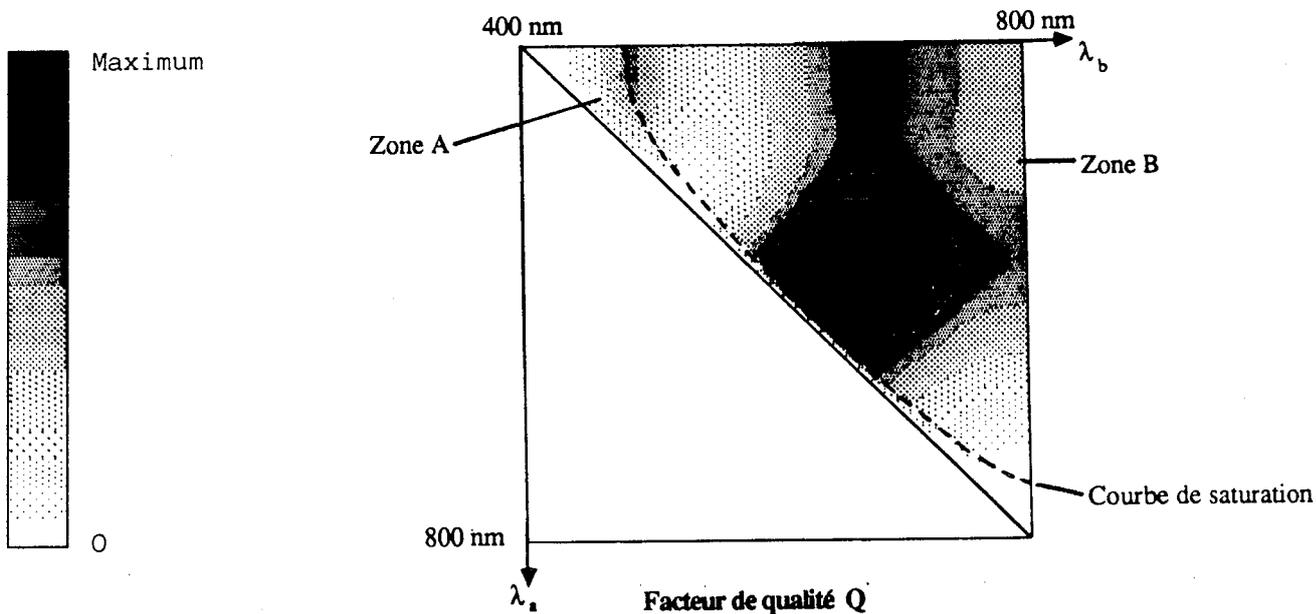
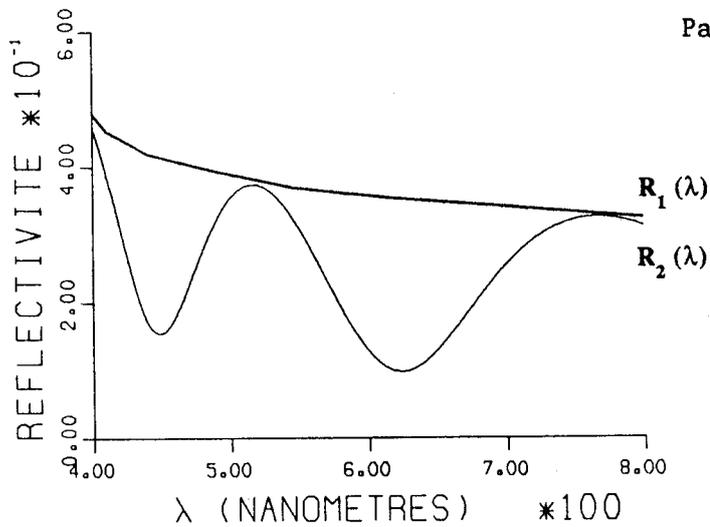
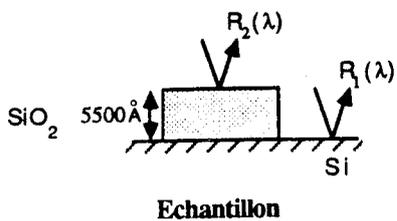


FIGURE II.2 : Résultats obtenus pour des filtres portes dans le cas d'un échantillon SiO_2 5500 Å sur Si.

* Détermination du filtre optimisant le contraste.

Le filtre porte maximisant le facteur de qualité $Q(\lambda_a, \lambda_b)$ est caractérisé par:

$$\begin{cases} \lambda_a = 617 \text{ nm} \\ \lambda_b = 630 \text{ nm} \end{cases}$$

Il permet d'atteindre un facteur de qualité $Q_{\max} = 0,720$ avec

$$\begin{cases} I/I_{\max} = 1 \\ N_{\max}/N_{\text{sat}} = 1 \end{cases}$$

Ces deux dernière égalités indiquent que le filtre porte optimal est situé sur la courbe de saturation.

La comparaison au facteur de qualité obtenu en lumière blanche

$$Q_{LB} = Q(\lambda_a = 400 \text{ nm}, \lambda_b = 800 \text{ nm}) \approx 0,35$$

montre que le filtre porte optimal améliore le contraste de manière significative.

Le facteur de qualité maximal théorique (optimisation sans contrainte) pour cette structure est :

$$Q_0 = 0,722 \text{ à } \lambda_0 = 623 \text{ nm.}$$

Le facteur de qualité du filtre porte optimal est très proche de cette valeur.

* Influence de la puissance maximale d'éclairage

Nous voulons montrer sur un exemple que lorsque l'intensité disponible I_{\max} croît, la porte optimale évolue vers un pic infiniment étroit conformément à la prévision de l'optimisation sans contrainte.

La figure II.3 présente pour la structure SiO_2/Si étudiée, un-réseau de courbes de saturation $\lambda_b = s(\lambda_a)$ pour différentes valeurs du rapport I_{\max}/I_{\max}^0 (I_{\max}^0 est la puissance de source utilisée dans l'exemple de la figure II.2).

Plus la puissance I_{\max} disponible est importante, plus la courbe de saturation se rapproche de la diagonale du graphique (droite $\lambda_b = \lambda_a$). Le niveau de saturation N_{sat} peut donc être atteint pour des filtres de largeur $(\lambda_b - \lambda_a)$ d'autant plus réduite que I_{\max} est grand. Ceci peut également être obtenu en réduisant N_{sat} (augmentation de la sensibilité du capteur).

La fonction $Q(\lambda_a, \lambda_b)$ pour différentes valeurs de I_{\max} est représentée figure II.4.

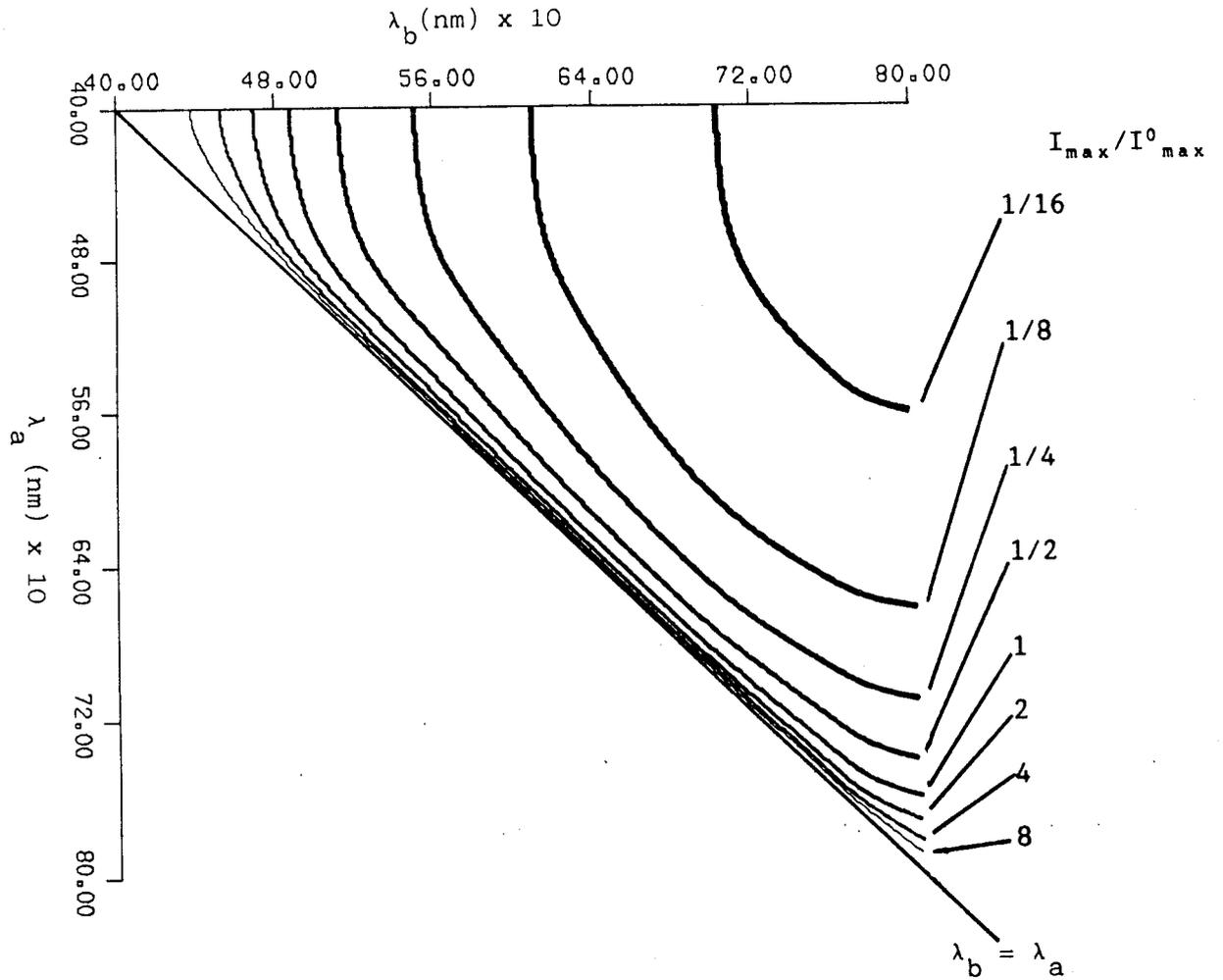


Figure II.3 : Réseau de courbes de saturation pour différentes valeurs de I_{\max} .

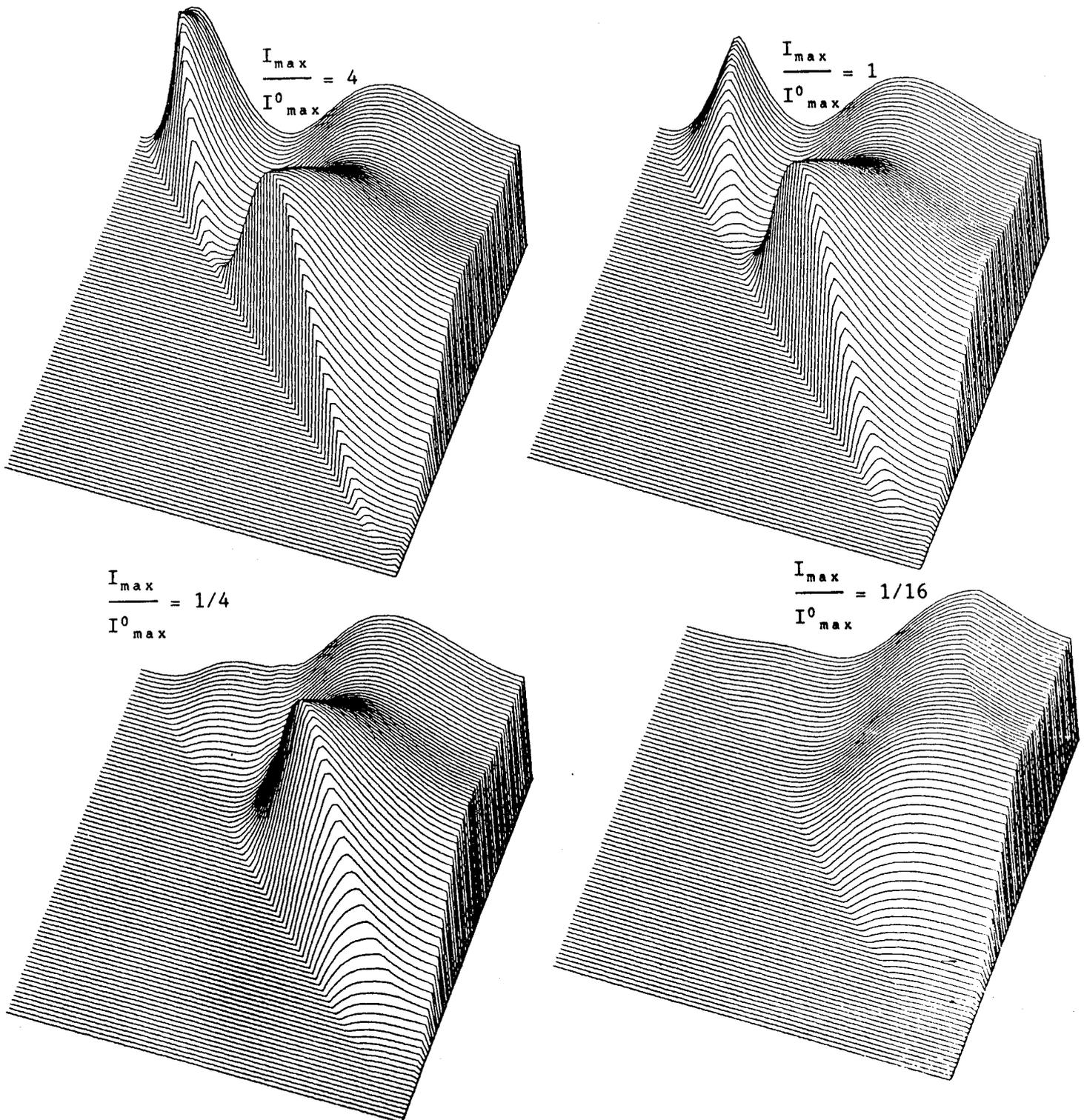


Figure II.4 : Evolution du facteur de qualité Q pour différentes valeurs de I_{\max} .

Sur ces graphiques, le déplacement de la courbe de saturation (correspondant à une discontinuité des dérivées de Q) apparaît clairement.

Le tableau II.1 donne l'évolution du filtre porte optimal en fonction de I_{\max} ainsi que les facteurs de qualité Q_{\max} atteints. Dans chacun de ces cas, l'optimum est situé sur la courbe de saturation.

On remarque que, lorsque I_{\max} croît,

- a) le filtre porte optimal tend vers un pic localisé à $\lambda_0 = 623$ nm
- b) ce filtre donne un facteur de qualité Q_{\max} tendant vers $Q_0 = 0,722$ par valeurs inférieures,

λ_0 et Q_0 étant les résultats de l'optimisation sans contrainte pour la structure étudiée.

Cela est bien en accord avec les conclusions de l'étude sur l'optimisation sans contrainte.

$\frac{I_{\max}}{I_{\max}^0}$	8	4	2	1	1/2	1/4	1/8	1/16
Q_{\max}	0,722	0,722	0,721	0,720	0,714	0,691	0,612	0,422
λ_a (nm)	622	621	620	617	611	559	575	421
λ_b (nm)	624	625	627	630	636	649	676	712

Tableau II.1 : Evolution du filtre porte optimal en fonction de I_{\max}

7 FILTRE "PORTE" OPTIMAL POUR DIFFERENTES STRUCTURES

On a déterminé, à l'aide du programme présenté au II.6, le filtre porte optimal pour quelques structures mononiveaux

- sans résine d'une part (contraste entre Si et Si + couche X)
- avec résine d'autre part (contraste entre Si + couche X et Si + couche X + résine).

Les résultats sont exposés dans le tableau II.2.

Les paramètres de source (I_{max}) et de capteur (N_{sat}) sont proches des conditions expérimentales (chapitre IV).

* Dans la plupart des cas, le filtre porte optimal améliore considérablement le facteur de qualité par rapport à la lumière blanche :

$$Q/Q_{LB} \text{ atteint } \begin{cases} 1,8 \text{ pour des structures sans résine} \\ 4,8 \text{ pour des structures avec résine} \end{cases}$$

* Le filtre porte optimal permet en général d'approcher de très près l'optimum absolu (optimisation sans contrainte) de la structure considérée :

$$Q/Q_0 > 90\% \text{ en général.}$$

Conclusions

- Du point de vue de l'optimisation du facteur de qualité, des filtres portes donnent des résultats tout à fait acceptables ; il n'est donc pas nécessaire de rechercher des formes de filtres plus complexes.
- D'un point de vue pratique, un filtrage porte peut être facilement réalisé (filtre interférentiel passe-bande par exemple).
- Etant donné la variété infinie de spectres $R_1(\lambda)$ et $R_2(\lambda)$ pouvant être rencontrée, il serait intéressant de disposer d'un filtrage dont la longueur d'onde centrale peut varier continuellement dans la bande visible.
- Si la largeur de bande $\Delta\lambda$ des filtres doit être fixée, une valeur de 30 à 40 nanomètres conviendrait.
En effet, la demi-période d'interférence la plus courte que l'on puisse trouver pour des spectres de structures microélectroniques (typiquement les couches de résine) est de cet ordre.
Une telle largeur de bande devrait donc offrir une résolution spectrale suffisante (et donc une bonne optimisation du facteur de qualité) pour l'ensemble des structures microélectroniques.

STRUCTURE	COUCHE X	EPAISSEUR COUCHE X (nm)	FILTRE PORTE OPTIMAL			ACCROISSEMENT DE θ PAR RAPPORT A LA LUMIERE BLANCHE θ/θ_0	COMPARAISON A L'OPTIMUM ABSOLU θ/θ_0 (%)
			λ_{central} (nm)	$\Delta \lambda$ (nm)	θ		
(Si, Si + couche X)	SiO2	25	456	112	0.104	1.53	80
		600	678	23	0.724	1.76	99.2
	Si3N4	80 (sur 13 nm SiO2)	750	38	0.994	1.27	99.9
	Al	—	—	—	—	1 (Réponses spectrales plates de Al et Si)	100
STRUCTURE	COUCHE X	EPAISSEUR DE RESINE (nm)	λ_{central}	$\Delta \lambda$	θ	θ/θ_0	θ/θ_0 (%)
		SiO2(25nm)	704	28	0.731	2.21	95
	SiO2(600nm)	684	22	0.739	4.45	98.5	
	Si3N4(80nm)	740	119	0.945	1.35	97.4	
	Al	442	84	0.315	4.44	33.9	
	Al	1800	442	84	0.383	4.79	40.7

Tableau II.2 : Accroissement du facteur de qualité par le filtre porte optimal (Structures microélectroniques typiques)

CHAPITRE III

OBTENTION DES SPECTRES DE REFLECTIVITE DE L'OBJET

La mise en œuvre de la méthode d'optimisation du contraste nécessite la connaissance du coefficient de réflexion de chaque zone de l'objet en fonction de la longueur d'onde.

Il peut être obtenu soit par le calcul (méthode théorique), soit par une mesure directe sur l'échantillon (méthode expérimentale).

Ces deux solutions vont être détaillées puis on précisera quelle est la méthode retenue pour la présente application et la raison de ce choix.

1 METHODE THEORIQUE

Le coefficient de réflexion des zones uniformes de l'objet pour des ondes électromagnétiques planes peut être calculé théoriquement (III.1.1). Ces résultats peuvent être étendus au cas de l'éclairage du microscope (III.1.2).

1.1 CAS D'UNE ONDE PLANE

1.1.1 Données et hypothèses

Considérons une onde électromagnétique plane, progressive et monochromatique de pulsation ω . La pulsation est liée à la longueur d'onde λ par la relation :

$$\omega = 2\pi c/\lambda,$$

c étant la vitesse de phase (dans le vide $c \approx 3.10^8$ m/s).

Nous considérons une zone uniforme de l'objet comme une superposition de lames à faces parallèles reposant sur un substrat opaque (figure III.1).

Sont connus :

* Les indices complexes de chaque matériau :

$$N_i(\lambda) = n_i(\lambda) - j k_i(\lambda)$$

n_i et k_i sont respectivement les indices de réfraction et d'absorption.

Les matériaux en question sont supposés homogènes et isotropes. Cette hypothèse est bien vérifiée en général.

* L'épaisseur e_i de chacune des couches.

Nous faisons l'hypothèse simplificatrice suivante :

les couches de l'empilement sont constituées de matériaux diélectriques c'est à dire possédant un indice d'absorption $k(\lambda)$ très faible ($k^2 \ll n^2$).

Cette hypothèse est bien vérifiée dans la bande des longueurs d'onde visibles (400 nm à 800 nm) pour la plupart des matériaux utilisés en microélectronique (cf: tableau I.1) à l'exception des alliages métalliques et des siliciures qui, étant des matériaux conducteurs, possèdent un indice d'absorption élevé [5]. Cependant, ces matériaux forment des couches totalement opaques (en raison de leur épaisseur et précisément de leur fort indice d'absorption) et peuvent par conséquent être considérés comme substrat de l'empilement. En effet, dans le calcul exposé ci-après, ce dernier milieu est supposé avoir des indices n et k quelconques.

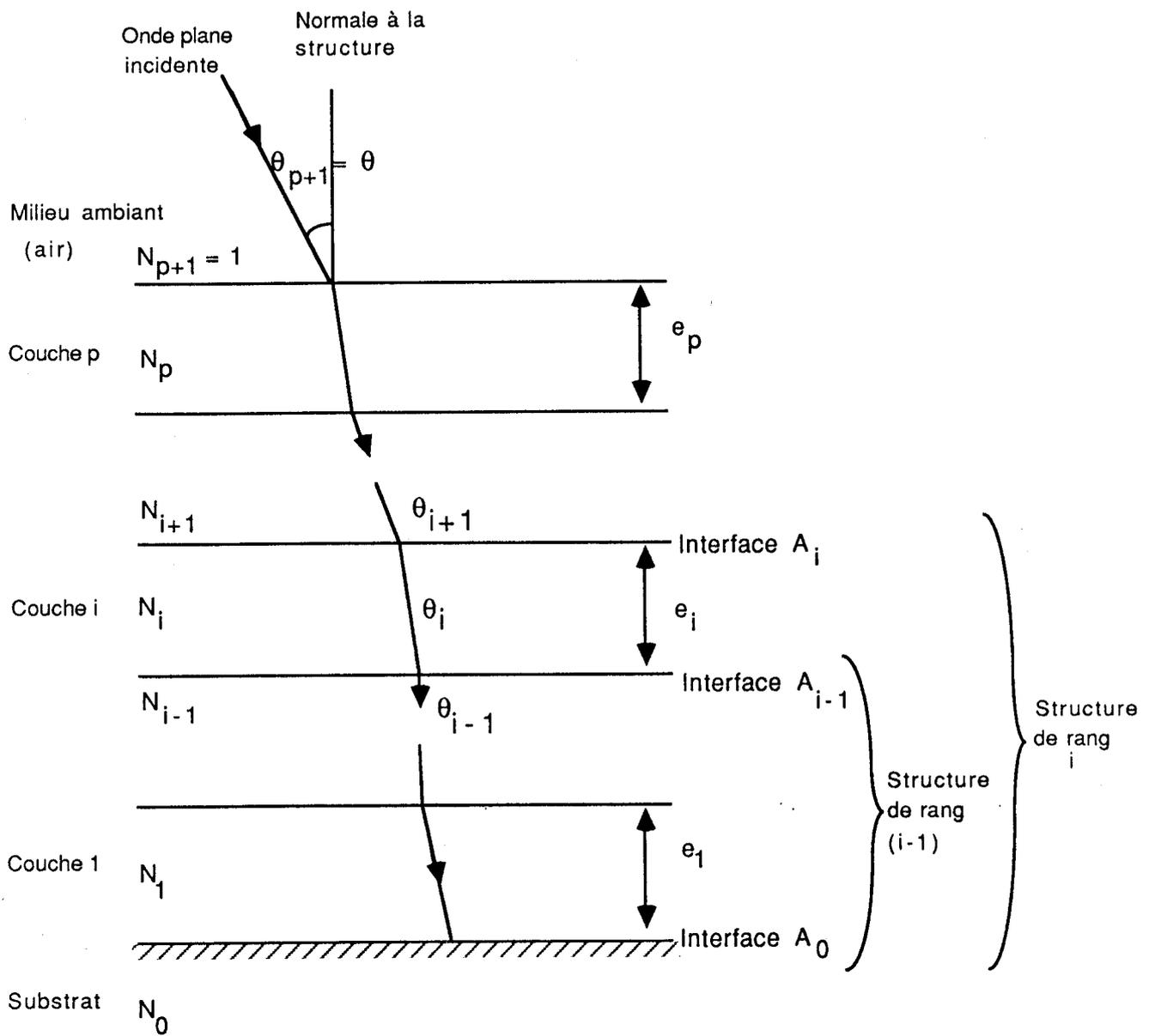


Figure III.1 : Schéma de la structure

1.1.2 Formulation mathématique

L'onde électromagnétique plane de longueur d'onde λ tombe sur la structure sous l'angle d'incidence θ (figure III.1).

Nous allons rappeler dans les pages suivantes les équations de base permettant de calculer les coefficients de réflexion en amplitude (rapport des amplitudes complexes de l'onde réfléchie et de l'onde incidente) de la structure pour des ondes électromagnétiques polarisées perpendiculairement et parallèlement (notations: \perp et \parallel respectivement) au plan d'incidence (plan de la figure III.1).

Ce sont des coefficients complexes dont les modules et phases sont fonctions de λ et θ :

$$\rho_{\perp} = |\rho_{\perp}| \exp(-j\phi_{\perp}) \quad (301)$$

$$\rho_{\parallel} = |\rho_{\parallel}| \exp(-j\phi_{\parallel}) \quad (302)$$

On en déduit le coefficient de réflexion en intensité de la structure pour une onde non polarisée (lumière naturelle) :

$$R(\lambda, \theta) = (|\rho_{\perp}|^2 + |\rho_{\parallel}|^2)/2 \quad (303)$$

Calcul des coefficients de réflexion en amplitude

Nous utilisons une méthode de récurrence (méthode de sommation d'Airy [6]) consistant à exprimer les coefficients de réflexion en amplitude de la structure de rang i en fonction de ceux de la structure de rang $(i-1)$ (figure III.1).

Nous avons :

$$\rho_i^{\perp} = |\rho_i^{\perp}| \exp(-j\phi_i^{\perp}) = \frac{r_i^{\perp} + \rho_{i-1}^{\perp} K_i^2 e^{-2j\beta_i}}{1 + r_i^{\perp} \rho_{i-1}^{\perp} K_i^2 e^{-2j\beta_i}} \quad (340)$$

et une formule de récurrence identique pour l'autre direction de polarisation (\parallel).

L'application de la formule (340) suppose que l'hypothèse des couches faiblement absorbantes est vérifiée.

Explicitons les différents termes de cette expression :

$$\beta_i = \frac{2\pi n_i e_i \cos\theta_i}{\lambda} \quad (341)$$

correspond au chemin optique parcouru dans le milieu i .

$$K_i = \exp\left(\frac{-2\pi k_i e_i}{\lambda \cos\theta_i}\right) \quad (342)$$

représente l'atténuation par absorption de l'amplitude de l'onde lors de la traversée de la couche diélectrique i .

Remarque :

β_i et K_i sont indépendants de l'état de polarisation de l'onde (\perp ou \parallel) car le matériau i est isotrope.

$$\Gamma_i^{\perp} = \frac{n_{i+1} \cos \theta_{i+1} - n_i \cos \theta_i}{n_{i+1} \cos \theta_{i+1} + n_i \cos \theta_i} \quad (343)$$

$$\Gamma_i^{\parallel} = \frac{n_i \cos \theta_{i+1} - n_{i+1} \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_{i+1} + n_{i+1} \cos \theta_i} \quad (344)$$

Les formules (343) et (344) sont les expressions des coefficients de Fresnel de l'interface A_i séparant deux milieux diélectriques.

D'après la loi de Descartes, les angles θ_i et θ_{i+1} sont tels que :

$$n_i \sin \theta_i = n_{i+1} \sin \theta_{i+1} \quad (345)$$

Le terme initial de la récurrence est constitué par le coefficient de Fresnel de l'interface A_0 séparant le milieu 1 (diélectrique) du substrat (indices quelconques); nous avons :

$$\rho_0^{\perp} = |\rho_0^{\perp}| \exp(-j\phi_0^{\perp}) \quad (346)$$

$$\rho_0^{\parallel} = |\rho_0^{\parallel}| \exp(-j\phi_0^{\parallel}) \quad (347)$$

avec :

$$|\rho_0^{\perp}|^2 = \frac{(n_1 \cos \theta_1 - u)^2 + v^2}{(n_1 \cos \theta_1 + u)^2 + v^2} \quad (348)$$

$$\text{tg } \phi_0^{\perp} = \frac{2v n_1 \cos \theta_1}{u^2 + v^2 - n_1^2 \cos^2 \theta_1} \quad (349)$$

$$|\rho_0^{\parallel}|^2 = \frac{((n_0^2 - k_0^2) \cos \theta_1 - n_1 u)^2 + (2n_0 k_0 \cos \theta_1 - n_1 v)^2}{((n_0^2 - k_0^2) \cos \theta_1 + n_1 u)^2 + (2n_0 k_0 \cos \theta_1 + n_1 v)^2} \quad (350)$$

$$\operatorname{tg} \phi_o'' = \frac{4n_0 k_0 n_1 u \cos \theta_1 - 2n_1 v (n_0^2 - k_0^2) \cos \theta_1}{(n_0^2 + k_0^2)^2 \cos \theta_1 - n_1^2 (u^2 + v^2)} \quad (351)$$

$$2u^2 = n_0^2 - k_0^2 - (n_1 \sin \theta_1)^2 + \sqrt{(n_0^2 - k_0^2 - (n_1 \sin \theta_1)^2)^2 + 4n_0^2 k_0^2} \quad (352)$$

$$2v^2 = -(n_0^2 - k_0^2 - (n_1 \sin \theta_1)^2) + \sqrt{(n_0^2 - k_0^2 - (n_1 \sin \theta_1)^2)^2 + 4n_0^2 k_0^2} \quad (353)$$

Le calcul de récurrence s'effectue de $i=1$ à p , p correspondant à la couche supérieure de l'empilement.

Les coefficients de réflexion en amplitude de la structure globale sont ρ_p^\perp et ρ_p'' , qui sont bien sûr deux grandeurs complexes.

1.1.3 Comparaison théorie-expérience

Nous avons réalisé un programme informatique effectuant le calcul théorique de la réflectivité suivant la formulation précédente.

La comparaison du calcul théorique à la mesure effectuée sur un spectrophotomètre à ondes planes (angle d'incidence $\theta=8$ degrés) pour divers échantillons microélectroniques a montré une bonne correspondance lorsque les épaisseurs de couches et les indices $n(\lambda)$ et $k(\lambda)$ sont bien connus.

Un exemple est donné figure III.2 pour un échantillon de Silice (épaisseur 5800Å) sur substrat de Silicium.

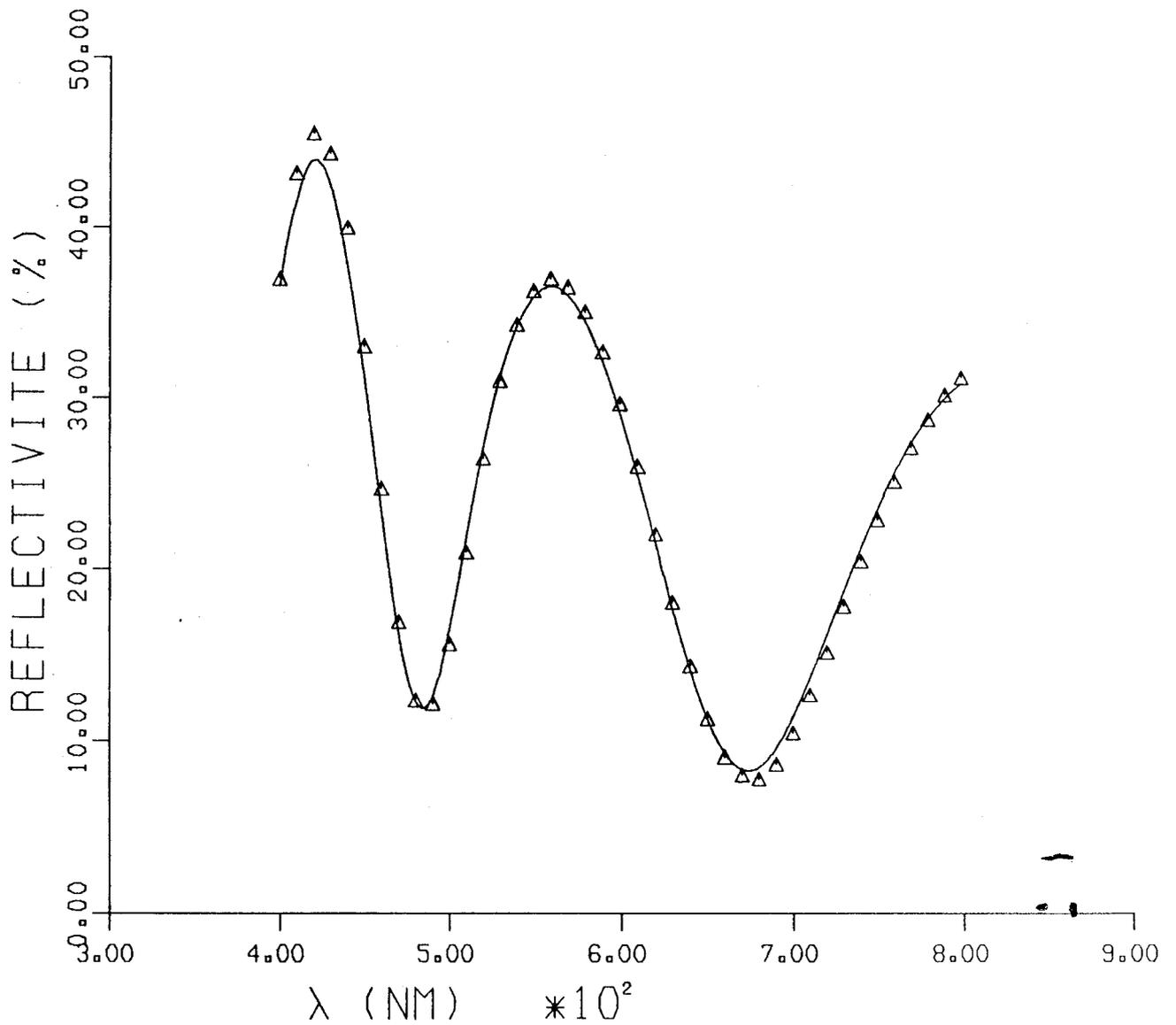


Figure III.2 : Spectre de réflectivité en ondes planes d'un échantillon SiO_2 , 5800 Å sur Silicium.
($\Delta\Delta$ Expérimental ; — théorique).

1.2 CAS DE L'ECLAIRAGE DU MICROSCOPE

1.2.1 Formulation

Dans le cas d'un illuminateur correspondant au montage optique de Köhler [7] chaque point éclairé P de l'objet reçoit un faisceau lumineux conique, de révolution autour d'un axe normal au plan de l'échantillon (figure III.3). Ce faisceau peut être considéré comme la superposition d'ondes planes à différentes incidences θ , dont l'intensité relative en fonction de l'angle θ est donnée par $f(\theta)$. Cette fonction est positive pour $0 \leq \theta \leq u$ et nulle pour $\theta > u$.

u est l'angle d'ouverture du faisceau (demi-angle au sommet du cône d'éclairage).

Si l'éclairage est homogène spatialement, ce faisceau est identique quelque soit le point P considéré dans le champ éclairé.

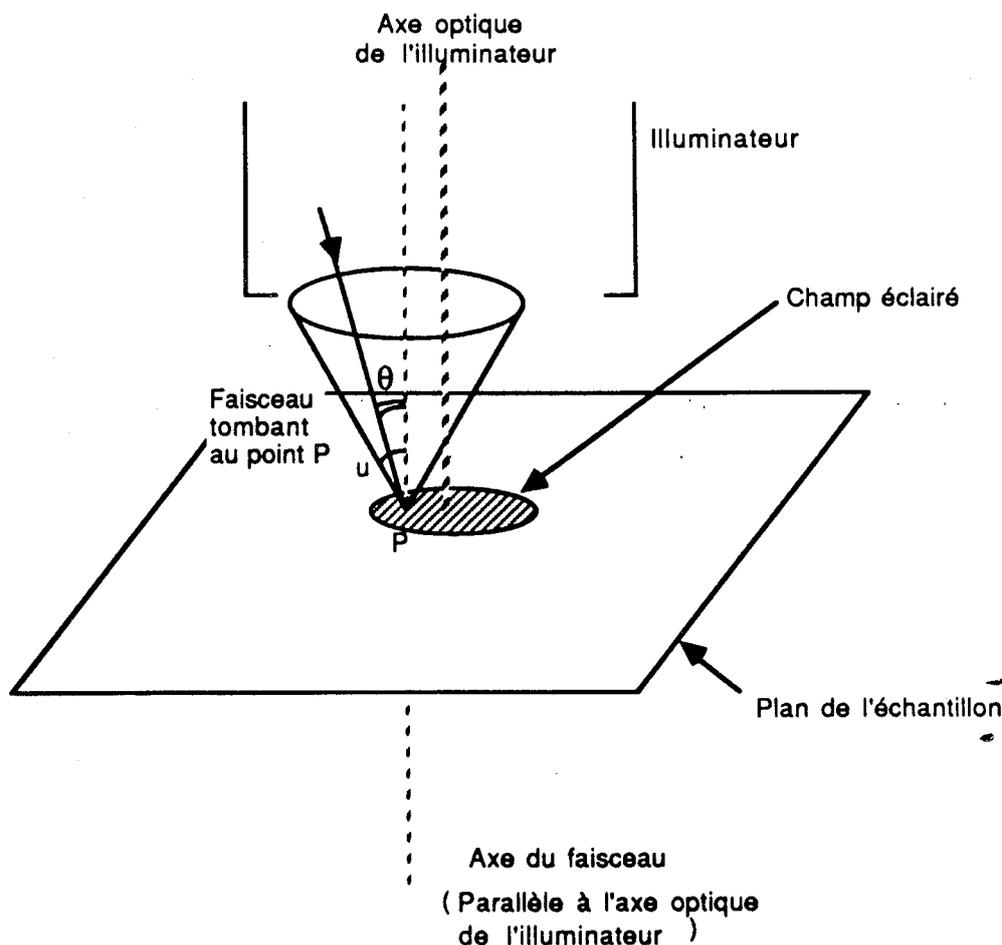


Figure III.3 : Eclairage de l'échantillon dans le cas du microscope.

Cet éclairage est partiellement cohérent d'un point de vue spatial [8], c'est à dire que nous nous situons dans un cas intermédiaire entre la cohérence totale (existence d'une relation de phase parfaitement définie entre les différents points d'un plan source perpendiculaire à l'axe optique) et l'incohérence totale (aucune relation de phase entre ces points).

Toutefois, en pratique, ce cas intermédiaire est beaucoup plus proche du cas incohérent.

Nous faisons l'hypothèse de l'incohérence totale. Cela implique la possibilité d'additionner les intensités des différentes ondes incidentes au point P, celles-ci ne pouvant interférer.

L'intensité incidente en un point quelconque de l'objet s'écrit alors :

$$I_{inc} = \int_0^u f(\theta) d\theta \quad (370)$$

et la fraction de cette intensité réfléchiée par l'objet s'exprime :

$$I_{ref} = \int_0^u R(\lambda, \theta) f(\theta) d\theta \quad (371)$$

Le coefficient de réflexion "microscopique" d'un échantillon dont la réflectivité en ondes planes est $R(\lambda, \theta)$ (formule (303)) est donc donné par :

$$R_m(\lambda) = \frac{\int_0^u R(\lambda, \theta) f(\theta) d\theta}{\int_0^u f(\theta) d\theta} \quad (372)$$

1.2.2 Forme de la caractéristique $f(\theta)$

En annexe 1, nous précisons le fonctionnement optique de l'illuminateur de Köhler pour tenter d'obtenir théoriquement la caractéristique d'incidence $f(\theta)$ de l'éclairage au niveau de l'objet.

Rappelons les points principaux de ce fonctionnement (cf: figure III.4).

- Le diaphragme d'ouverture de l'illuminateur permet de faire varier l'angle d'ouverture u du faisceau d'éclairage tombant sur l'objet.

- Ce paramètre est limité supérieurement par u_{\max} qui est l'angle d'ouverture intrinsèque du condenseur. u_{\max} est un paramètre donné par le constructeur, habituellement sous la forme d'une ouverture numérique :

$$N_{\text{condenseur}} = n \cdot \sin u_{\max}$$

Soit, pour une optique "à sec", l'indice n du milieu ambiant étant égal à l'unité :

$$N_{\text{condenseur}} = \sin u_{\max}$$

- Dans le cas particulier de la microscopie en réflexion, l'objectif de formation de l'image joue également le rôle de condenseur d'éclairage et on a bien sûr :

$$N_{\text{objectif}} = N_{\text{condenseur}}$$

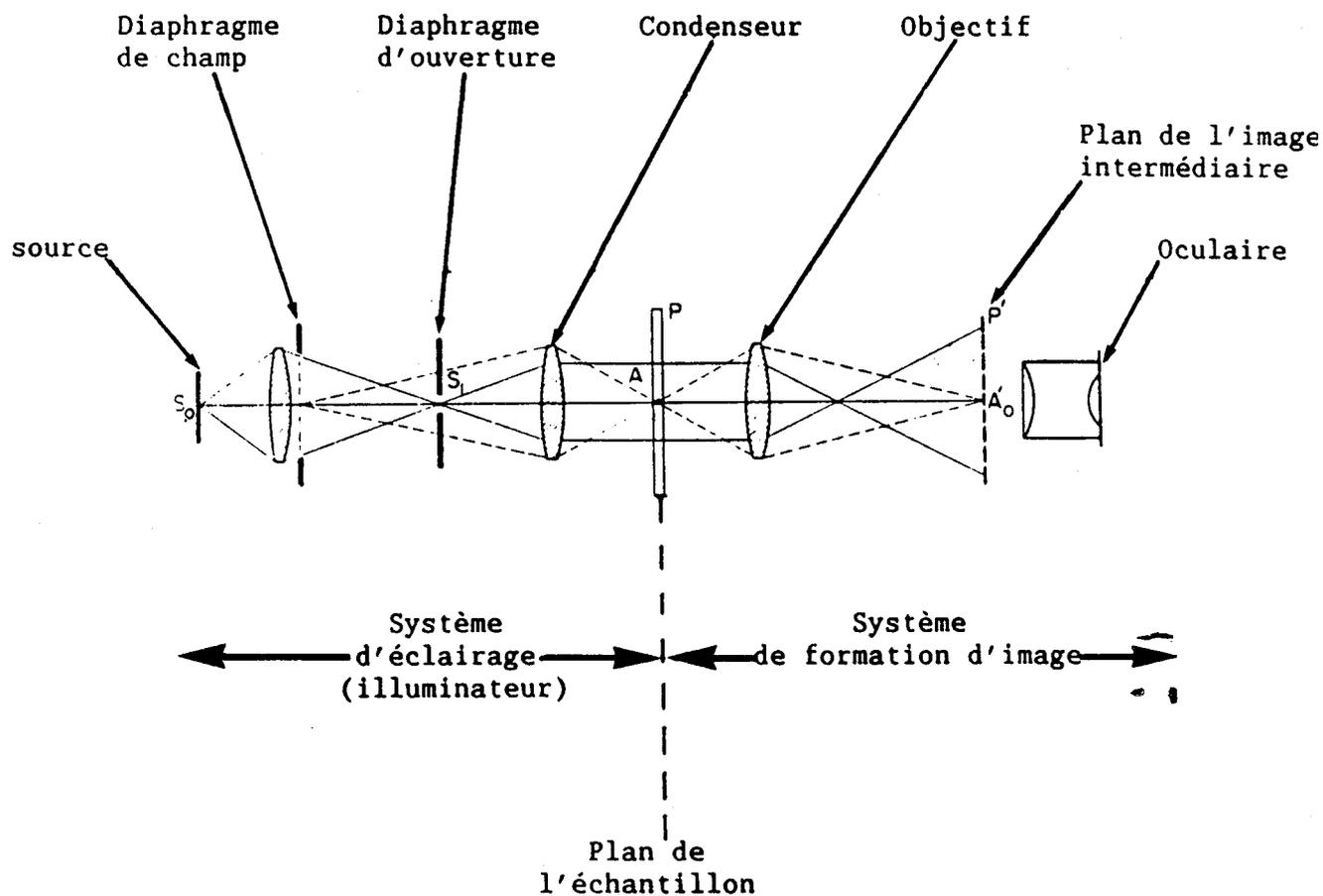


Figure III.4 : Schéma de principe du microscope

(illuminateur de Köhler d'après [7])

On montre (annexe 1) que, d'un point de vue théorique, la fonction $f(\theta)$ varie en $(\text{tg } \theta / \cos^2 \theta)$ pour $0 \leq \theta \leq u$.

L'exemple ci-après montre une bonne correspondance entre ce modèle théorique et la réalité pour les angles d'incidence faibles. Cependant, une limitation intervient pour les angles θ élevés :

$$f(\theta) = K(\theta) \cdot \frac{\text{tg } \theta}{\cos^2 \theta}$$

Nous avons formulé (annexe 1) une hypothèse sur le mécanisme de cette limitation. Toutefois, le coefficient $K(\theta)$ n'a pu être quantifié en raison notamment de la difficulté de connaître la taille des pupilles et diaphragmes responsables de la limitation.

Exemple :

Nous avons mesuré la caractéristique d'incidence de l'éclairage⁽¹⁾ au niveau de l'échantillon sur notre microscope, celui-ci étant équipé d'un objectif de caractéristiques (données constructeur) :

Grossissement	:	x 100
Ouverture numérique	:	$N_{\text{objectif}} = \sin u_{\text{max}} = 0,95$

Le diaphragme d'ouverture est réglé de manière que l'on ait approximativement :

$$\sin u \approx 2/3 \cdot \sin u_{\text{max}}$$

(en abrégé : diaphragme d'ouverture réglé à 2/3).

C'est à dire :

$$u \approx 39 \text{ degrés.}$$

Cette courbe expérimentale $f_m(\theta)$ est représentée figure III.5b.

La courbe théorique sans limitation

$$f_{\text{th}}(\theta) = \text{tg } \theta / \cos^2 \theta, \quad 0 \leq \theta \leq u = 39 \text{ degrés}$$

est également représentée.

(1) Celle-ci est obtenue par un relevé d'intensité en "champ lointain" (figure III.5a : un capteur quasi-ponctuel est balayé normalement à l'axe optique à une distance du plan de l'échantillon grande devant la taille du champ éclairé). Un passage en coordonnées polaires donne la fonction $f(\theta)$ expérimentale.

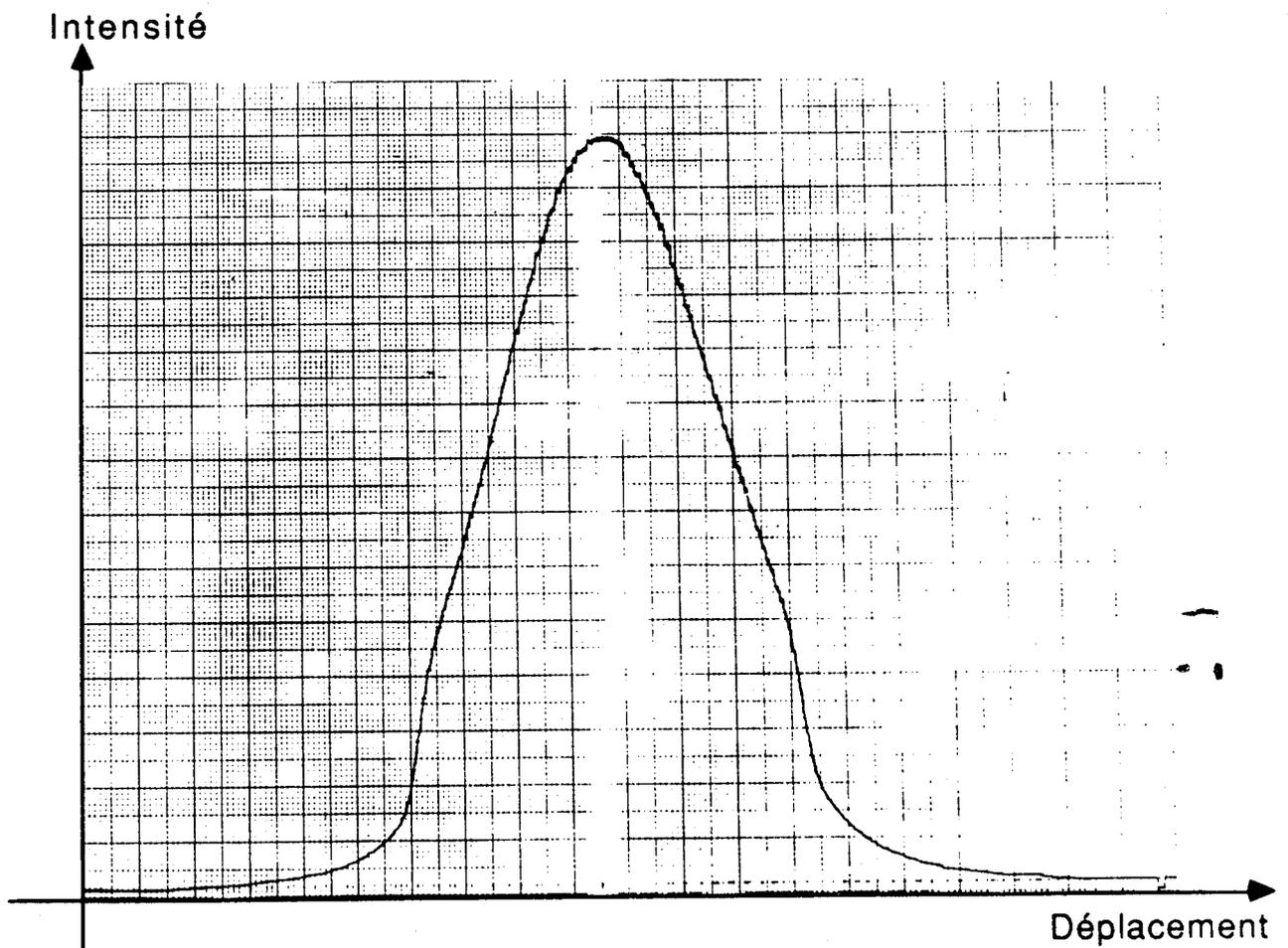
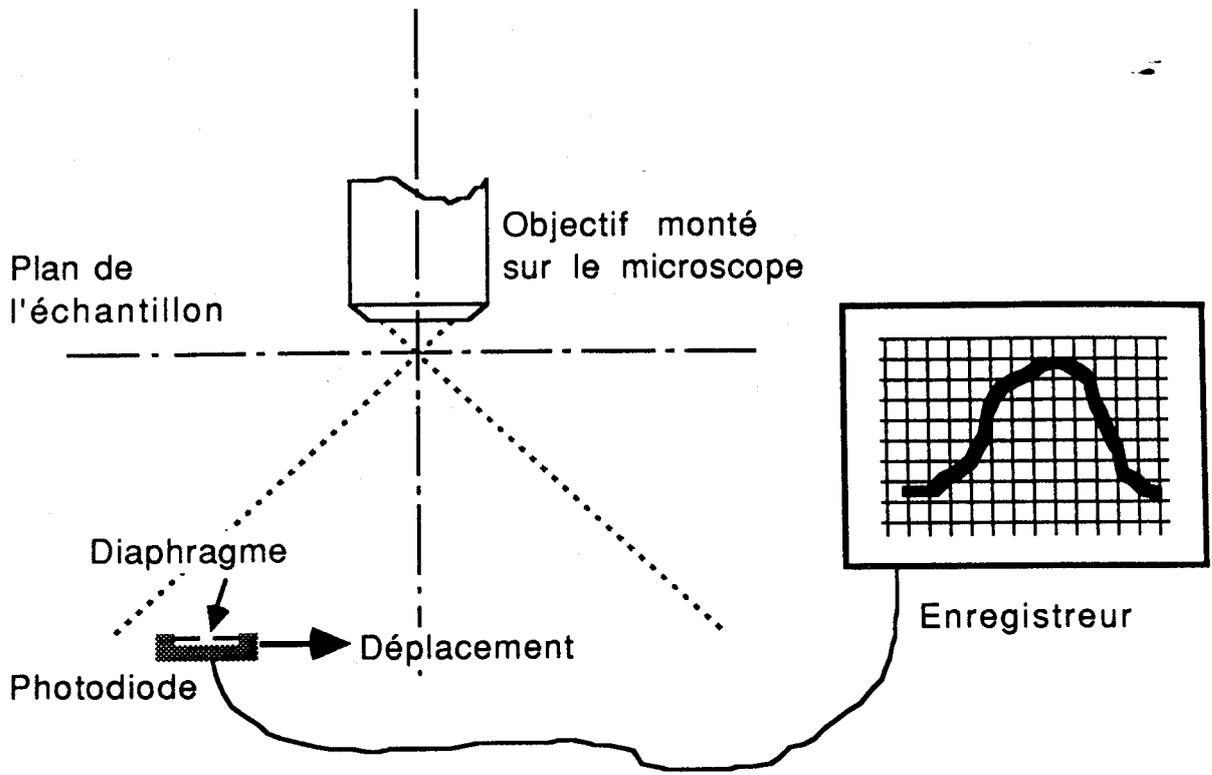


Figure III.5 a : Mesure de la caractéristique d'incidence de l'éclairage

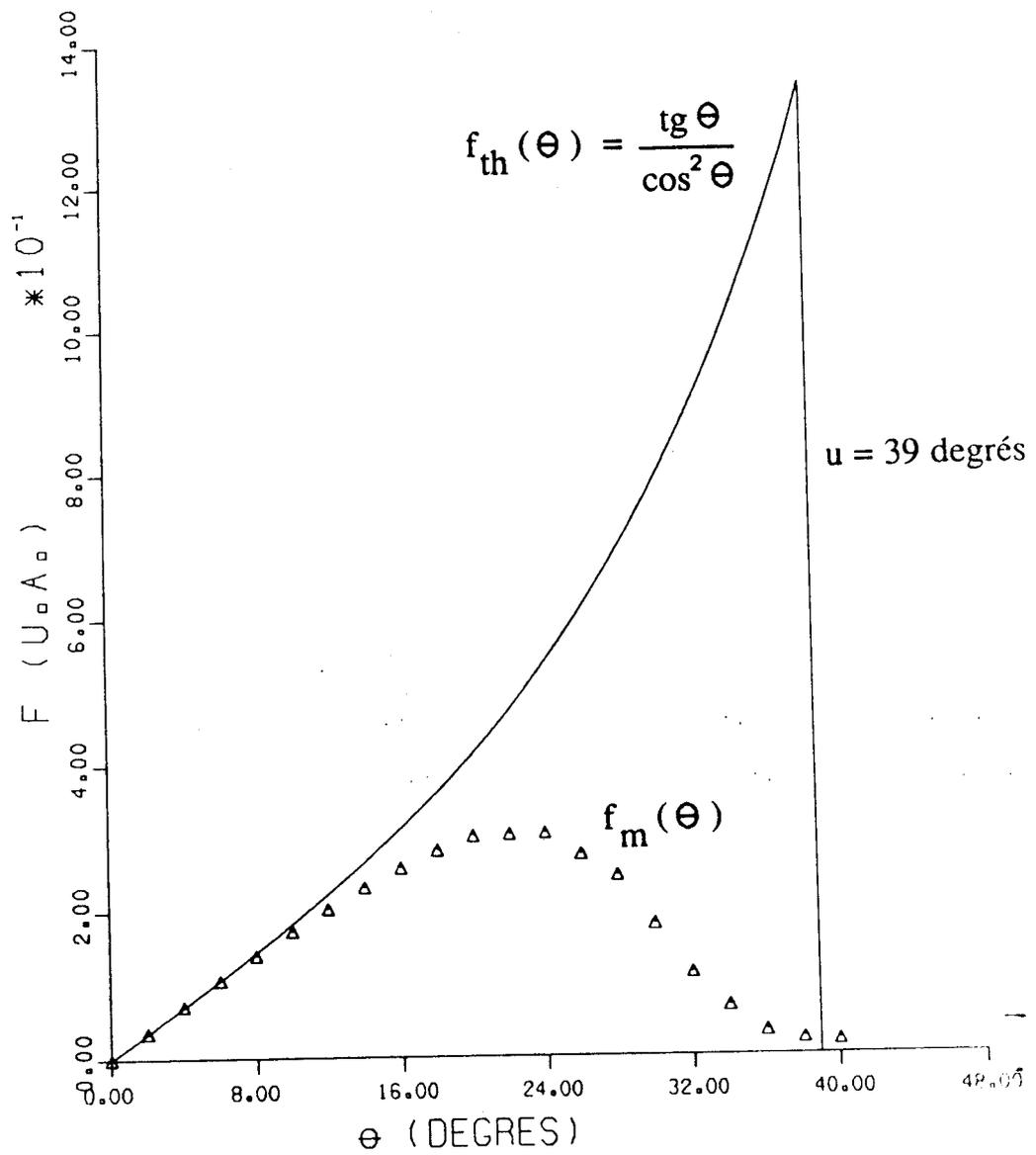


Figure III.5b : Caractéristique d'incidence de l'éclairage au niveau de l'échantillon - Objectif x 100, N = 0.95 (courbes théorique f_{th} et mesurée f_m).

1.2.3 Comparaison théorie - expérience

Nous utilisons le même échantillon que pour la comparaison théorie-expérience en onde plane (III.1.1.3) : SiO_2 5800 Å sur Si.

Nous allons comparer les spectres de réflectivité en longueur d'onde de cet échantillon, mesuré sur le microscope d'une part, et calculé théoriquement d'autre part.

Deux objectifs d'ouvertures numériques différentes sont utilisés. Une illustration de l'influence de la caractéristique d'incidence de l'éclairage sur les spectres de réflectivité est ainsi obtenue.

a) Objectif de très faible ouverture numérique.

$$\begin{array}{|l} \text{Grossissement} & : \quad x \ 3,2 \\ \text{Ouverture numérique} & : \quad \sin u_{\max} = 0,06 \end{array}$$

D'où l'angle d'ouverture du faisceau d'éclairage produit par cet objectif ne peut excéder :

$$u_{\max} \# 3 \text{ degrés.}$$

Etant donnée la très faible valeur de cet angle, on peut considérer que l'échantillon est éclairé en incidence normale.

La figure (III.6a) représente la réflectivité théorique de l'échantillon pour une onde plane en incidence normale ainsi que la réflectivité mesurée à travers l'objectif x 3,2.

La théorie est en bon accord avec l'expérience.

b) Objectif de forte ouverture numérique.

Nous avons utilisé l'objectif x 100 d'ouverture numérique 0,95, le diaphragme d'ouverture étant approximativement réglé à 2/3 comme dans l'exemple du (III.1.2.2).

On trouve figure (III.6b) le spectre de réflectivité de l'échantillon d'oxyde calculé en utilisant la caractéristique d'incidence $f_m(\theta)$ mesurée (figure III.5), ainsi que le spectre de réflectivité expérimental de l'échantillon. On observe une bonne concordance.

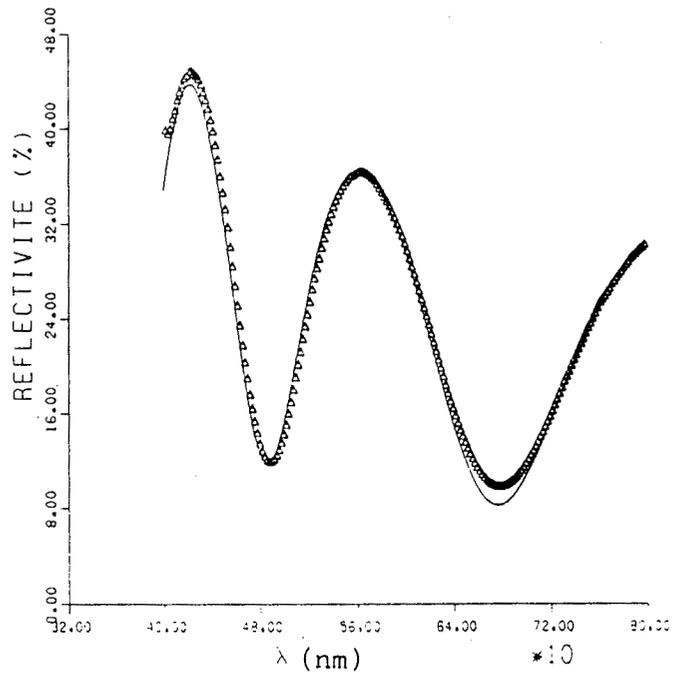
A titre de comparaison, est rappelé sur ce graphique, le spectre de réflectivité calculé de l'échantillon en incidence normale : l'ouverture du faisceau d'éclairage a une influence très sensible sur le spectre.

Le fait que la correspondance théorie-expérience soit bonne, corrobore en particulier l'hypothèse de l'**incohérence totale** de l'éclairage microscopique formulée pour cette application au paragraphe III.1.2.1.

a) Objectif de faible ouverture

△△ spectre mesuré

— spectre théorique
(incidence normale)



b) Objectif de forte ouverture

△△ spectre mesuré

— spectre théorique tenant
compte de l'ouverture

— spectre théorique à
incidence normale

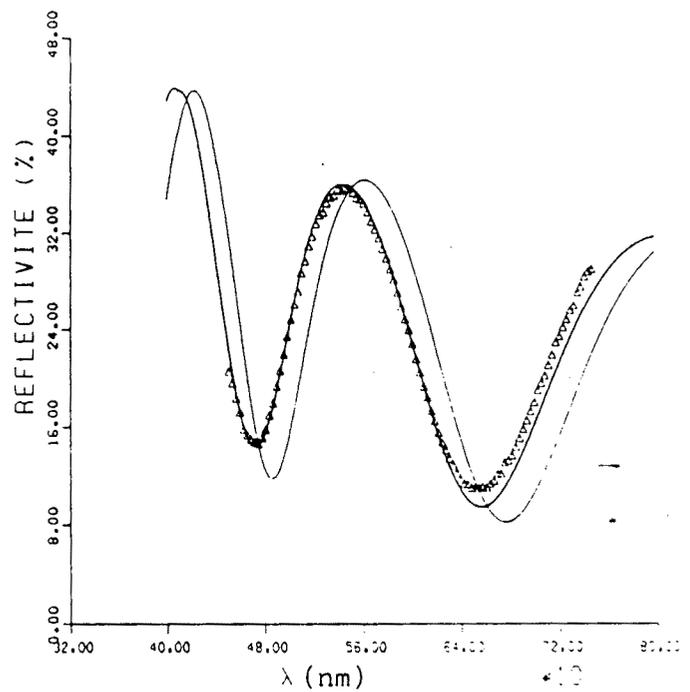


Figure III.6 : Spectres de réflectivité de l'échantillon SiO_2 5800 Å / Si pour l'éclairage du microscope.

1.3 CONCLUSION

Les comparaisons théorie-expérience exposée dans cette partie III.1 nous montrent qu'il est possible d'obtenir une bonne prévision du spectre de réflectivité d'un échantillon de couches minces si l'on connaît :

- les caractéristiques physiques de l'empilement (indices des matériaux, épaisseurs des couches)
- la caractéristique d'incidence $f(\theta)$ de l'éclairage du microscope.

2 METHODE EXPERIMENTALE

Le spectre de réflectivité peut également être obtenu par une mesure directe sur l'échantillon à travers l'optique du microscope. Cette mesure tient compte de la caractéristique $f(\theta)$ de l'éclairage: c'est le spectre réel de l'échantillon observé au microscope.

2.1 PRINCIPES D'APPAREILLAGES

Deux solutions techniques sont envisageables.
Leurs principes sont explicités ci-dessous [9].

a) Monochromateur en éclairage (figure III.7a)

L'échantillon est éclairé par un flux lumineux monochromatique de longueur d'onde variable et l'intensité réfléchie est mesurée à l'aide d'un simple photodétecteur.

Cette technique utilise donc un monochromateur dont l'élément dispersif (réseau ou prisme) est actionné mécaniquement pour obtenir le balayage en longueur d'onde. Le temps nécessaire à l'acquisition d'un spectre est donc relativement long (quelques minutes).

Le montage expérimental réalisé dans le cadre de cette thèse utilise cette solution. Il est décrit au chapitre IV.

b) Spectrophotomètre en sortie (figure III.7b)

L'échantillon reçoit un éclairage polychromatique (lumière blanche). Le flux réfléchi est analysé en longueur d'onde et mesuré par un spectrophotomètre. Cette technique est particulièrement intéressante lors de l'utilisation d'un spectrophotomètre "multicanal".

Cet appareil (figure III.7c) est constitué d'un élément dispersif fixe (réseau) projetant le spectre en longueur d'onde sur une barette de photodiodes. Le temps d'acquisition du spectre est réduit à quelques dizaines de microsecondes (temps de lecture de la barette par l'électronique).

Cette solution doit être envisagée en particulier dans le cas d'un appareillage industriel en raison des contraintes de temps imposées.

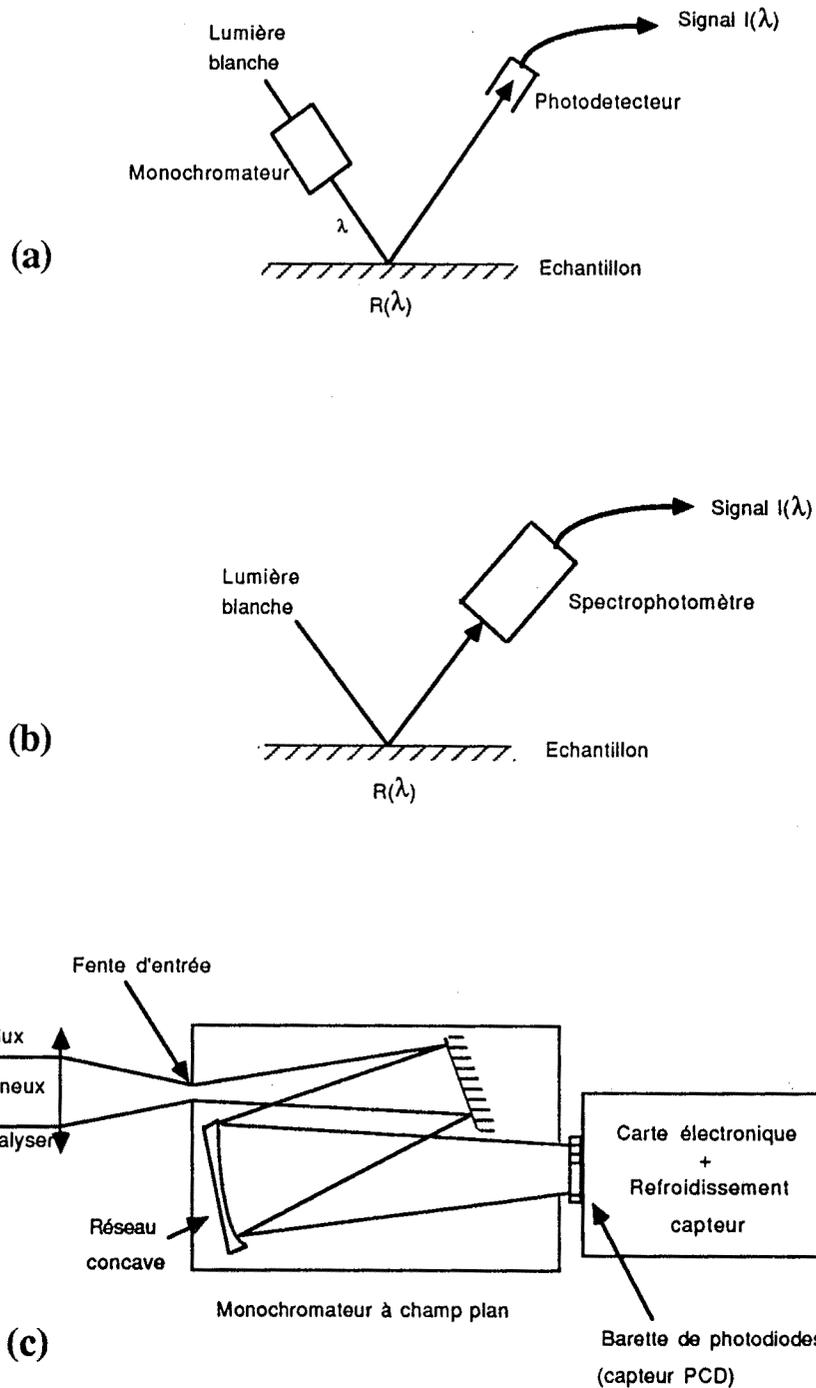


Figure III.7 : Appareillages de mesure de spectre. Schémas de principe.

- (a) Utilisation d'un monochromateur en éclairage.
- (b) Utilisation d'un spectrophotomètre en sortie.
- (c) Schéma du spectrophotomètre "multicanal".

2.2 OBTENTION DU SPECTRE DE REFLECTIVITE DE L'ECHANTILLON A PARTIR DES RESULTATS DE MESURE

Le spectre d'intensité mesuré $I(\lambda)$, qui est le produit de la réflectivité $R(\lambda)$ de l'échantillon par la réponse spectrale de l'appareillage (source, monochromateur, détecteur...), peut se mettre sous la forme :

$$I(\lambda) = R(\lambda) \cdot I_0(\lambda) \quad (390)$$

Pour s'affranchir de la réponse de l'appareillage, il suffit de réaliser la mesure d'un spectre de référence (ligne de base) en remplaçant l'échantillon par un miroir de réflectivité connue $R_{ref}(\lambda)$:

$$I_{ref}(\lambda) = R_{ref}(\lambda) \cdot I_0(\lambda) \quad (391)$$

D'où :

$$R(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_{ref}(\lambda)} R_{ref}(\lambda) \quad (392)$$

Remarque importante :

$R_{ref}(\lambda)$ ne devra pas dépendre de l'angle d'incidence θ .
En effet, la caractéristique d'incidence $f(\theta)$ de l'éclairage du microscope dépend fondamentalement comme nous l'avons vu du choix de l'objectif (microscopie en réflexion) et du réglage adopté pour le diaphragme d'ouverture.

3 CHOIX DE LA METHODE APPLICABLE EN INSPECTION

La réflectivité optique des empilements dépend des épaisseurs des couches et des indices n et k .

Deux problèmes se posent dans le cas des structures microélectroniques :

- les indices de certains matériaux ne sont pas connus ou sont sujets à des variations d'un dépôt à un autre (cf: tableau III.1).
- les épaisseurs des couches déposées sont susceptibles de varier autour des valeurs nominales. Ces variations existent d'une plaque à une autre mais également sur une même plaque (inhomogénéité de l'épaisseur de dépôt; cf: tableau I.1).

En raison de ces incertitudes sur les caractéristiques des structures microélectroniques, la méthode théorique d'obtention des spectres ne peut pas en général être utilisée. Il est nécessaire de réaliser une mesure directe.

Matériau	Indices connus	Source	Remarques
Silicium monocristallin (substrat)	oui	[10],[11],[12],[13],[14]	} bonne correspondance réflectivités calculée et mesurée
Silice thermique	oui	[15],[12],[13],[16],[11]	
Nitru de Si	oui	[17],[11]	
Résine photosensible	oui	expérience : méthode photométrique [18],[19],[20],[21],[15]	indices variant beaucoup suivant la résine et le process.
Silicium polycristallin	non		indices très variables suivant les conditions de dépôt [22]
Siliciures	non		très peu d'informations
Aluminium	oui	[23],[11]	mauvaise correspondance réflectivités calculée et mesurée (granularité, oxydation superficielle à l'air [24])
Alliages métalliques	non		nombreux alliages utilisés.

TABLEAU III.1 : Indices des matériaux microélectroniques usuels : état de nos connaissances.

CHAPITRE IV

VALIDATION EXPERIMENTALE DE LA METHODE

Le but de cette expérimentation est de montrer que l'on peut prévoir théoriquement le facteur de qualité à partir des spectres de réflectivité de l'échantillon.

En effet, cette prévision théorique constitue le cœur de la méthode proposée. L'expérimentation doit porter sur un grand nombre d'échantillons microélectroniques et de filtrages spectraux afin que la moyenne des écarts théorie-expérience ait une valeur significative.

Ce chapitre se décompose en cinq parties.

Une première partie décrit la procédure utilisée et précise les méthodes d'obtention des résultats théoriques et expérimentaux.

Dans une deuxième partie est présenté l'appareillage expérimental mis en œuvre et un accent particulier est mis sur l'étalonnage de la chaîne de prise d'images.

La troisième partie définit les échantillons microélectroniques utilisés.

Enfin, dans les parties 4 et 5, les résultats obtenus sont présentés et interprétés.

1 PROCEDURE DE VALIDATION

1.1 DESCRIPTION DE LA PROCEDURE

Nous disposons d'un ensemble de filtres spectraux de caractéristiques $F(\lambda)$.

Il s'agit de vérifier pour chacun d'eux que les spectres de réflectivité $R_1(\lambda)$ et $R_2(\lambda)$ mesurés à travers le microscope sur deux zones uniformes juxtaposées de l'objet permettent de prévoir correctement le facteur de qualité d'une image incluant ces deux zones.

Pour cela, nous avons effectué une comparaison théorie-expérience sur deux quantités :

- le contraste défini comme l'écart relatif entre les niveaux N_1 et N_2 des deux zones :

$$C = \frac{N_1 - N_2}{\text{Max}(N_1, N_2)} = \frac{N_1 - N_2}{N_{\text{max}}} \quad (401)$$

- le niveau maximum $N_{\text{max}} = \max(N_1, N_2)$ obtenu pour un coefficient d'atténuation

$$\alpha = \frac{I}{I_{\text{max}}} \text{ donné de l'éclairage.}$$

(I et I_{max} sont respectivement les intensités utile et maximale de l'éclairage).

En effet, le facteur de qualité peut se mettre sous la forme :

$$Q = |C| \cdot \frac{N_{\text{max}}}{N_{\text{sat}}}$$

La procédure de validation mise en œuvre pour un échantillon donné est donc la suivante :

- a) Obtention des valeurs théoriques de C et N_{max} (résultats théoriques) :
- Mesure sur l'échantillon étudié des spectres $R_1(\lambda)$ et $R_2(\lambda)$
 - Calcul à l'aide d'un programme informatique (cf: IV.1.2), pour chaque filtre spectral $F(\lambda)$ de C , N_{max} et du coefficient d'atténuation α tel que (N_{max}/N_{sat}) soit le plus grand possible mais au plus égal à 1.
- b) Obtention des valeurs expérimentales de C et N_{max} (résultats expérimentaux) :
- Détermination de ces paramètres à partir d'une image de l'échantillon (cf: IV.1.3) obtenue, pour chaque filtre $F(\lambda)$, avec une atténuation α aussi proche que possible par valeur inférieure du coefficient calculé théoriquement.
- c) Comparaison des résultats théoriques et expérimentaux.

1.2 OBTENTION DES RESULTATS THEORIQUES A PARTIR DES SPECTRES DE L'OBJET

Le programme informatique effectuant ce calcul utilise comme données les spectres de réflectivité $R_1(\lambda)$ et $R_2(\lambda)$ mesurés à l'aide du montage de spectrométrie (IV.2.1.1) sur les zones motif et fond de l'échantillon.

Il tient compte des paramètres de l'appareillage :

	réponse spectrale de la chaîne de prise d'image	$A(\lambda)$
	spectres de transmission des filtres	$F(\lambda)$
	niveau de saturation du capteur	N_{sat}
	intensité maximale d'éclairage	I_{max}

Ces différentes caractéristiques sont déterminées lors d'une phase d'étalonnage (IV.2.2).

Algorithme

Etant donné un filtre de caractéristique $F(\lambda)$, la première étape du calcul est toujours une intégration en longueur d'onde des spectres $R_i(\lambda)$ pour obtenir les niveaux non normalisés :

$$h_i = \int R_i(\lambda) A(\lambda) F(\lambda) d\lambda \quad (410)$$

Puis le contraste entre des zones 1 et 2 est calculé directement par la formule:

$$C = \frac{h_1 - h_2}{\max(h_1, h_2)}, \quad (411)$$

équivalente à la formule (401).

Enfin, l'atténuation α et le niveau maximum N_{\max} correspondant sont définis par:

$$\begin{array}{ll} \text{Si } \max(h_1, h_2) \geq \frac{N_{\text{sat}}}{I_{\text{max}}} & \text{(condition de saturation)} \quad -: \\ & : \\ & : \\ & : \\ \text{Alors } \alpha = \frac{N_{\text{sat}}}{I_{\text{max}}} \cdot \frac{1}{\max(h_1, h_2)} & \quad -> (412) \\ & : \\ N_{\max} = N_{\text{sat}} & : \\ & : \\ \text{Sinon } \alpha = 1 & : \\ N_{\max} = I_{\text{max}} \cdot \max(h_1, h_2) & -: \end{array}$$

Cette étape correspond à la normalisation photométrique des niveaux h_i .

Les résultats fournis par le programme sont C , α et N_{\max} pour chacun des filtres $F(\lambda)$ disponibles.

1.3 DETERMINATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX A PARTIR D'UNE IMAGE

L'image d'un objet mononiveau fournie par le système d'acquisition (IV.2.1.2) est constituée de deux zones correspondant l'une au motif et l'autre au fond, dont les niveaux de gris respectifs sont N_1 et N_2 .

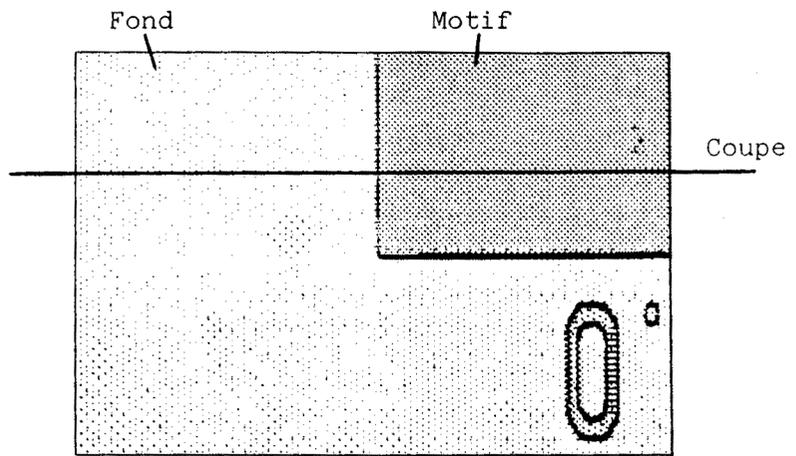
L'histogramme de cette image possède deux pics (ou modes), chacun d'eux correspondant à l'une des deux zones.

La détermination du niveau de gris N_i se fait en calculant la valeur moyenne du pic relatif à la zone i (illustration figure IV.1).

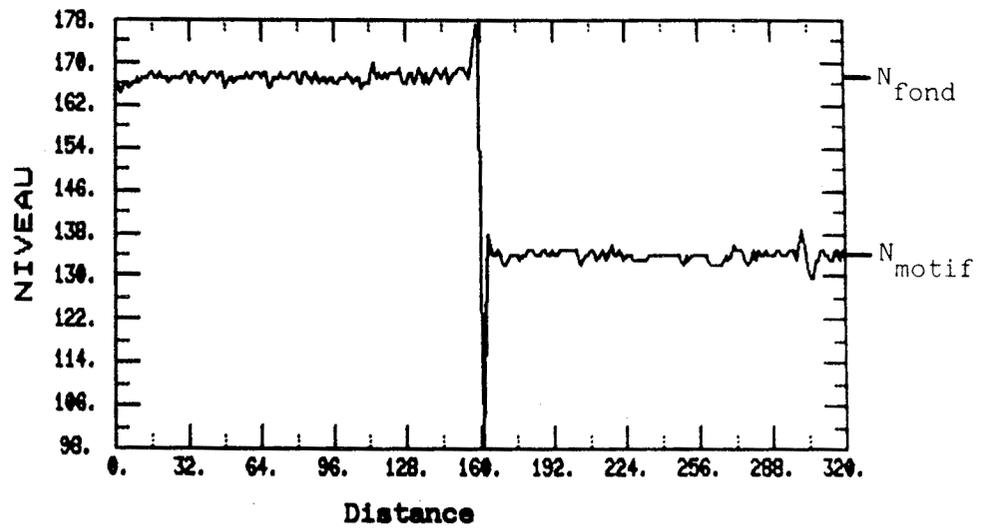
Cette manière de procéder permet de réduire considérablement l'incertitude de détermination de N_i liée au bruit perturbant l'image.

La déduction de C et N_{max} est immédiate.

IMAGE



COUPE



HISTOGRAMME

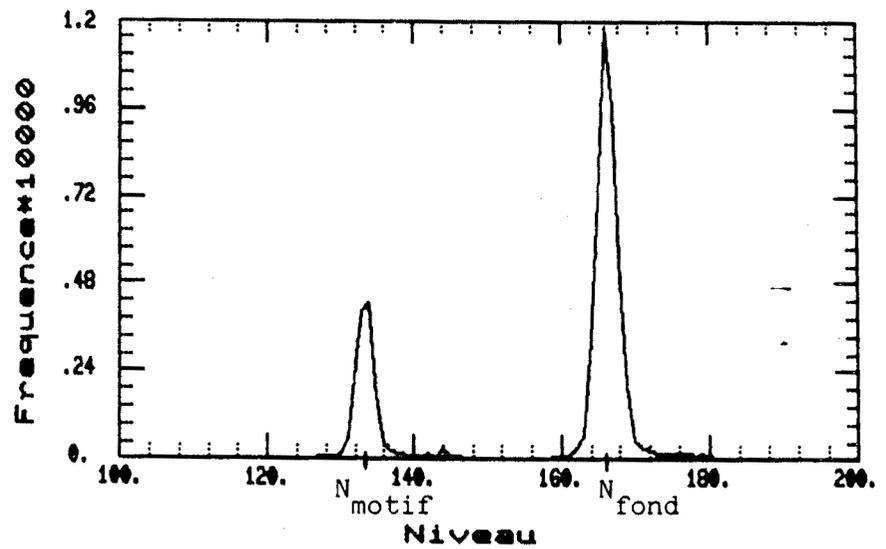


Figure IV.1 : Détermination des niveaux de gris d'une image.

2 MONTAGE EXPERIMENTAL

2.1 DESCRIPTION

Le montage (schéma global figure IV.2) est construit autour d'un microscope optique Leitz Orthoplan [25].

Ce microscope fonctionne en réflexion, fond clair et est équipé d'un éclairage de Köhler. On utilise un objectif x100 d'ouverture numérique 0,95.

Le montage peut être utilisé :

- soit pour l'acquisition des spectres en longueur d'onde (voie optique 1)
- soit pour l'acquisition des images d'échantillons (voie optique 2).

Les voies 1 et 2 sont commutables grâce à deux miroirs mobiles.

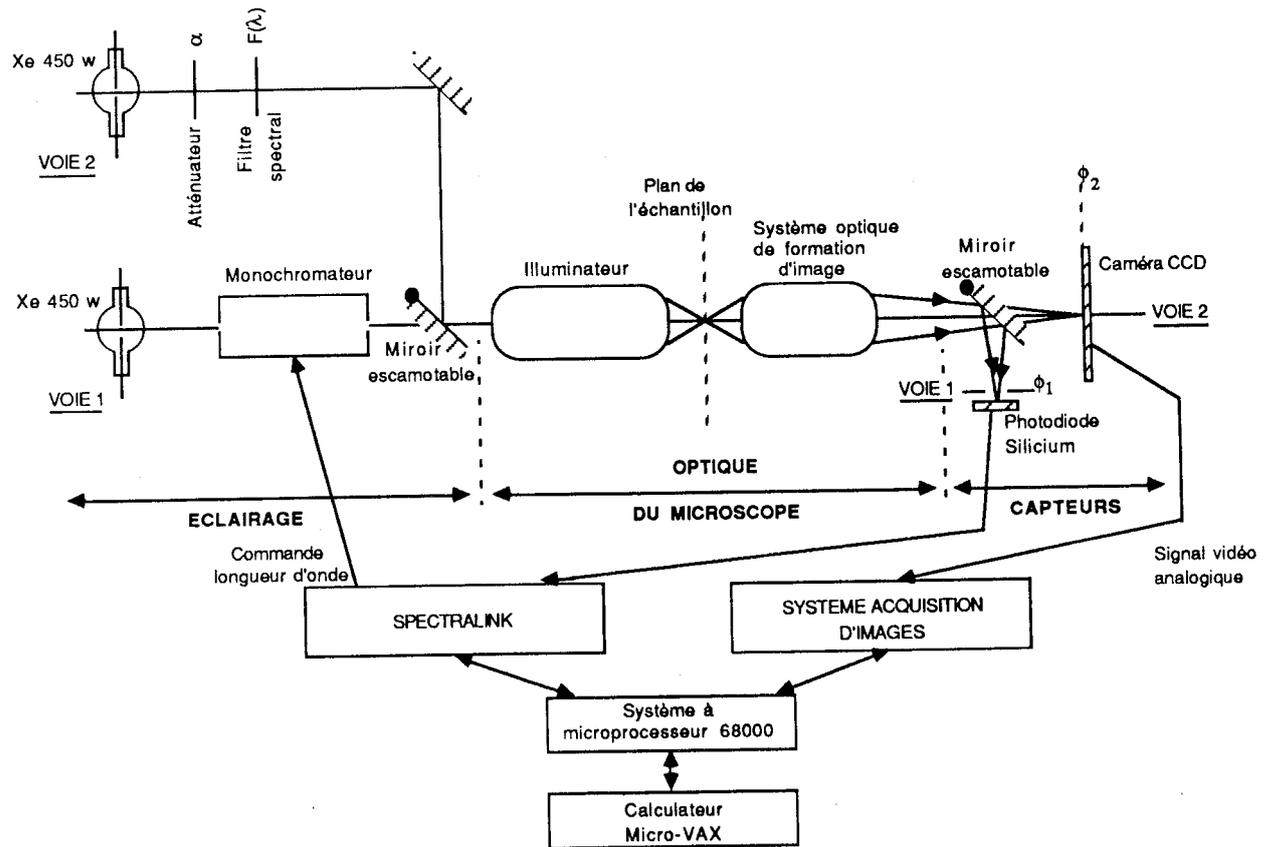


Figure IV.2 : Montage expérimental.

2.1.1 Acquisition des spectres (figure IV.3)

Eclairage

La source est une lampe à arc au Xenon de 450 watts produisant un éclairage "blanc".

Un monochromateur à réseau permet d'isoler une bande spectrale très étroite centrée sur la longueur d'onde λ .

La valeur de λ peut varier sur tout le spectre visible grâce à une rotation du réseau autour de son axe normal au plan de la figure.

Le faisceau sortant du monochromateur est injecté à l'entrée de l'illuminateur du microscope par l'intermédiaire d'une fibre optique (un objectif forme l'image de la fente de sortie du monochromateur à l'entrée de la fibre. Un deuxième objectif permet la formation d'une image suffisamment agrandie de la sortie de la fibre dans le plan du diaphragme d'ouverture de l'illuminateur (cf: description de l'éclairage de Köhler en annexe)).

L'utilisation d'une fibre optique résout les problèmes d'encombrement du montage et en facilite le réglage. Elle améliore également l'homogénéité de l'éclairage (suppression de l'inhomogénéité spectrale existant dans le plan de la fente de sortie du monochromateur due à la dispersion).

Mesure

L'intensité lumineuse réfléchie par l'échantillon est mesurée à l'aide d'une photodiode Silicium placée dans le plan image du microscope à l'intérieur de la zone uniforme dont on veut mesurer le spectre.

Système d'acquisition de spectre

L'acquisition d'un spectre d'intensité $I(\lambda)$ est réalisée de manière automatique par un système électronique spécialisé (Spectralink de la société Jobin-Yvon).

Cet ensemble modulaire assure l'échantillonnage du signal de sortie de photodiode synchronisé avec le déplacement du réseau puis le transfert en fin d'acquisition de l'ensemble des points de mesure (λ_k, I_k) vers le calculateur Micro-VAX via une liaison informatique.

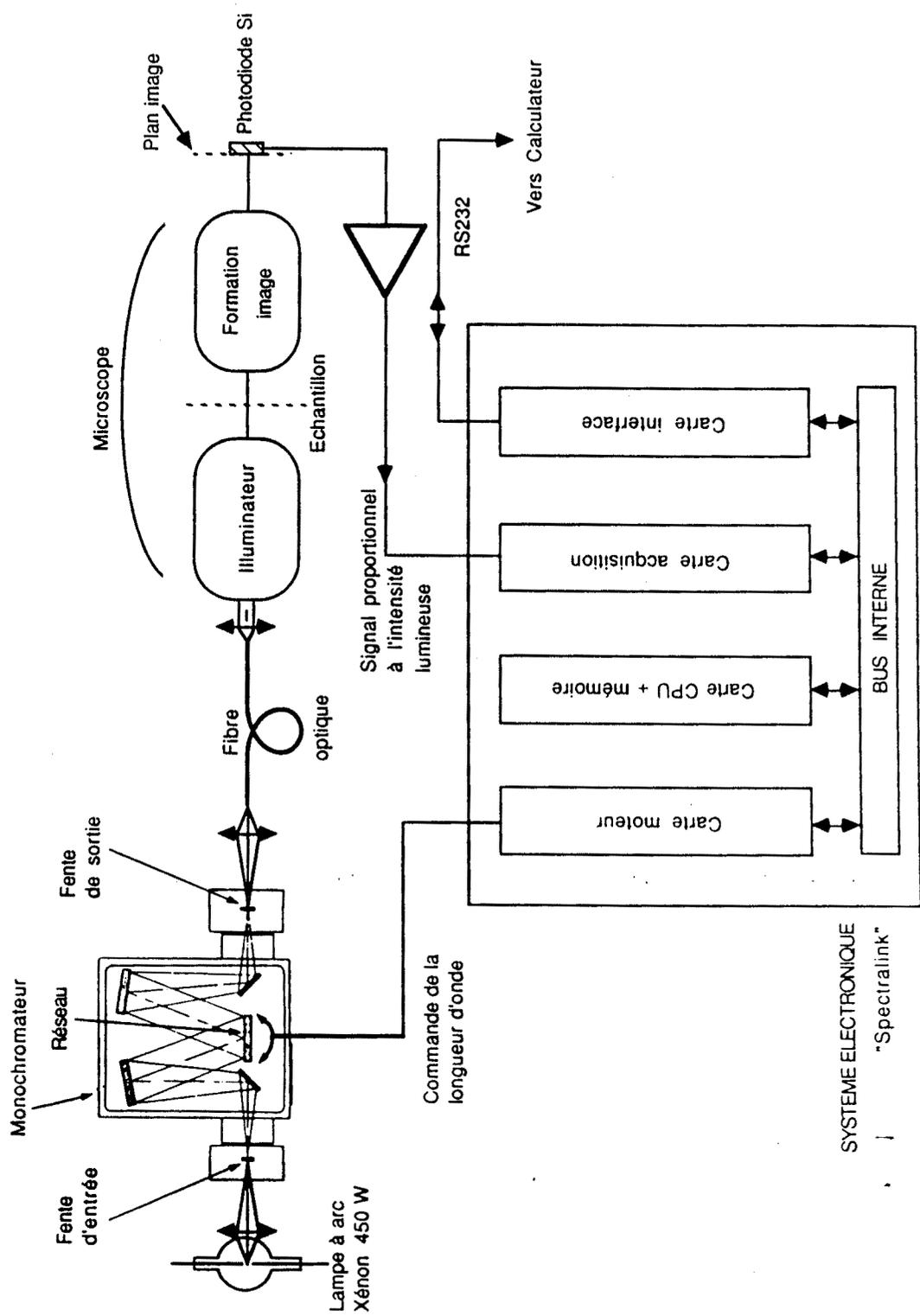


Figure IV.3 : Montage d'acquisition des spectres.

2.1.2 Acquisition des images

En configuration "imagerie", le montage est constitué de :

- a) Une source (lampe à arc Xenon 450 watts, produisant un éclairage puissant sur tout le spectre visible ($\lambda = 400 \text{ nm}$ à 800 nm)).

Il est possible d'intercaler sur le trajet optique :

- des atténuateurs permettant d'ajuster l'intensité de la source sans modifier son spectre,
- des filtres spectraux $F(\lambda)$.

Nous disposons de filtres interférentiels passe-bande.

- b) Une caméra CCD Fairchild [26] est placée dans le plan image $\phi 2$. Ce capteur est une matrice de $488 * 380$ pixels pour des dimensions de $0,80 \text{ cm}$ sur $1,14 \text{ cm}$. Pour l'objectif de grossissement $x100$, la caméra couvre un champ objet d'environ $100 \mu\text{m}$ sur $100 \mu\text{m}$. Le signal vidéo analogique est numérisé (8 bits ou 256 niveaux de gris) par le système d'acquisition.

L'image numérique est transférée par l'intermédiaire d'une liaison informatique sur le calculateur Micro-VAX pour y subir des traitements.

En particulier, on effectue systématiquement sur cette image "brute" une correction d'uniformité.

En effet, sur le champ observé, l'intensité d'éclairage présente une inhomogénéité marquée (de l'ordre de 10% pour notre appareillage) que l'on retrouve bien évidemment sur les images.

La correction d'uniformité consiste en une division pixel à pixel de l'image acquise par un tableau de coefficients reproduisant l'inhomogénéité et obtenu à partir de l'image d'un échantillon uniforme acquise dans les mêmes conditions.

Remarque : en même temps qu'il corrige l'inhomogénéité de l'éclairement, ce logiciel effectue la correction d'offset dont il est fait état au (IV.2.2.4).

2.2 ETALONNAGE DE LA CHAÎNE DE PRISE D'IMAGE

2.2.1 Valeurs du coefficient d'atténuation α

Un ensemble de quatre atténuateurs de densités optiques 0.1, 0.3, 0.5, 1 et 2, nous permet de faire varier l'intensité d'éclairage de manière discontinue.

Les valeurs de $\alpha = I/I_{\max}$ pouvant être obtenues grâce aux différentes combinaisons réalisables, ont été mesurées et sont portées dans le tableau IV.1.

2.2.2 Caractéristiques des filtres spectraux

Les caractéristiques de transmission $F(\lambda)$ en fonction de la longueur d'onde des différents filtres interférentiels disponibles ont été mesurées expérimentalement (figure IV.4).

2.2.3 Caractéristique spectrale de la chaîne de prise d'image

Les réponses spectrales $C(\lambda)$ de la caméra, $M(\lambda)$ du microscope (transmission du système optique) ainsi que l'allure du spectre d'émission de la source $I_0(\lambda)$ ont été déterminées expérimentalement.

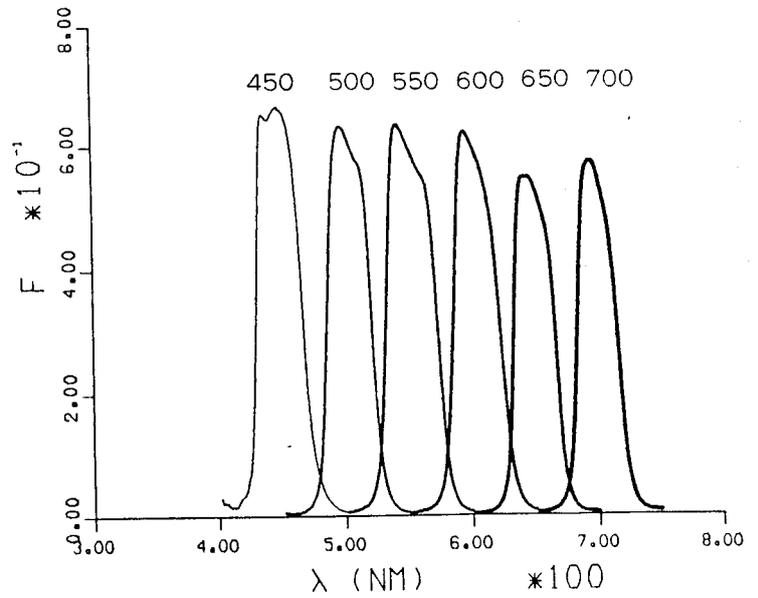
La caractéristique spectrale $A(\lambda)$ de la chaîne de prise d'image (source + microscope + caméra) est le produit de ces trois fonctions. Elle est arbitrairement normalisée à 1 pour $\lambda = 600$ nm (figure IV.5).

Combinaisons réalisables D	Atténuation α (%)
0	100
0,1	83,62 %
0,3	55,32 %
0,1+0,3	45,92 %
0,5	35,41 %
0,5+0,1	29,77 %
0,5+0,3	19,62 %
0,5+0,3+0,1	16,08 %
1	12,08 %
1+0,1	10,22 %
1+0,3	6,78 %
1+0,3+0,1	5,67 %
1+0,5	4,51 %
1+0,5+0,1	3,77 %
1+0,5+0,3	2,53 %
1+0,5+0,3+0,1	2,11 %
2	1,14 %

Tableau IV.1 : Valeurs expérimentales du coefficient d'atténuation α classées par ordre décroissant. (α est déterminée à $\pm 1\%$).

Figure IV.4 : Caractéristiques des filtres interférentiels.

a) Filtres de bande passante 40 nm.



b) Filtres "larges".

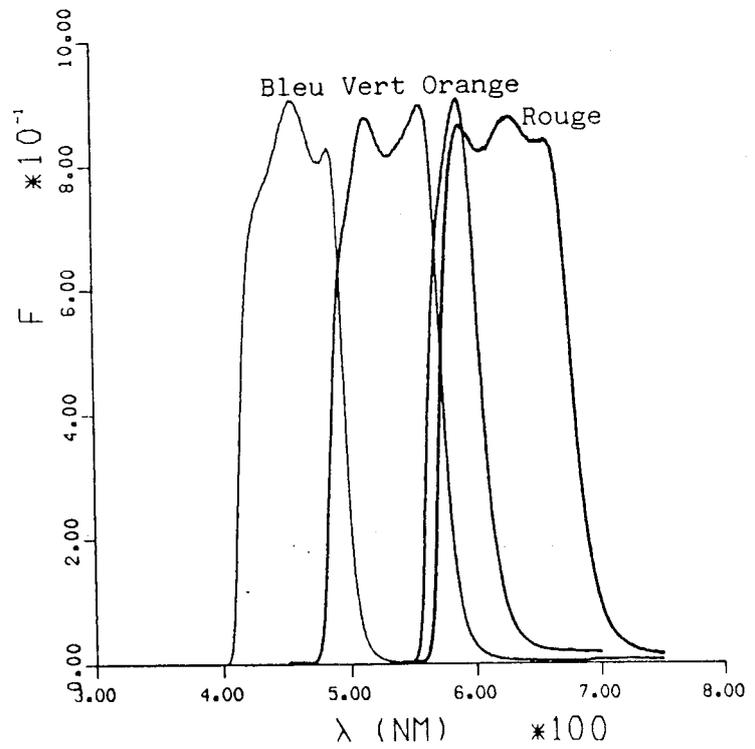
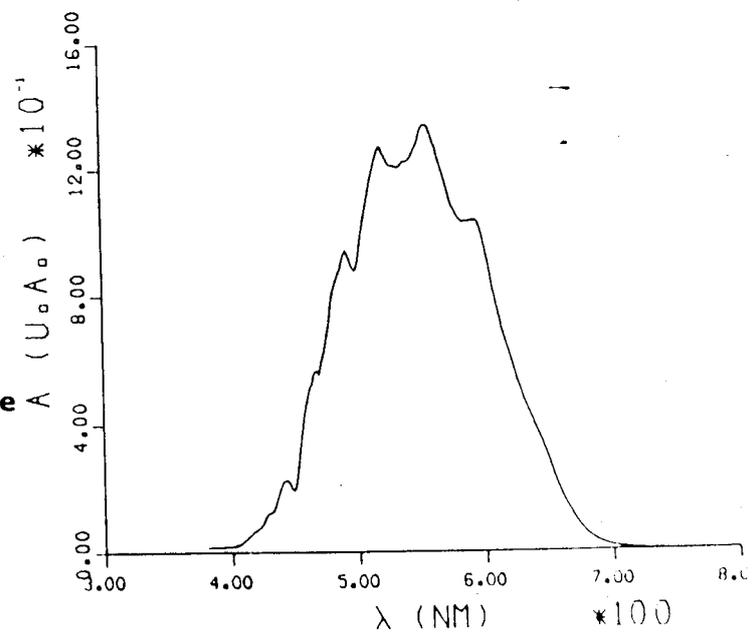


Figure IV.5 : Caractéristique spectrale de la chaîne de prise d'image.



2.2.4 Réponse en fonction de l'éclairement de l'ensemble caméra et système d'acquisition. Valeur de N_{sat}

La réponse de notre caméra (amplitude du signal vidéo) en fonction de l'éclairement incident pour une lumière d'excitation de spectre donné présente une très bonne linéarité pour les niveaux de sortie compris entre 0 et 600 mV (courbe expérimentale figure IV.6a).

La correspondance entre le signal vidéo et le niveau de gris en sortie du codeur est indiqué sommairement par l'échelle placée à gauche de cette courbe.

La réponse dynamique mesurée de l'ensemble caméra et système d'acquisition (niveau numérique de sortie g en fonction de l'éclairement) est représentée figure IV.6b. Cette courbe présente une bonne linéarité ($\pm 2\%$). Par contre, il existe un "offset" parasite du signal vidéo par rapport à la plage de codage du système d'acquisition : le capteur étant placé dans l'obscurité, le niveau de gris moyen est :

$$g_{obscurité} \# 21$$

Cet offset doit bien sûr être corrigé :

$$N = g - g_{obscurité}$$

D'autre part, ce système d'acquisition effectuant un codage des niveaux de gris sur 8 bits, son niveau de sortie maximum est :

$$g_{max} = 2^8 - 1 = 255$$

Dans ces conditions, notre ensemble caméra et système d'acquisition possède un niveau de saturation :

$$N_{sat} = g_{max} - g_{obscurité}$$

C'est à dire :

$$\boxed{N_{sat} = 234}$$

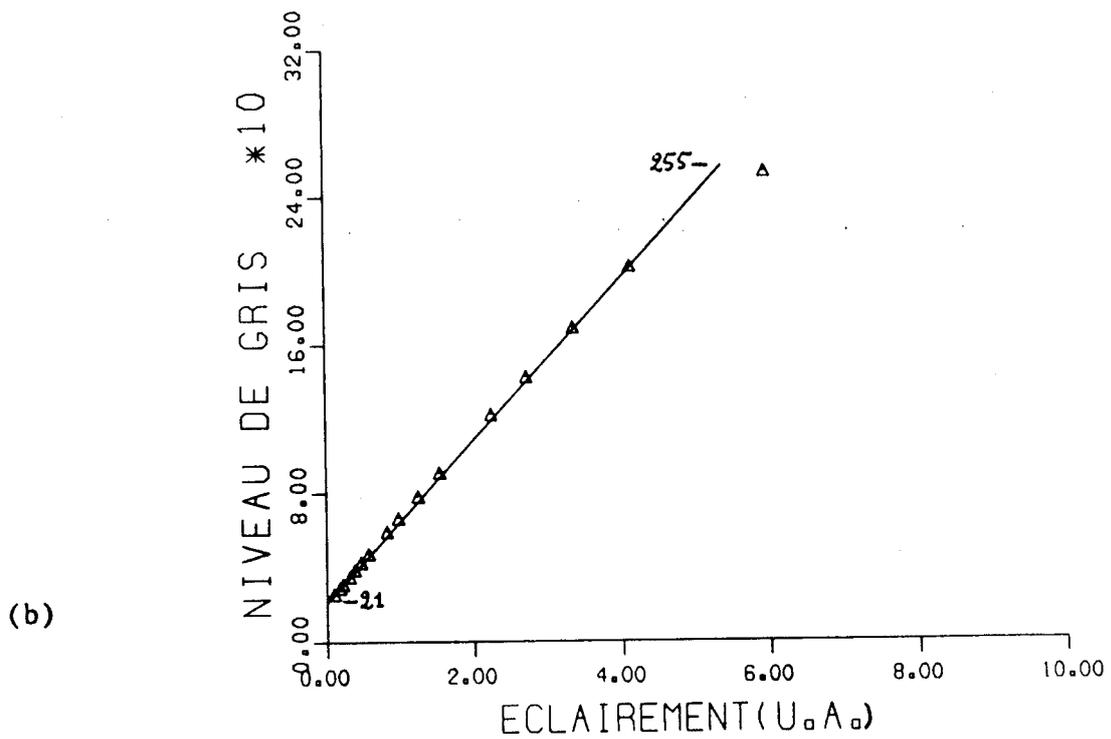
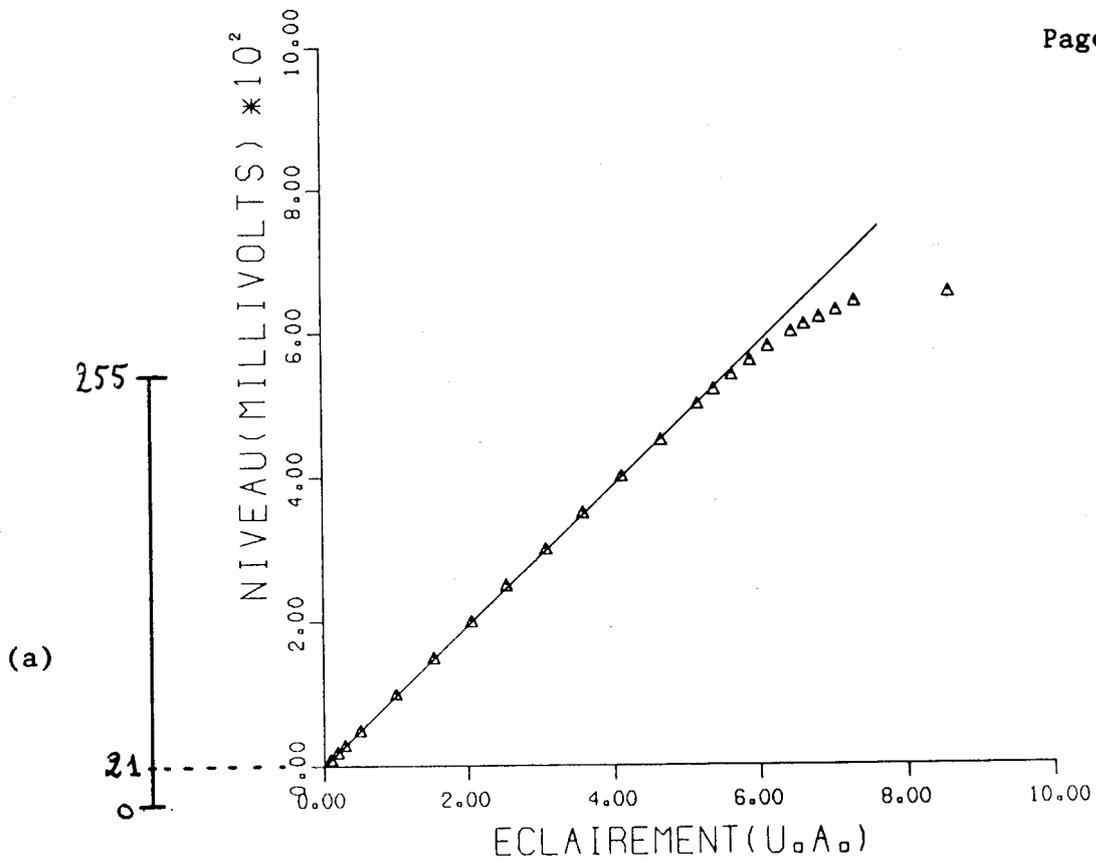


Figure IV.6 : Réponses en fonction de l'éclairement de
(a) la caméra seule
(b) l'ensemble caméra et système d'acquisition.

2.2.5 Détermination de I_{max} (normalisation photométrique)

Pour un échantillon uniforme dont le spectre $R(\lambda)$ est connu, on sait pour le filtre spectral $F(\lambda)$ calculer théoriquement le niveau non normalisé h :

$$h = \int R(\lambda) A(\lambda) F(\lambda) d\lambda$$

Avec cet échantillon, on réalise pour chaque filtre spectral l'acquisition d'une image dont on détermine à l'aide de l'histogramme, le niveau de gris moyen N . Nous devons avoir :

$$N = h \alpha I_{max},$$

d'où l'on déduit le coefficient I_{max} .

Nous avons utilisé un échantillon constitué d'une couche de AlSi non gravée sur substrat Silicium. Le spectre de réflectivité $R(\lambda)$ de cet échantillon a été préalablement mesuré au spectrophotomètre et est peu sensible à l'angle d'incidence.

Les résultats obtenus figurent dans le tableau IV.2.

Le rapport $(N/h\alpha)$ est en théorie indépendant du filtre $F(\lambda)$ utilisé. On vérifie dans la pratique que ce rapport est constant dans une bonne approximation à une valeur près (filtre 700nm). On obtient ainsi une vérification de $A(\lambda)$ et des $F(\lambda)$.

Filtre	N (mesuré)	h (calculé)	α	$\frac{N}{h\alpha}$
450	47,8	80,747	0,0678	8,73
500	127,29	217,49	0,0678	8,632
550	175,47	297,44	0,0678	8,701
600	111,57	184,79	0,0678	8,905
650	56,07	54,92	0,1208	8,451
700	24,94	9,071	0,5532	(4,97)

Tableau IV.2

Le coefficient I_{\max} , intensité maximale de la source pour l'appareillage utilisé, est déterminé en faisant la moyenne des différentes valeurs du rapport $(N/h\alpha)$.

Nous avons :

$I_{\max} \# 8,7$

On trouvera au cours de l'expérimentation (IV.4) des valeurs de I_{\max} sensiblement différentes (jusqu'à + 20%). Ces variations correspondent au réglage périodique de la lampe d'imagerie (centrage) nécessaire sur notre appareillage.

3 ECHANTILLONS

Nous avons utilisé pour cette expérimentation une série d'échantillons mononiveau représentative d'une technologie MOS.

Le tableau IV.3 donne la description physique de chaque échantillon.

Remarquons qu'il s'agit d'échantillons témoins (I.1.1) correspondant à des étapes technologiques critiques. Les motifs des échantillons METAL et SI-POLY sont granuleux, ce qui peut poser problème pour l'application de la méthode.

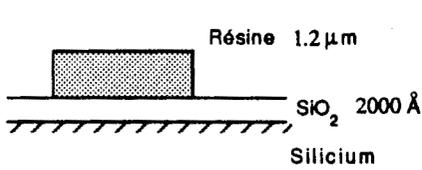
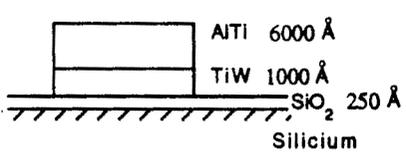
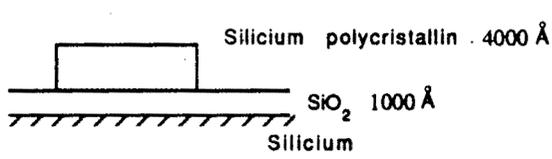
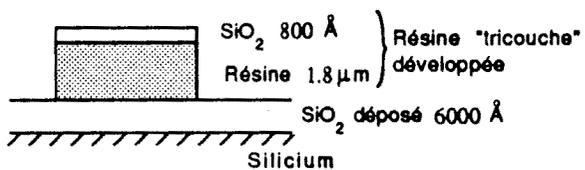
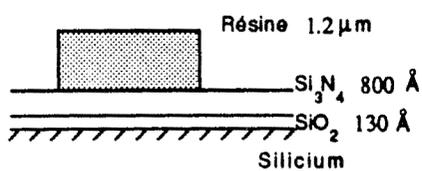
Nom	Description
OXYDE 1	 <p>Résine 1.2 μm SiO₂ 2000 Å Silicium</p>
METAL	 <p>AlTi 6000 Å TiW 1000 Å SiO₂ 250 Å Silicium</p>
SI_POLY	 <p>Silicium polycristallin . 4000 Å SiO₂ 1000 Å Silicium</p>
OXYDE 2	 <p>SiO₂ 800 Å Résine 1.8 μm SiO₂ déposé 6000 Å Silicium</p> <p>Résine "tricouche" développée</p>
NITRURE	 <p>Résine 1.2 μm Si₃N₄ 800 Å SiO₂ 130 Å Silicium</p>

Tableau IV.3 : Inventaire des échantillons.

4 RESULTATS

Pour chaque échantillon et pour l'ensemble des filtres spectraux, on effectue la comparaison théorie-expérience sur :

- le contraste du motif par rapport au fond défini par $C = \frac{N_{\text{motif}} - N_{\text{fond}}}{\max(N_{\text{motif}}, N_{\text{fond}})}$.

On s'intéresse à l'écart absolu entre les valeurs théoriques et expérimentales :

$$\Delta C = C_{\text{exp}} - C_{\text{th}}$$

- les valeurs de niveau de gris maximum obtenu :

$$(N_{\text{max}})_{\text{th}} \text{ et } (N_{\text{max}})_{\text{exp}}$$

Celles-ci ne peuvent être comparées directement, l'atténuation α_{th} prévue théoriquement ne pouvant être réalisée en général en raison du nombre limité d'atténuateurs (cf: IV.2.2.1).

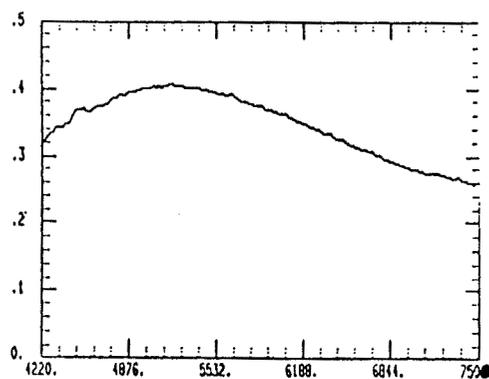
C'est pourquoi nous calculons :

$$\gamma_{\text{th}} = \frac{(N_{\text{max}})_{\text{th}}}{\alpha_{\text{th}}} \text{ et } \gamma_{\text{exp}} = \frac{(N_{\text{max}})_{\text{exp}}}{\alpha_{\text{exp}}}$$

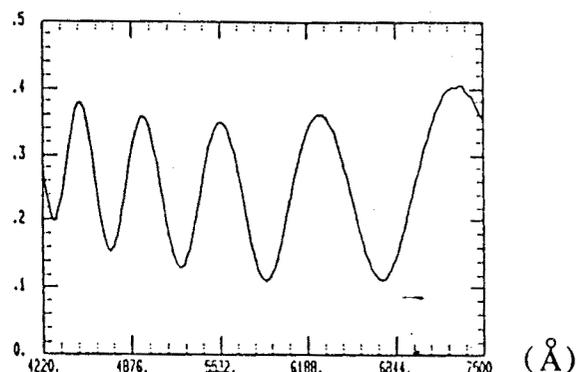
Le rapport $\frac{\gamma_{\text{exp}}}{\gamma_{\text{th}}}$ doit être le plus proche possible de 1 ou $\frac{\Delta\gamma}{\gamma} = \frac{\gamma_{\text{exp}}}{\gamma_{\text{th}}} - 1$
le plus proche possible de 0.

Les résultats obtenus pour chacun des échantillons et pour l'ensemble des filtres spectraux sont regroupés dans les tableaux IV.4a à IV.4e. Les spectres de réflectivité mesurés du motif et du fond sont également représentés.

Filtre	C_{th}	C_{exp}	$ C_{exp} - C_{th} $	$\alpha_{th}(\%)$	$(N_{max})_{th}$	$\alpha_{exp}(\%)$	$(N_{max})_{exp}$	$\frac{Y_{exp}}{Y_{th}}$
Lumière Blanche	-0,39	-0,37	0,02	3,28	234	2,11	134	0,89
450	-0,337	-0,338	0,001	81,65	234	55,32	145	0,91
500	-0,41	-0,38	0,03	25,17	234	29,77	233,5	0,84
550	-0,31	-0,28	0,03	18,46	234	16,08	186	0,91
600	-0,41	-0,36	0,05	32,30	234	16,08	112	0,96
650	-0,21	-0,22	0,01	100	181	100	166	0,92
700								
Bleu	-0,345	-0,339	0,006	20,17	234	16,08	186	0,997
Vert	-0,39	-0,37	0,02	6,74	234	1,14	37	0,93
Orange	-0,51	-0,49	0,02	15,72	234	16,08	213	0,89
Rouge	-0,39	-0,26	(0,13)	12,65	234	16,08	231	(0,78)
Moyennes			0,02					0,92



$R_{fond}(\lambda)$



$R_{motif}(\lambda)$

Tableau IV.4a : Echantillon OXYDE 1

Filtre	C_{th}	C_{exp}	$ C_{exp} - C_{th} $	$\alpha_{th}(\%)$	$(N_{max})_{th}$	$\alpha_{exp}(\%)$	$(N_{max})_{exp}$	$\frac{Y_{exp}}{Y_{th}}$
Lumière Blanche	0,59	0,58	0,01	1,41	234	1,14	186	0,98
450	0,54	0,53	0,01	34,76	234	29,77	202	1,008
500	0,58	0,55	0,03	11,28	234	10,22	217	1,02
550	0,60	0,58	0,02	8,19	234	6,78	208	1,07
600	0,61	0,58	0,03	13,26	234	12,08	219	1,03
650	0,62	0,60	0,02	47,98	234	29,77	146	1,006
700	0,61	0,63	0,02	100	32,2	100	27	0,84
Bleu	0,56	0,53	0,03	8,79	234	6,78	199	1,10
Vert	0,59	0,57	0,02	3,00	234	2,53	206	1,04
Orange	0,61	0,59	0,02	6,64	234	5,67	196	0,98
Rouge	0,61	0,59	0,02	5,11	234	4,51	212	1,03
Moyennes			0,02					1,01

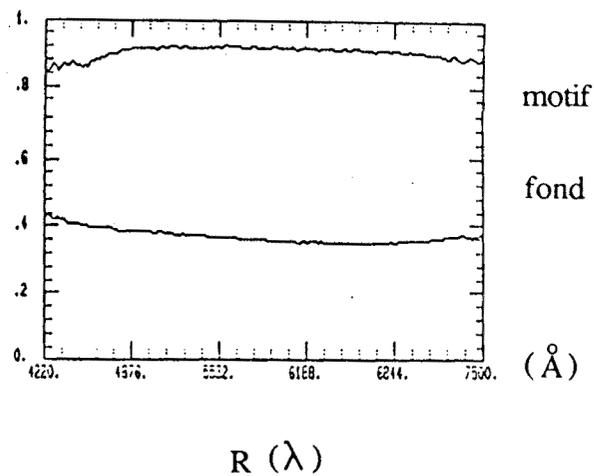


Tableau IV.4b : Echantillon METAL

Filtre	C_{th}	C_{exp}	$ C_{exp} - C_{th} $	$\alpha_{th}(\%)$	$(N_{max})_{th}$	$\alpha_{exp}(\%)$	$(N_{max})_{exp}$	$\frac{Y_{exp}}{Y_{th}}$
Lumière Blanche	0,74	0,72	0,02	2,71	234	2,11	183	1,004
450	0,60	0,58	0,02	72,58	234	55,32	175	0,98
500	0,69	0,68	0,01	25,72	234	19,62	170	0,95
550	0,80	0,79	0,01	13,12	234	10,22	183	1,003
600	0,763	0,758	0,005	25,17	234	19,62	182	0,998
650	0,81	0,80	0,01	63,96	234	45,92	159	0,95
700								
Bleu	0,67	0,65	0,02	17,30	234	12,08	170	1,04
Vert	0,76	0,74	0,02	5,74	234	4,51	184	1,001
Orange	0,68	0,63	0,05	17,32	234	12,08	140	0,86
Rouge	0,76	0,75	0,01	9,79	234	6,78	165	1,02
Moyennes			0,02					0,98

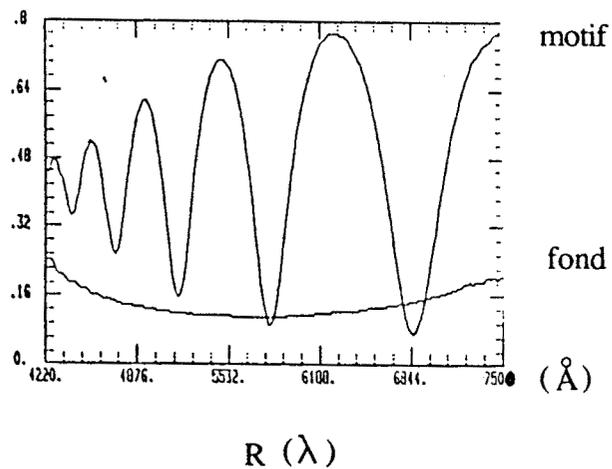
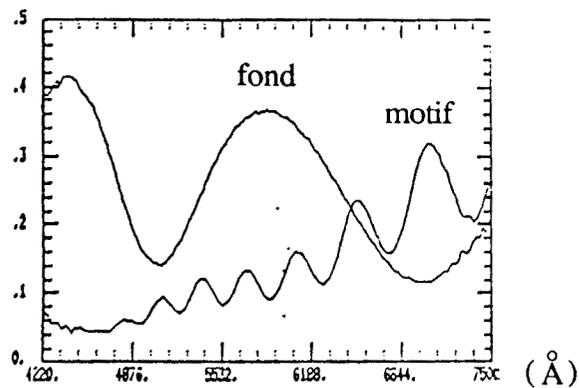


Tableau IV.4c : Echantillon SI_POLY

Filtre	C_{th}	C_{exp}	$ C_{exp} - C_{th} $	$\alpha_{th}(\%)$	$(N_{max})_{th}$	$\alpha_{exp}(\%)$	$(N_{max})_{exp}$	$\frac{Y_{exp}}{Y_{th}}$
Lumière Blanche	-0,63	-0,60	0,03	4,71	234	3,77	193	1,03
450	-0,87	-0,85	0,02	85,49	234	55,32	142	0,94
500	-0,53	-0,47	0,06	63,58	234	55,32	185	0,91
550	-0,64	-0,61	0,03	24,94	234	19,62	183	0,99
600	-0,63	-0,59	0,04	35,34	234	29,77	191	0,97
650	-0,19	-0,10	(0,09)	100	123	100	118	0,96
700								
Bleu								
Vert								
Orange								
Rouge								
Moyennes			0,04					0,97



$R(\lambda)$

Tableau IV.4d : Echantillon OXYDE 2

Filtre	C_{th}	C_{exp}	$ C_{exp} - C_{th} $	$\alpha_{th}(\%)$	$(N_{max})_{th}$	$\alpha_{exp}(\%)$	$(N_{max})_{exp}$	$\frac{Y_{exp}}{Y_{th}}$
Lumière Blanche		0						
450	-0,43	-0,42	0,01	83,74	234	55,32	149	0,96
500	-0,35	-0,32	0,03	45,05	234	45,92	218	0,91
550	0,030	0,016	0,014	55,26	234	45,92	189	0,97
600	0,65	0,60	0,05	67,48	234	55,32	184	0,96
650	0,45	0,48	0,03	100	29,85	100	31	1,04
700								
Bleu	-0,32	-0,28	0,04	25,28	234	12,08	116	1,04
Vert	-0,11	-0,09	0,02	16,56	234	12,08	168	0,98
Orange	0,39	0,35	0,04	45,15	234	45,92	190	0,80
Rouge	0,56	0,55	0,01	33,81	234	12,08	85	1,02
Moyennes			0,03					0,96

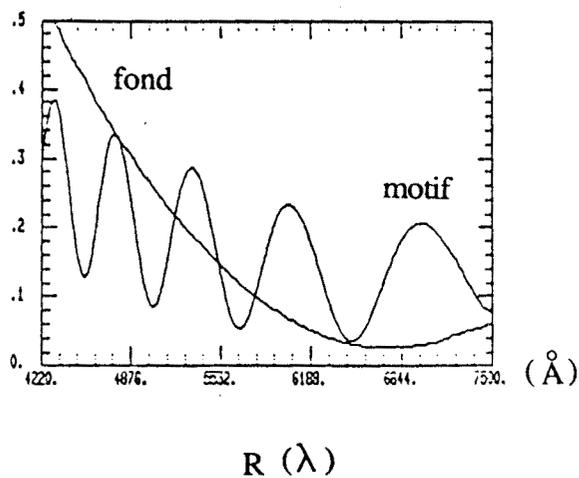


Tableau IV.4e : Echantillon NITRURE

Remarques

- La saturation ($N_{sat} = 234$) peut être atteinte avec les filtres considérés dans presque tous les cas.
- α_{exp} est choisi parmi les valeurs d'atténuation réalisables (tableau IV.1), à au moins 20% en dessous de la valeur calculée α_{th} , ceci pour éviter tout risque de saturation des pixels correspondant à N_{max} sur l'image acquise. Il est important de procéder ainsi en particulier pour les échantillons granuleux (couche de métallisation ou de Silicium polycristallin) dont les images présentent de fortes dispersions de niveau de gris autour de la valeur moyenne.

5 INTERPRETATION DES RESULTATS

Avant toute interprétation des résultats qui viennent d'être présentés, il est nécessaire d'effectuer un calcul d'incertitude sur leur détermination.

La prévision du contraste à partir des spectres de réflectivité doit être effectuée avec le maximum de précision.

Par contre, celle du niveau N_{\max} (ou plus exactement la prévision de l'atténuation α donnant $N_{\max} = N_{\text{sat}}$) peut se faire beaucoup plus grossièrement car un ajustement de niveau de gris de l'image est généralement possible en retouchant l'atténuation α , sachant que ces deux quantités sont unies par une relation de proportionnalité. D'autre part, le coefficient I_{\max} varie sur notre montage expérimental de façon trop importante pour qu'il soit possible de déduire une valeur d'incertitude sur le niveau qui soit significative.

Nous allons donc effectuer un calcul d'incertitude sur la détermination du contraste C.

5.1 CALCULS D'INCERTITUDE

a) Incertitude sur le contraste expérimental

Le contraste expérimental est calculé à partir de deux niveaux de gris mesurés sur un histogramme :

$$|C| = \frac{N_{\max} - N_{\min}}{N_{\max}} \quad (440)$$

Différentiations :

$$\begin{aligned} d|C| &= d\left(1 - \frac{N_{\min}}{N_{\max}}\right) \\ &= -\frac{d N_{\min}}{N_{\max}} - N_{\min} \left(\frac{-d N_{\max}}{N_{\max}^2}\right) \end{aligned}$$

$$d|C| = \frac{N_{\min}}{N_{\max}} \left(\frac{d N_{\max}}{N_{\max}} - \frac{d N_{\min}}{N_{\min}}\right) \quad (441)$$

Par majoration de cette expression, il vient :

$$\Delta C = \frac{N_{\min}}{N_{\max}} \left(\frac{\Delta N_{\max}}{N_{\max}} + \frac{\Delta N_{\min}}{N_{\min}} \right) \quad (442)$$

L'erreur relative $\frac{\Delta N}{N}$ sur la détermination des niveaux de gris peut être considérée comme indépendante du niveau N :

$$\Delta C = 2 \frac{N_{\min}}{N_{\max}} \frac{\Delta N}{N} \quad (443)$$

L'incertitude sur le niveau N expérimental a pour origines :

- le bruit perturbant l'image acquise et provoquant un élargissement des pics de l'histogramme (dispersion des niveaux de gris autour d'une valeur moyenne) :
 - . bruit électronique induit par le capteur et bruit d'échantillonnage du système d'acquisition.
 - . Effet de "trainage" vertical observé sur le capteur CCD utilisé.
 - . Non uniformités de l'éclairage et du capteur (bien que faisant l'objet d'une correction: IV.2.1.2).
 - . Granularité et non uniformité de l'échantillon.
- Le mode de détermination du niveau N (mesure visuelle de la moyenne d'un pic de l'histogramme).

L'incertitude $\frac{\Delta N}{N}$ a été estimée à 2% au maximum.

L'incertitude absolue sur le contraste expérimental s'exprime donc :

$$\Delta C = 0,04 \cdot \frac{N_{\min}}{N_{\max}} \quad (444)$$

b) Incertitude sur le contraste théorique

Nous avons d'après (411) :

$$|C| = \frac{h_{\max} - h_{\min}}{h_{\max}},$$

h étant donné par la formule 410.

A l'issue d'un raisonnement identique à celui du paragraphe précédent, l'incertitude sur C s'exprime :

$$\Delta C = 2 \frac{h_{\min}}{h_{\max}} \frac{\Delta h}{h} \quad (450)$$

Ce qui nous conduit à déterminer $\frac{\Delta h}{h}$, incertitude résultant :

- de la mesure du spectre $R(\lambda)$
- de l'intégration sur la fonction $F(\lambda)$.

Calcul du $\Delta R/R(\lambda)$

La réflectivité $R(\lambda)$ s'obtient par la formule (cf: III.2.2) :

$$R = \frac{I_r(\lambda)}{I_{1db}(\lambda)} R_{\text{refe}}(\lambda) \quad (451)$$

$R_{\text{refe}}(\lambda)$ est la réflectivité mesurée au spectrophotomètre de l'échantillon de référence servant au relevé de ligne de base.

$I_{1db}(\lambda)$ est le spectre de ligne de base.

L'acquisition de $I_{1db}(\lambda)$ est nécessaire pour tenir compte de la fonction d'appareil et d'éventuelles fluctuations à long terme de la puissance de la lampe de spectrométrie.

$I_r(\lambda)$ est le spectre acquis sur l'échantillon dont on veut connaître $R(\lambda)$.

Par différentiation de (451), il vient :

$$\frac{\delta R}{R} = \frac{\delta I_r}{I_r} + \frac{\delta R_{\text{refe}}}{R_{\text{refe}}} - \frac{\delta I_{1db}}{I_{1db}} \quad (452)$$

$$\frac{\delta I}{I}(\lambda) = \frac{\delta P_{\text{source}}}{P_{\text{source}}}(\lambda) + \frac{\delta r_{\text{détecteur}}}{r_{\text{détecteur}}}(\lambda) \quad (453)$$

En effet, $I(\lambda) = A'(\lambda) \cdot P_{\text{source}}(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot r_{\text{détecteur}}(\lambda)$

$A'(\lambda)$ est la réponse de l'ensemble optique supposé invariante entre la mesure de I_{ldb} et celle de I_r .

$P_{\text{source}}(\lambda)$ est la densité spectrale de puissance de la source de spectrométrie.

$r_{\text{détecteur}}(\lambda)$ est la réponse du détecteur et de l'électronique de mesure.

Par majoration de (452), il vient donc :

$$\left| \frac{\Delta R}{R}(\lambda) = 2 \left(\frac{\Delta P_{\text{source}}}{P_{\text{source}}}(\lambda) + \frac{\Delta r_{\text{détecteur}}}{r_{\text{détecteur}}}(\lambda) \right) + \frac{\Delta R_{\text{refe}}}{R_{\text{refe}}}(\lambda) \right| \quad (454)$$

Le terme $\left(\frac{\Delta P_{\text{source}}}{P_{\text{source}}} + \frac{\Delta r_{\text{détecteur}}}{r_{\text{détecteur}}} \right)$ comprend :

- . les variations rapides aléatoires de la puissance de la source,
- . le bruit du détecteur,
- . les dérives de la source et du détecteur entre les acquisitions de I_{ldb} et de I_r .

Calcul de $\Delta h/h$

Il s'agit d'évaluer l'erreur sur le calcul d'intégrale

$$h = \int F(\lambda).R(\lambda).A(\lambda) d\lambda,$$

en ne retenant que les termes contribuant à l'incertitude sur C. $F(\lambda)$ est la transmission du filtre et $A(\lambda)$ la fonction d'appareil de l'ensemble de prise d'image, toutes deux mesurées préalablement (IV.2.2).

Par différentiation, il vient :

$$\frac{\delta h}{h} = \frac{\delta(\int F(\lambda).R(\lambda).A(\lambda) d\lambda)}{\int F(\lambda).R(\lambda).A(\lambda) d\lambda} \quad (455)$$

Les variations rapides de R (rapides durant le temps d'acquisition : bruit sur le spectre) vont donner une intégrale nulle. Seules vont compter les dérives lentes $\Delta R/R$.

D'autre part, on peut considérer comme négligeable l'erreur sur le contraste due à l'incertitude de détermination de $A(\lambda)$ et $F(\lambda)$.

On a donc, après majoration de (455) :

$$\frac{\Delta h}{h} = \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_{\text{moyen}}$$

$\left(\frac{\Delta R}{R} \right)_{\text{moyen}}$ correspond à une valeur moyenne sur la bande spectrale du filtrage

D'après (454) :

$$\left(\frac{\Delta R}{R} \right)_{\text{moyen}} = 2 \left(\frac{\Delta P_{\text{source}}}{P_{\text{source}}} + \frac{\Delta r_{\text{détecteur}}}{r_{\text{détecteur}}} \right)_{\text{moyen}}$$

$\left(\frac{\Delta R_{\text{refe}}}{R_{\text{refe}}} \right)_{\text{moyen}}$, étant un terme statique (indépendant du temps), s'élimine lors du calcul du contraste.

Les dérives de la source et du détecteur entre les deux mesures sont estimées au maximum à :

$$\left(\frac{\Delta P_{\text{source}}}{P_{\text{source}}} + \frac{\Delta r_{\text{détecteur}}}{r_{\text{détecteur}}} \right)_{\text{moyen}} = 1\%$$

D'où :

$$\frac{\Delta h}{h} = 2\% \quad (456)$$

D'après (450), l'incertitude absolue sur le contraste théorique s'exprime donc :

$$\Delta C = 0,04 \cdot \frac{h_{\min}}{h_{\max}} \quad (457)$$

c) Ecart maximal entre contraste expérimental et contraste théorique

Nous déduisons par addition de (444) et (457) que l'écart absolu entre les valeurs expérimentale et théorique du contraste ($\Delta C = C_{\text{exp}} - C_{\text{th}}$) doit être tel que :

$$-0,08 \frac{N_{\min}}{N_{\max}} \leq \Delta C \leq +0,08 \frac{N_{\min}}{N_{\max}} \quad (458)$$

(on a bien sûr : $\frac{h_{\min}}{h_{\max}} \# \frac{N_{\min}}{N_{\max}}$)

D'après (440), l'inégalité (458) peut s'écrire :

$$-0,08(1-|C|) \leq \Delta C \leq +0,08(1-|C|) \quad (459)$$

5.2 INTERPRETATION ET CONCLUSION

5.2.1 Contraste

Il nous faut vérifier que l'écart entre théorie et expérience $|C_{exp} - C_{th}|$ pour l'ensemble des filtres et des échantillons est bien compris dans la fourchette prévue par la relation (459).

C'est bien le cas à quelques exceptions près :

Oxyde 1 et filtre rouge
Si-poly et filtre orange
Oxyde 2 et filtres 500 et 650
Nitrure et filtre 600.

Dans la plupart de ces cas, ΔC sort légèrement de la fourchette autorisée. Le seul accident important est constitué par le cas Oxyde 1-filtre rouge ($\Delta C = 0,13$ au lieu de 0,6). La cause en est très probablement une erreur sur l'un des spectres de l'échantillon.

A la vue de ces résultats, on peut raisonnablement penser que la fourchette prévue par le calcul d'erreur (formule 459) sera en général respectée. Celle-ci donne une erreur relative $\Delta C/C = 8\%$ pour $C = 0,5$, valeur de contraste qui peut en général être obtenue par filtrage optimal. Une telle incertitude relative est suffisante pour notre application (recherche du meilleur filtrage).

Cependant, sur l'ensemble des résultats obtenus, on observe que le contraste prévu par le calcul est systématiquement supérieur au contraste mesuré ($|C_{exp} - C_{th}| = 0,02$ en moyenne).

Vu le résultat du calcul d'incertitude, nous avons recherché la cause de cette erreur parmi des problèmes de linéarité de la chaîne d'acquisition ou de lumière parasite créant un fond continu sur les spectres.

Les recherches concernant le problème de lumière parasite ne sont pas concluantes, ce fond existant effectivement (il est dû à une réflexion parasite sur l'objectif [7]) mais ayant la même valeur relative sur l'image.

La courbe de linéarité du système d'acquisition d'images, par contre n'est pas parfaitement droite et cela suffirait à expliquer une erreur systématique de l'ordre, au maximum (contrastes forts) de 0,02.

5.2.2 Niveau maximum

Concernant la valeur moyenne de $\Delta\gamma/\gamma$, les variations d'un échantillon à l'autre ne sont pas toujours significatives car il y a eu parfois réglage de la lampe et nouvelle calibration (détermination de I_{\max}).

Globalement, on peut tout de même conclure à une bonne stabilité de la puissance de lampe c'est à dire du coefficient I_{\max} , ce qui permet de prévoir un niveau à $\pm 5\%$ près.

La dispersion est inférieure à 10% en général, parmi les filtres, ce qui est tout à fait satisfaisant.

Seul le filtre orange semble poser un problème, $\Delta\gamma/\gamma$ étant sensiblement inférieur à la moyenne. Il est possible que sa transmission soit très variable suivant l'angle d'incidence, et ce dernier n'est pas très bien contrôlé dans notre appareillage. D'autre part, des problèmes de dérives thermiques auxquelles les filtres interférentiels sont particulièrement sensibles ne peuvent pas être totalement exclus.

A part ce filtre, nous n'avons pas remarqué d'erreur systématique sur un filtre donné, ce qui prouve que les différentes réponses spectrales (filtres, microscope, source, capteur) sont correctement déterminées.

5.2.3 Conclusion

En résumé, nous avons vérifié que la prévision du contraste et de l'atténuation s'effectue avec une bonne précision, compte tenu de notre appareillage, et ceci sur un échantillonnage assez important de plaques et de filtrages.

On peut également remarquer dans les résultats des tableaux IV.4, l'amélioration de contraste souvent importante qui peut être obtenue grâce au filtre optimum, le cas le plus spectaculaire étant celui de l'échantillon de Nitrure ($C = 0$ en lumière blanche ; $C = 60\%$ avec le filtre 600).

CHAPITRE V

ADAPTATION DE LA METHODE A UN EQUIPEMENT INDUSTRIEL

Cette méthode d'optimisation de contraste est destinée à prendre place dans une machine d'inspection automatique de circuits intégrés.

On rappelle en premier lieu le principe de la méthode de détection de défauts utilisée en inspection (V.1).

On en dégage les points d'application potentiels de la méthode d'optimisation de contraste. Ceux-ci sont illustrés concrètement dans le cadre d'une technique d'inspection choisie comme exemple (V.2).

Enfin, l'appareillage optique (spectrophotomètre et dispositif d'éclairage) adapté à cette application est décrit (V.3).

1 PRINCIPES DE L'INSPECTION AUTOMATIQUE DE PLAQUETTES

Pour une puce donnée, l'inspection consiste à acquérir les images d'un certain nombre de champs de positions données sous des conditions d'imagerie spécifiées et à effectuer la comparaison de chacune de ces images à l'image modèle correspondante.

Cette comparaison a pour but la détection des différences entre les deux images pouvant être la manifestation de défauts physiques sur le circuit inspecté.

Ces opérations sont effectuées pour quelques puces sur une plaque et pour un certain nombre de plaques par lot de fabrication.

L'algorithme de comparaison (synoptique V.1) effectue la différence en niveau de gris des deux images après alignement spatial et adaptation de dynamique (compensation des écarts de niveaux de gris entre images acquise et modèle). L'image différence est binarisée, puis une analyse morphologique permet l'extraction des différences significatives entre les deux images initiales.

Dans ce cadre, la méthode d'optimisation de contraste peut s'appliquer en deux temps :

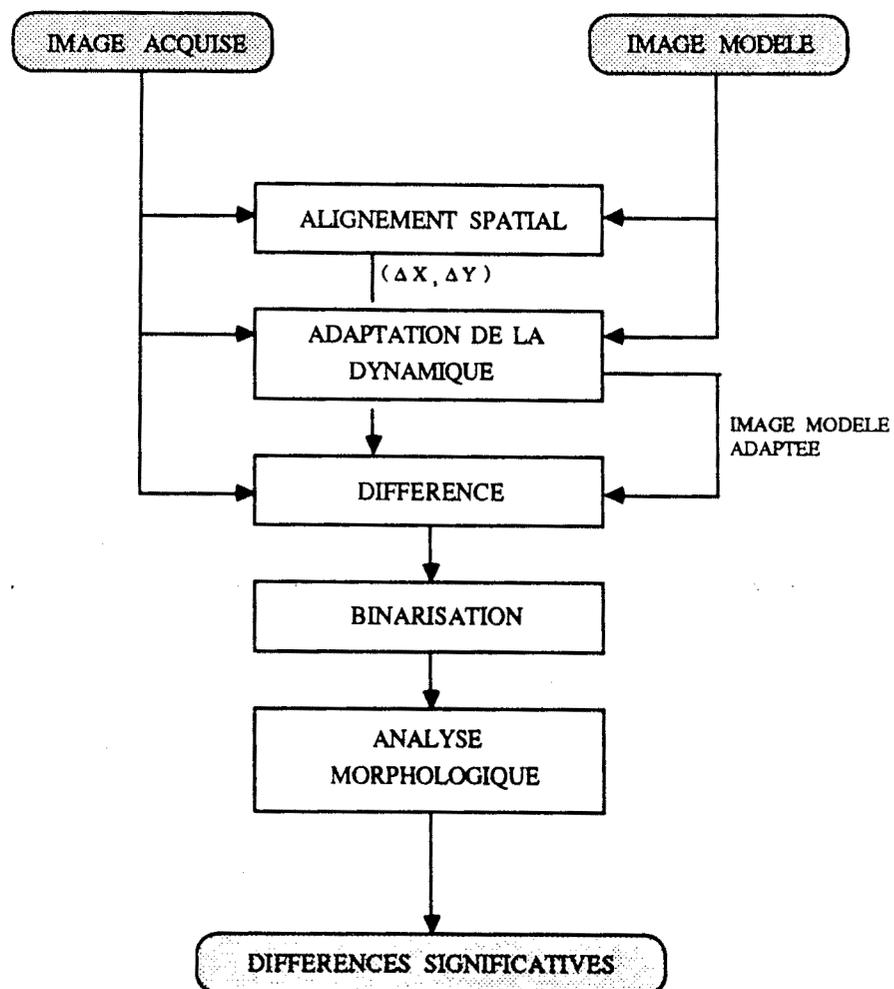
- a) Définition des conditions optimales d'éclairage
(Longueur d'onde de filtrage λ_0 et coefficient d'atténuation α de la puissance lumineuse) pour l'acquisition des images modèles
- b) Réactualisation éventuelle des conditions d'éclairage au cours de l'inspection.

Les niveaux de gris de l'image du champ à inspecter doivent être les plus proches possibles de ceux de l'image modèle. Or, ces niveaux sont susceptibles de varier au cours de l'inspection du fait :

- des variations spatiales des propriétés physiques (épaisseurs et indices) des couches déposées sur une même plaque ou d'une plaque à une autre dans un lot de fabrication (entraînant des variations du spectre de réflectivité d'un empilement donné),
- des variations dans le temps des caractéristiques de l'appareillage de prise d'images (intensité d'éclairage notamment).

Il est donc nécessaire de réactualiser périodiquement les conditions d'éclairage au cours de l'inspection pour assurer à l'image acquise un contraste et un niveau correspondant au mieux à ceux de l'image modèle.

Remarque : dans certains cas, on n'arrivera pas à retrouver exactement les niveaux de l'image modèle ; l'adaptation de dynamique interviendra alors pour corriger les écarts résiduels (nous avons vérifié que cette méthode donne des résultats satisfaisants jusqu'à une variation de contraste de 30% entre les deux images).



Synoptique V.1 : Procédure de comparaison des images acquise et modèle.

2 APPLICATIONS DE LA METHODE

2.1 LE CHAMP DE TEST DES CONDITIONS D'IMAGERIE

L'application de la méthode d'optimisation nécessite de pouvoir mesurer les spectres de réflectivité du motif et du fond et ceci en différents points de la plaque.

Cette mesure se fera sur des sites particuliers de la plaque (champs de test des conditions d'imagerie) constitués de deux zones distinctes (l'une correspond au motif et l'autre au fond en mononiveau), chacune de celles-ci devant être suffisamment grande pour couvrir la zone d'analyse du spectrophotomètre. La taille de cette zone ramenée au plan objet est liée au flux nécessaire pour le spectrophotomètre ainsi qu'au grossissement utilisé (typiquement, au plus fort grossissement, x100, et pour le spectrophotomètre, la source et la chaîne optique prévus, quelques dizaines de μm^2 suffisent).

Un champ de test par puce suffira étant donné la vitesse de variation spatiale des épaisseurs sur une plaque.

Si nécessaire, un champ de test spécifique sera ajouté à chaque puce lors du dessin de masque. Cependant, il devrait être possible, tout au moins en mononiveau, d'utiliser à cet effet les géométries standards de la plaque.

La figure V.1 montre un exemple de disposition des champs inspectés à l'intérieur d'une puce ainsi que l'allure d'un champ de contrôle des conditions d'imagerie.

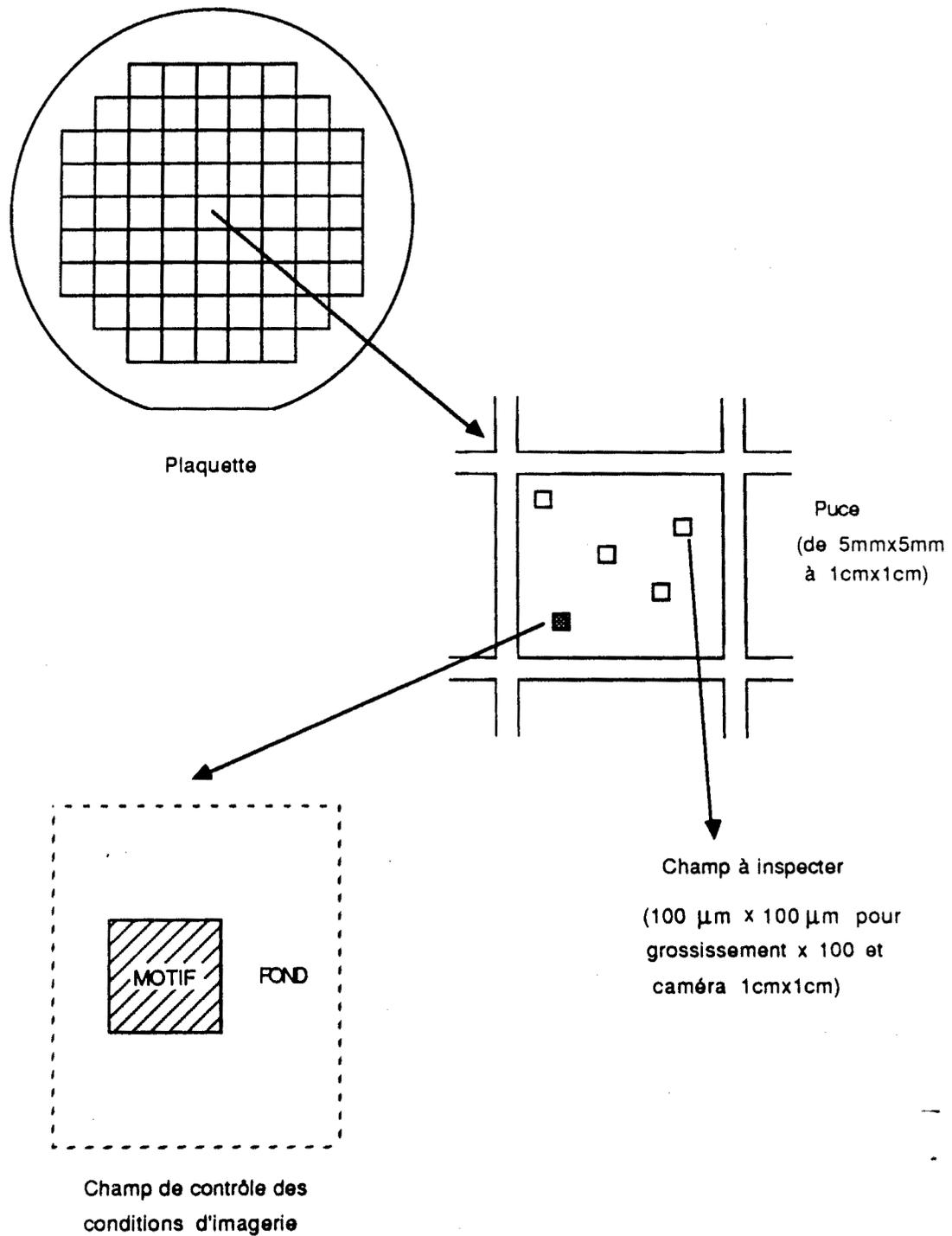


Figure V.1 : Exemple de disposition des champs d'imagerie à l'intérieur d'une puce.

2.2 EXEMPLES D'APPLICATIONS

Choisissons pour cette démonstration la technique d'inspection "en référence standard". Les images modèles sont obtenues par acquisition sur une puce de référence (sans défaut) au cours d'une phase "d'apprentissage" préliminaire à la phase d'inspection.

La détermination des conditions optimales d'éclairage doit être préalable à l'acquisition des images modèles (V.2.2.1).

Quant à la réactualisation éventuelle des conditions d'éclairage, elle s'effectuera au cours de la phase d'inspection (V.2.2.2).

2.2.1 Obtention des images modèles

La phase d'obtention des images modèles (organigramme V.1) se décompose en deux étapes successives.

1ère étape : Détermination des conditions d'éclairage optimales.

Cette détermination s'effectue à partir du champ de test imagerie de la puce de référence.

Le calcul d'optimisation permet à partir des spectres de réflectivité acquis sur les zones de motif et de fond, de déterminer la longueur d'onde λ_0 et l'atténuation α de l'éclairage.

Le critère d'optimisation proposé est la maximisation du facteur de qualité $Q(\lambda_0)$ mais d'autres critères peuvent être utilisés. Toutefois, quel que soit le critère, il faudra choisir la longueur d'onde λ_0 de telle manière que $\alpha(\lambda_0)$ soit suffisamment inférieur à 1 pour permettre un ajustement ultérieur de l'intensité d'éclairage (par exemple $\alpha \leq 0.8$).

Un contrôle des conditions d'éclairage (λ_0, α) déterminées ci-dessus est réalisé par acquisition de l'image du champ de test, détermination du contraste et du niveau maximum de cette image et comparaison aux valeurs prévues par le calcul d'optimisation (la mesure des niveaux de gris de l'image est effectuée à partir de l'histogramme).

L'atténuation α peut éventuellement être corrigée pour faire correspondre au mieux le niveau maximum de l'image acquise avec celui calculé théoriquement (correction de la dérive de puissance de la source par rapport à la valeur de I_{\max} utilisée).

2ème étape : Acquisition des images modèles de l'ensemble des champs à inspecter

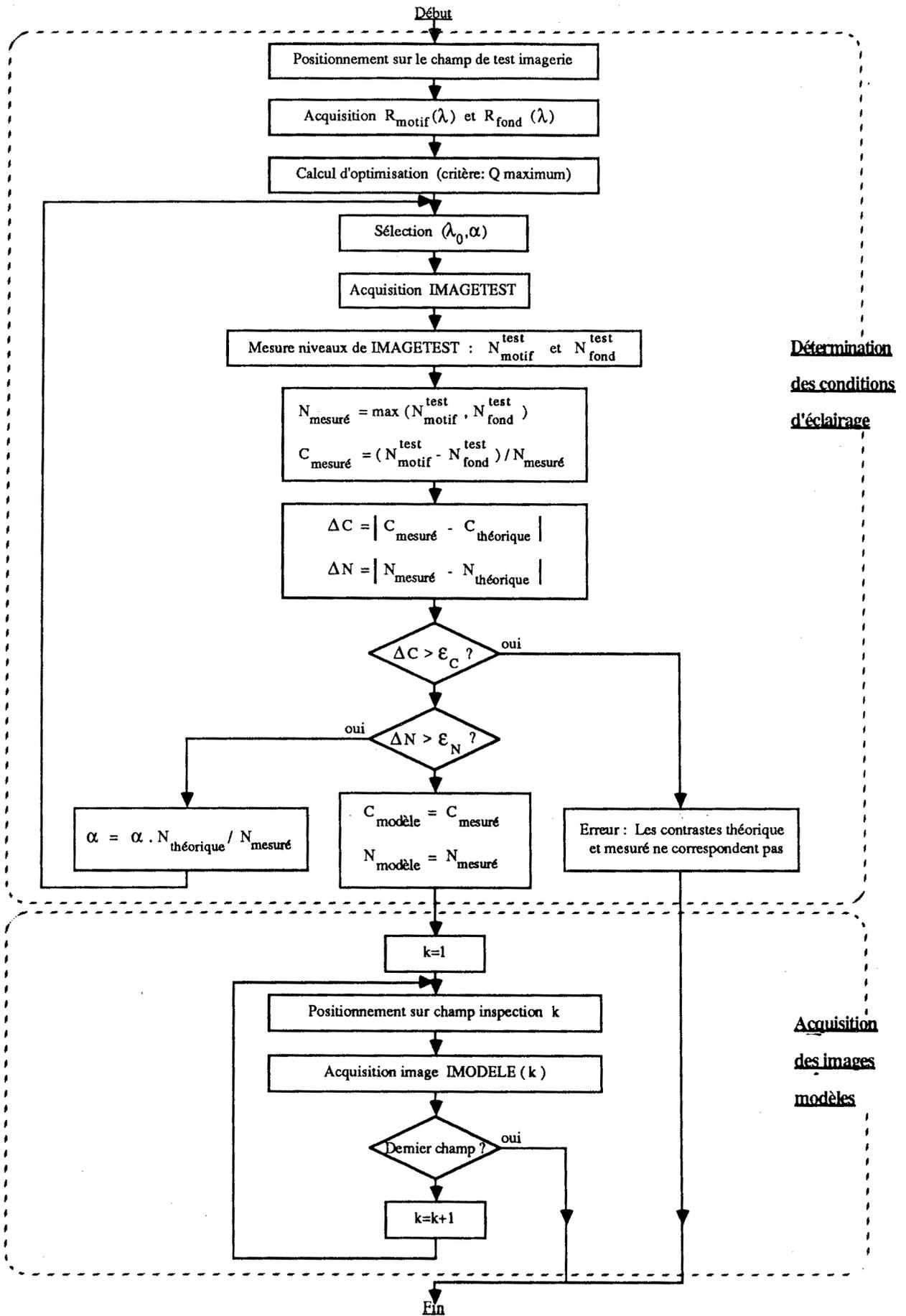
Ces images sont toutes acquises sous les conditions d'éclairage (λ_0, α) déterminées lors de la 1ère étape.

Les résultats obtenus sont stockés dans un fichier pour utilisation lors de la phase d'inspection :

(λ_0, α) : conditions d'éclairage optimales sous lesquelles ont été acquises les images modèles.

$N_{\text{modèle}}$ et $C_{\text{modèle}}$: niveau et contraste des images modèles (mesurés sur l'image du champ test aux conditions d'éclairage optimales).

IMODELE (k) pour $k = 1, n$: images modèles des n champs à inspecter.



Organigramme V.1 : Obtention des images modèles à partir de la puce de référence

2.2.2 Inspection d'une puce

L'inspection d'une puce (organigramme V.2) s'effectue en deux étapes.

1ère étape : Contrôle et réactualisation éventuelle des conditions d'éclairage.

Le contrôle et le cas échéant la réactualisation des conditions d'éclairage sont effectués au début de l'inspection de chaque puce sur le champ de test imagerie.

Le contrôle consiste à acquérir sous les conditions d'éclairage "courantes" (λ_0 et α déterminés lors de la phase d'apprentissage et éventuellement réactualisés lors de l'inspection des puces précédentes) une image du champ de test.

Si cette image présente un contraste et un niveau trop éloignés de ceux des images modèles ($C_{\text{modèle}}$ et $N_{\text{modèle}}$ déterminés lors de l'apprentissage), la réactualisation est déclenchée.

Celle-ci a évidemment pour but de déterminer λ_0 et α tels que le contraste et le niveau de l'image acquise correspondent au mieux à $C_{\text{modèle}}$ et $N_{\text{modèle}}$.

Les seuils ε_c et ε_N seront nécessairement inférieurs aux valeurs limites donnant un fonctionnement satisfaisant de l'adaptation de dynamique (étape de comparaison d'images). Cependant, suivant les résultats d'une expérimentation systématique sur de nombreux échantillons, ces seuils pourront être beaucoup plus faibles.

Le test de l'indicateur T (organigramme V.2) a pour but d'empêcher un bouclage en réactualisation de spectre dans le cas d'une puce inspectée pour laquelle il est impossible d'obtenir un contraste motif-fond approchant $C_{\text{modèle}}$ à mieux que ε_c .

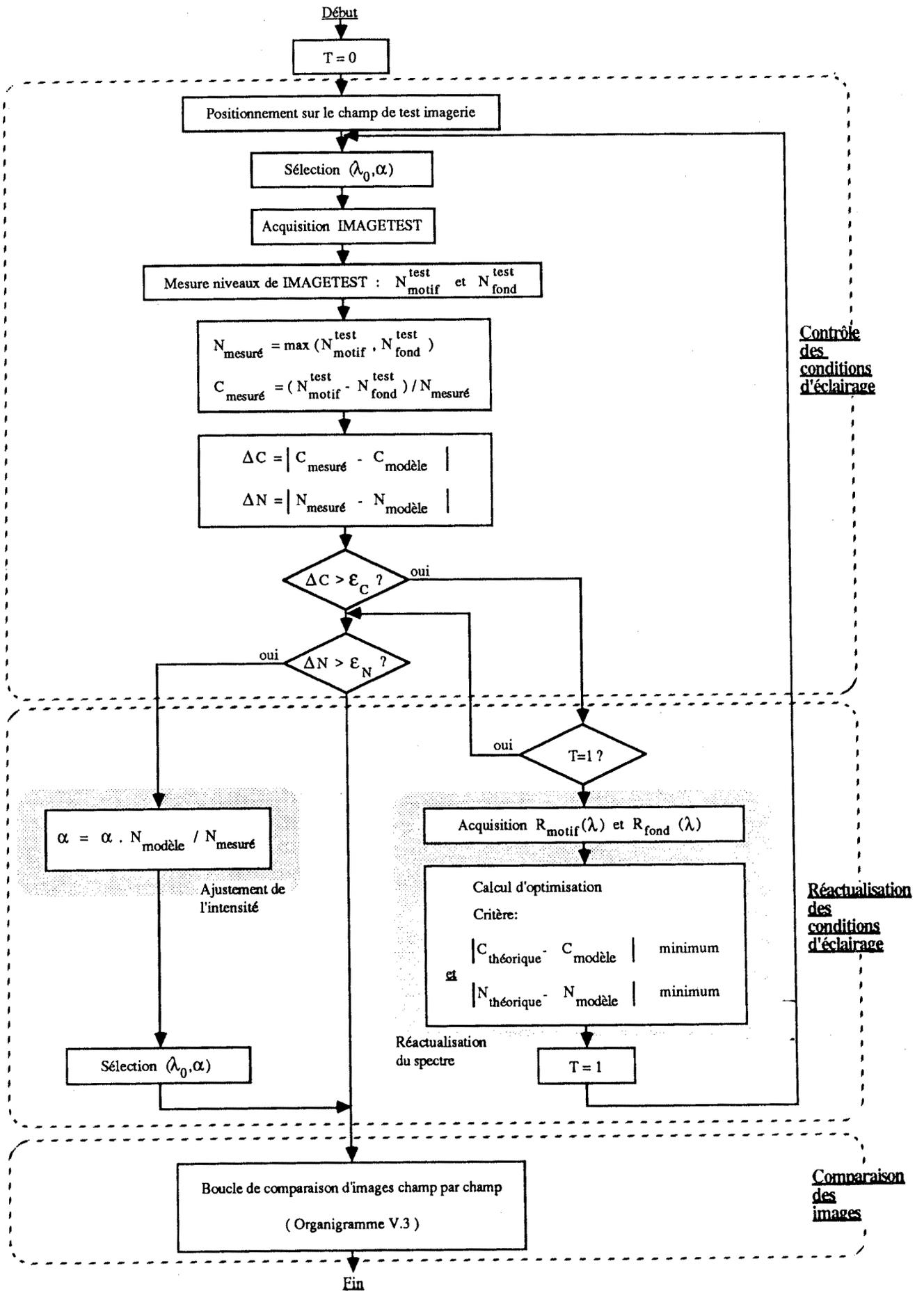
2ème étape : Comparaison des images (organigramme V.3).

L'inspection se poursuit par l'acquisition de l'image de chaque champ à inspecter et sa comparaison (cf: synoptique V.1) à l'image modèle correspondante obtenue lors de l'apprentissage.

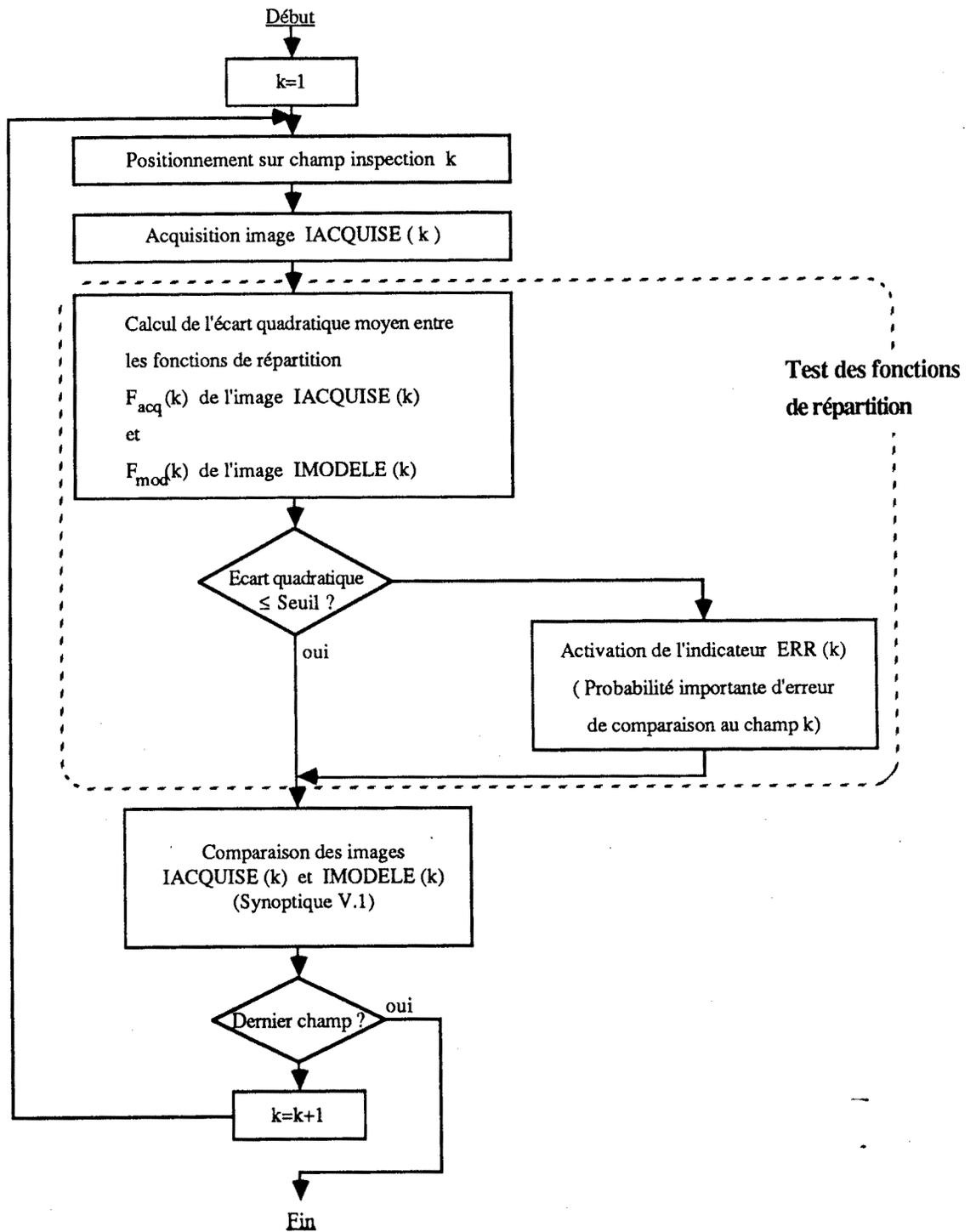
Les conditions d'éclairage ne sont plus modifiées au cours de cette étape, toutefois, pour chacun des champs k , un test de l'écart quadratique moyen entre les fonctions de répartition (primitive de l'histogramme) des images acquise et modèle est effectué.

Un écart de contraste ou de niveau entre les deux images peut ainsi être détecté.

Remarque : L'opération de contrôle et de réactualisation des conditions d'éclairage ne peut intervenir plus d'une fois par puce si l'on veut respecter la contrainte de temps de 100 à 300 ms en moyenne pour l'inspection d'un champ. De plus, cette opération doit s'effectuer le plus rapidement possible.



Organigramme V.2 : Inspection d'une puce



Organigramme V.3 : Boucle de comparaison d'images champ par champ

3 ADAPTATION DE L'APPAREILLAGE

La mise en œuvre de la méthode dans une machine d'inspection automatique nécessite notamment une adaptation de l'appareillage optique à savoir du spectrophotomètre (V.3.1) et du dispositif d'éclairage (V.3.2).

Les principaux objectifs de cette adaptation sont les suivants :

- a - une rapidité accrue en particulier pour l'acquisition de spectre
- b - la mise en œuvre d'un filtrage à longueur d'onde continûment variable permettant un ajustement fin du contraste
- c - un réglage de l'atténuation d'éclairage à variation continue permettant d'obtenir un niveau d'image précis.

Le logiciel de détermination du filtrage doit être adapté aux nouvelles caractéristiques du dispositif d'éclairage (V.3.3).

3.1 SPECTROPHOTOMETRE

L'analyse spectrale est réalisée par un spectrophotomètre de type multicanal disposé en sortie de microscope (cf. III.2.1).

Le capteur de spectre est une caméra CCD associé à un système d'acquisition d'image.

Les colonnes du capteur sont disposées parallèlement aux "raies" du spectre. Ainsi, chaque colonne de l'image correspond à une longueur d'onde λ donnée et le spectre $I(\lambda)$ est obtenu dans la direction des lignes de l'image. Pour augmenter le rapport signal/bruit (faible sensibilité du capteur CCD), il suffit d'effectuer une moyenne des valeurs de niveau sur un nombre plus ou moins grand de lignes.

. Ce système est rapide :

un spectre $I(\lambda)$ peut être obtenu en 20 ms (temps d'acquisition d'une trame image) plus le temps nécessaire au calcul de moyennage, soit 30 ms pour une sommation de 30 lignes.

. L'échantillonnage du spectre est amplement suffisant pour notre application :

512 points de mesure sur l'ensemble de la bande visible pour un capteur CCD standard.

. L'utilisation d'une caméra a permis de mettre à profit pour la mesure de spectre le système d'acquisition d'image prévu en tout état de cause, et, ainsi, d'économiser l'étude de l'interfaçage à l'informatique d'un capteur spécifique (barette de photodétecteurs).

. La disposition du spectrophotomètre en sortie présente un intérêt important :

à la voie de mesure près (spectrophotomètre ou caméra), les voies optiques spectre et image ont des caractéristiques spectrales identiques.

Dans ces conditions et après mesure des réponses spectrales des deux voies de mesure (réponses peu susceptibles de varier dans le temps), l'acquisition de ligne de base devient inutile.

3.2 DISPOSITIF D'ECLAIRAGE

Ce dispositif est constitué par une source (lampe à arc au Xénon), un atténuateur et un filtre spectral.

L'atténuateur est de type dégradé et permet de faire varier l'intensité lumineuse de manière continue.

Le filtrage en longueur d'onde, est de type passe-bande. La longueur d'onde centrale λ_0 varie continûment d'un bout à l'autre du spectre visible. La largeur de bande $\Delta\lambda$ de l'éclairage produit par ce dispositif peut éventuellement être modulée mais, pour la simplicité du système, ce paramètre sera fixé probablement à une valeur de 30 à 40 nm, offrant un bon compromis entre la puissance lumineuse et la résolution spectrale (pouvoir d'amélioration du contraste par rapport à la lumière blanche).

Le filtre peut être totalement retiré du trajet optique, permettant ainsi l'éclairage en lumière blanche (utilisation du spectrophotomètre notamment).

L'atténuateur et le filtre spectral sont tous deux motorisés et commandés par l'informatique.

Une fibre optique véhicule le flux lumineux issu de ce dispositif vers l'illuminateur de microscope (de type Köhler). Les avantages de la liaison par fibre ont été décrits au IV.2.1.1.

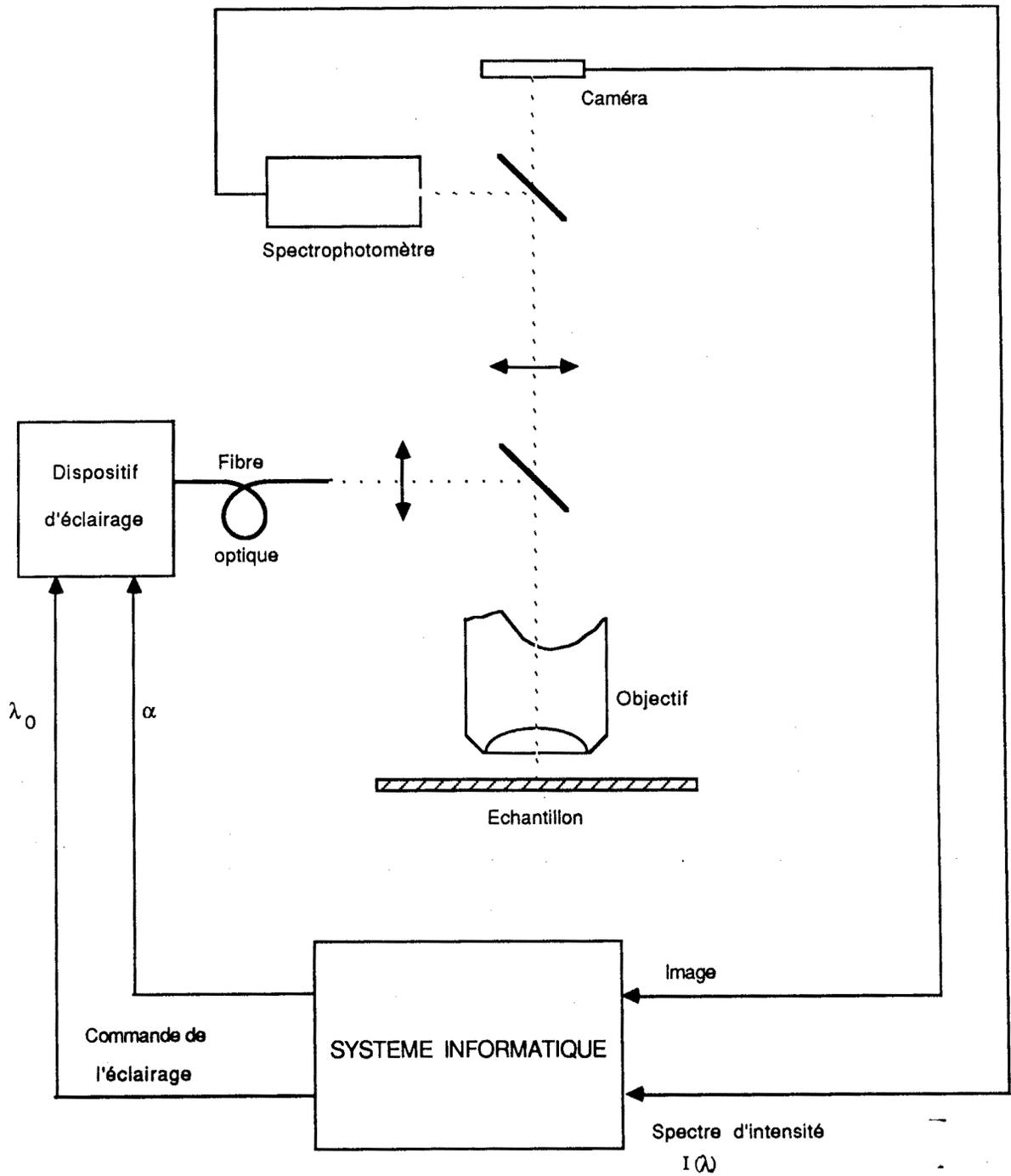


Figure V.2 : Machine d'inspection
Schéma de l'appareillage de prise d'images.

3.3 LOGICIEL DE DETERMINATION DU FILTRAGE

Le module logiciel calculant le contraste théorique (plus précisément celui calculant le niveau non normalisé h_i correspondant à chaque spectre de réflectivité R_i) doit être adapté aux caractéristiques spectrales particulières du dispositif d'éclairage.

3.3.1 Caractéristiques du dispositif d'éclairage

La caractéristique spectrale $I_e(\lambda)$ (densité spectrale de puissance) de l'éclairage à la sortie de la fibre optique (sortie du dispositif d'éclairage) peut s'exprimer comme le produit de deux fonctions :

$$I_e(\lambda, \lambda_0) = E(\lambda) \cdot F(\lambda - \lambda_0) \quad (501)$$

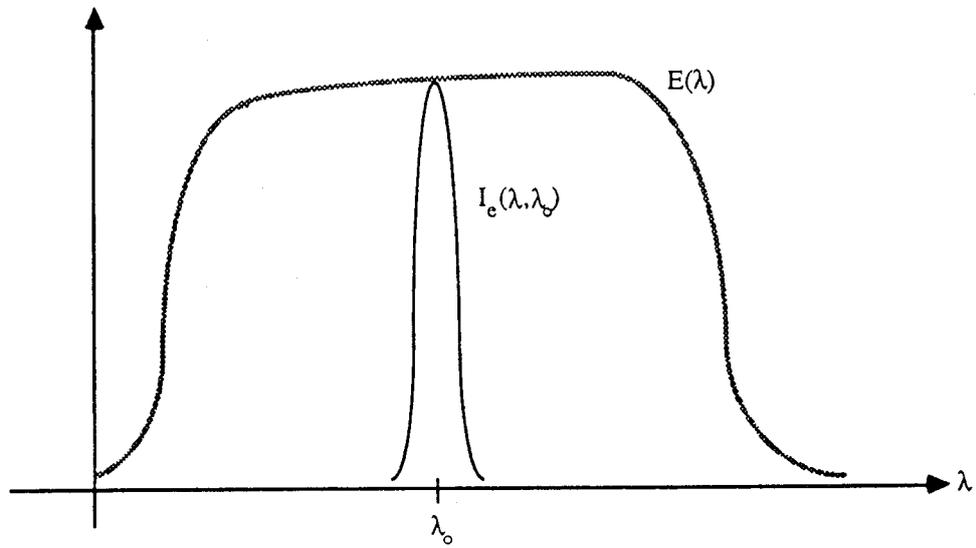
λ est la longueur d'onde "courante".

λ_0 est la longueur d'onde de réglage du dispositif (longueur d'onde centrale du spectre passe-bande).

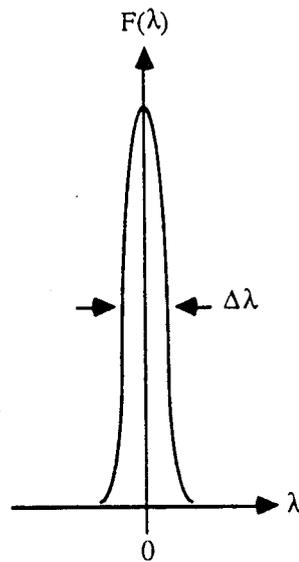
$E(\lambda)$ est la fonction "enveloppe" du spectre (indépendante de λ_0).

$F(\lambda - \lambda_0)$ est la fonction "passe-bande".

La fonction $E(\lambda)$ et la fonction $F(\lambda)$ à l'origine ($\lambda_0=0$) sont représentées figure V.3.



Fonction "enveloppe" E et spectre en sortie I_c



Fonction "passe-bande" F

Figure V.3 : Caractéristiques spectrales du dispositif d'éclairage.

3.3.2 Calcul

Le niveau image non normalisé pour une zone uniforme de l'objet de réflectivité $R_i(\lambda)$ va s'écrire :

$$h_i(\lambda_0) = \int R_i(\lambda) \cdot A(\lambda) \cdot I_e(\lambda, \lambda_0) d\lambda \quad (502)$$

$A(\lambda)$ Caractéristique spectrale de l'ensemble optique du microscope (illuminateur et système optique de formation d'image) et de la caméra de prise d'image.

D'après la formule (501) et en posant :

$$\rho_i(\lambda) = R_i(\lambda) A(\lambda) E(\lambda) \quad (503)$$

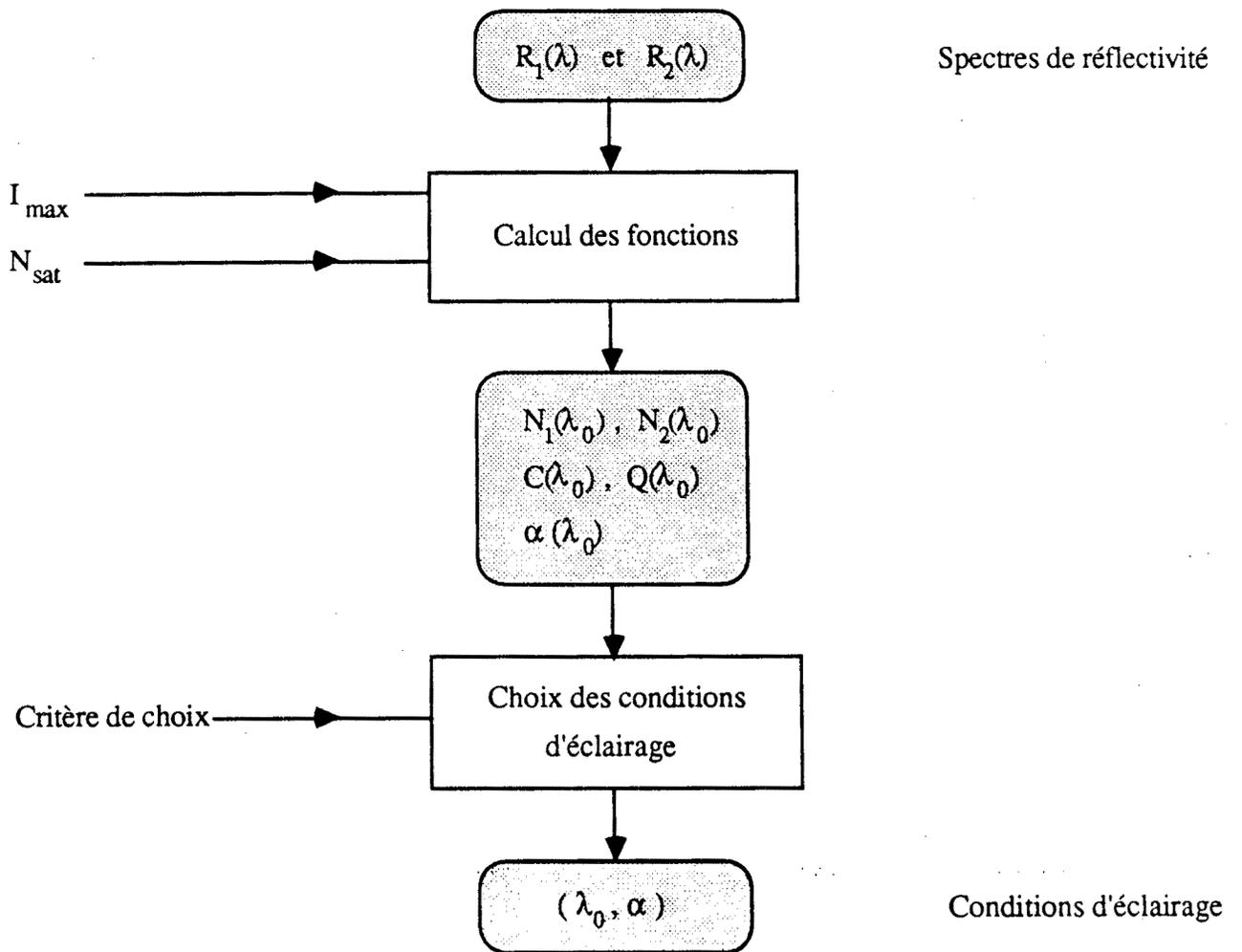
l'obtention du niveau non normalisé se ramène au calcul d'un produit de convolution :

$$h_i(\lambda_0) = \int \rho_i(\lambda) F(\lambda - \lambda_0) d\lambda \quad (504)$$

La méthode de normalisation des niveaux h_i (calcul des niveaux de gris) a déjà été exposée auparavant (IV.1.2).

Tous les résultats obtenus (contraste C , facteur de qualité Q , atténuation α , niveaux de gris N_1 et N_2) sont bien sûr des fonctions de la longueur d'onde de réglage λ_0 du dispositif d'éclairage.

L'organisation de la procédure de détermination des conditions d'éclairage (λ_0, α) est donnée par le synoptique V.2.



Synoptique V.2 : Optimisation des conditions d'éclairage.

CONCLUSION

Dans le travail présenté ici, nous avons proposé une méthode d'amélioration de contraste s'appliquant à des images de circuits intégrés microélectroniques. Cette méthode utilise les spectres de réflectivité des différentes zones composant l'objet pour déterminer le filtrage en longueur d'onde optimal. L'étude a été limitée au cas des circuits intégrés mononiveaux.

L'expérimentation réalisée a montré une bonne correspondance du contraste et des niveaux de gris prévus théoriquement à partir des spectres avec ceux mesurés sur des images acquises, validant ainsi le principe de la méthode d'optimisation.

Nous avons dégagé deux points d'application de la méthode en inspection automatique de circuits intégrés :

- Optimisation du contraste des images servant de modèles pour l'inspection.
- Obtention d'images de contraste et de niveau stables au cours de l'inspection, c'est à dire insensibles aux variations des caractéristiques de l'échantillon et de l'appareil.

Ces applications sont rendues possibles par :

- la souplesse de la méthode se résumant en deux points :
 - 1) Adaptation des niveaux d'image à une dynamique de capteur quelconque.
 - 2) Choix d'un spectre d'éclairage (filtrage) sur un critère quelconque portant sur le contraste (valeur maximale, minimale ou valeur précise).
- La souplesse du dispositif d'éclairage envisagé pour la machine d'inspection (réglage continu de l'intensité et de la longueur d'onde).
- La possibilité d'obtenir rapidement les spectres de réflectivité de l'objet au cours de la phase d'inspection.

L'extension de la méthode au cas des circuits intégrés multi-niveaux est possible.

Dans ce cas, les images comprennent plus de deux zones de spectres distincts. Le nombre maximum de zones n'excédant pas 6 pour une technologie CMOS, la complexité du problème reste raisonnable.

L'extension au multiniveau suppose :

- au niveau des plaquettes, de prévoir pour l'acquisition des spectres, des champs de test des conditions d'imagerie contenant, à chaque étape du processus de fabrication, autant de zones qu'il existe d'empilements différents
- au niveau du calcul d'optimisation, de définir un contraste C_{ij} entre deux zones i et j différentes de l'image (15 valeurs de contraste pour un échantillon à 6 zones), ainsi que de nouveaux critères d'optimisation, par exemple, on pourra opter pour le filtrage maximisant

$$(\min_{i,j} C_{ij}).$$

Une des limitations de la méthode réside dans la taille des géométries constituant l'échantillon.

En effet, lorsque les géométries possèdent des largeurs inférieures au micron, le phénomène de diffraction de la lumière fait que les zones uniformes tendent à disparaître au profit des transitions.

La méthode d'optimisation de contraste - nécessitant l'existence de zones uniformes dans l'image - devrait alors donner de moins bons résultats.

Une expérimentation serait utile pour connaître la taille limite à considérer, d'autant que la focalisation a une action très sensible sur le niveau de gris pour les petites géométries.

Il est à remarquer que l'appareillage mis en œuvre dans le cadre de la méthode est utilisable pour un contrôle essentiel en technologie des circuits intégrés: la mesure des épaisseurs de couches.

En effet, il permet l'acquisition des spectres de réflectivité des structures, qui sont des données de base pour la détermination d'épaisseur [27].

Enfin la méthode d'optimisation peut trouver des applications dans des domaines tout autres que l'inspection microélectronique ou même la microscopie. Il sera toutefois nécessaire que la "scène" imagée par voie optique possède des zones de propriétés spectrales différentes et qu'il soit possible d'effectuer un filtrage en longueur d'onde soit sur la lumière d'éclairage, soit sur la lumière provenant de la scène.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - " In-Process Inspection in the Semiconductor Industry "
V.L.S.I. Research Inc., San Jose, Californie, janvier 1983.
- 2 - A. E. KAYAALP, R. JAIN
" A Knowledge Based Automatic On-line Wafer (IC) Inspection System "
VISION '85 - Conference Proceedings, 25-28 mars 1985, Detroit, Michigan
Editions North Holland, Amsterdam.
- 3 - " Practical Integrated Circuit Fabrication "
Integrated Circuit Engineering Corporation, Scottsdale, Arizona, 1984.
- 4 - D. BIRCHON
" Optical Microscope Technique "
G. Newnes Ltd, London, 1961.
- 5 - G. BRUHAT
" Optique ", 4ème édition
Masson, Paris, 1954.
- 6 - Z. KNITTL
" Optics of Thin Films "
Wiley, London, 1976.
- 7 - M. FRANCON
" Progress in Microscopy "
Pergamon Press, Oxford, 1961.
- 8 - M. BORN, E. WOLF
" Principles of Optics ", 6th Edition
Pergamon Press, Oxford, 1980.
- 9 - P. BOUSQUET
" Spectroscopie Instrumentale "
Dunod, Paris, 1969.
- 10 - H.R. PHILLIP, E.A. TAFT
" Optical Constants of Silicon in the Region 1 to 10 eV "
Physical Review vol 120, n°1, pp 37-38 (Octobre 1960).
- 11 - E. D. PALIK (Ed.)
" Handbook of Optical Constants of Solids "
Academic Press, New York, 1985.
- 12 - E. A. TAFT
" The Optical Constants of Silicon and Dry Oxygen Oxides of Silicon at 5461 Å "
J. Electrochem. Soc.: Solid-State Science and Technology vol 125, n° 6, pp 968-971
(Juin 1978).
- 13 - M. J. RAND
" Spectrophotometric Thickness Measurement for Very Thin SiO₂ Films on Si "
Journal of Applied Physics vol 41, n° 2, pp 787-790 (Février 1970).

- 14 - G. LUBBERTS, B.C. BURKEY
" Optical and Electrical Properties of Heavily Phosphorus-Doped Epitaxial Silicon Layers "
Journal of Applied Physics vol 55, n° 3, pp 760-763 (Février 1984).
- 15 - A.J. WARNECKE, P.J. LOPRESTI
" Refractive Index Dispersion in Semiconductor-related Thin Films "
IBM J. Res. Develop., mai 1973, pp 256-262.
- 16 - E. A. TAFT
" Index of Refraction of Steam Grown Oxides of Silicon "
J. Electrochem. Soc. : Accelerated Brief Communication, Avril 1980, pp 993-994.
- 17 - H. R. PHILLIP
" Optical Properties of Silicon Nitride "
J. Electrochem. Soc.: Solid State Science and Technology vol 120, n° 2, pp 295-300
(Février 1973).
- 18 - M. P. ALBERT, J. F. COMBS
" Thickness Measurement of Epitaxial Films by the Infrared Interference Method "
J. Electrochem. Soc. vol 109, n° 8, pp 709-713 (Aout 1962).
- 19 - C. M. HORWITZ
" Refractive Index Determination using Reflectance Extrema "
Applied Optics vol 17, n° 11, pp 1771-1775 (Juin 1978).
- 20 - J. MOUCHART, G. LAGIER, B. POINTU
" Détermination des constantes optiques n et k de matériaux faiblement absorbants "
Applied Optics vol 24, n° 12, pp 1808-1814 (Juin 1985).
- 21 - F. H. DILL, W. P. HORNBERGER, P. S. HAUGE, J. M. SHAW
" Characterisation of Positive Photoresist "
IEEE Trans. Electron Dev., vol ED-22, n° 7, pp 445-452 (Juillet 1975).
- 22 - G. HARBEKE, L. KRAUSBAUER, E. F. STEIGMEIER, A. E. WIDMER
H. F. KAPPERT, G. NEUGEBAUER
" LPCVD Polycrystalline Silicon: Growth and Physical Properties of In-Situ Phosphorus
Doped and Undoped Films "
RCA Review vol 44, pp 287-312 (Juin 1983).
- 23 - " American Institute of Physics Handbook ", 3d Edition
Mc Graw-Hill Book Company, New York.
- 24 - A. DAUDE, M. PRIOL, Mme S. ROBIN, S. ROBIN
" Propriétés optiques dans l'ultraviolet lointain de couches d'aluminium et de magnésium
évaporées et étudiées en ultravide "
Proceedings of the Second Colloquium on Thin Films, 1967, pp 287-293.
- 25 - H. DETERMANN, F. LEPUSCH
" Le microscope et son utilisation "
Documentation Leitz
- 26 - Fairchild Charge Coupled Device (CCD) Catalog - 1982-1983

- 27 - A. K. SMITH, E. F. WANG
" The application of contour maps and statistical control charts in monitoring dielectric processes "
SPIE vol 775 Integrated Circuit Metrology, Inspection and Process Control (1987), pp 8-17
- 28 - G. GRAND, M. DARBOUX, F. MOISAN
" Optical optimization of image contrast using real-time spectrometry;
application to in-process integrated circuits inspection "
SPIE Proceedings, Hamburg, sept. 1988 (à paraître).
- 29 - K. R. CASTLEMAN
" Spatial and photometric resolution and calibration requirements for cell image analysis instruments "
Applied Optics vol 26, n° 16, pp 3338-3342 (Aout 1987).
- 30 - H. PILLER
" Microscope Photometry "
Springer-Verlag, Berlin, 1977.
- 31 - W. BOGUTH, H. PILLER
" The influence of the aperture of illumination on the accuracy of microscope-photometric measurements of internal transmittance "
Journal of Microscopy vol 149, pp 117-125 (Février 1988).
- 32 - A. G. REULE
" Errors in Spectrophotometry and Calibration Procedures to Avoid Them "
J. Res. Natl. Bur. Stand., Section A, vol 8, pp 609-624 (Juillet-Aout 1976).

ANNEXE 1

CARACTERISTIQUE D'INCIDENCE DE L'ECLAIRAGE
DU MICROSCOPE.

APPROCHE THEORIQUE.

1 ECLAIRAGE DE KOHLER - PRINCIPE

L'éclairage de Köhler est réalisé à l'aide du montage optique schématisé figure A.1.

Une image S' de la source S (filament, arc, sortie d'une fibre optique...) est formée par la lentille L dans le plan du diaphragme d'ouverture ϕ_0 qui est lui-même placé au foyer du condenseur C . ϕ_0 permet donc, en modifiant le diamètre de la source S' , d'agir sur l'ouverture numérique du faisceau lumineux émergeant du condenseur.

L'image par le condenseur du diaphragme de champ ϕ_c se forme dans le plan de l'échantillon, ainsi, ce diaphragme permet-il de limiter la surface du champ éclairé à celle du champ observé (champ de l'objectif de formation d'image).

2 CARACTERISTIQUE D'INCIDENCE

Par un raisonnement simple d'optique géométrique, on tente d'obtenir la forme de la fonction $f(\theta)$ liant l'intensité lumineuse incidente dans le plan de l'échantillon à l'angle d'incidence θ .

On suppose les points suivants réalisés :

- la source S est de brillance homogène et isotrope [8].
- l'image S' de la source emplit entièrement le diaphragme d'ouverture ϕ_0 même lorsque celui-ci est totalement ouvert
- la lentille L et le condenseur C sont des lentilles minces.

La source étant homogène, son image par L peut également être considérée comme homogène.

Par conséquent, la densité de flux d'énergie F_0 par unité de surface (et sous-entendu par unité de temps) est la même en tout point S' du plan du diaphragme d'ouverture.

Soit un élément de surface $d\sigma'$ du plan du diaphragme d'ouverture qui s'exprime en coordonnées polaires par rapport au point O :

$$d\sigma' = r dr d\phi \quad (1)$$

L'énergie traversant cet élément de surface s'exprime :

$$dF = F_0 d\sigma' \quad (2)$$

Elle est entièrement contenue dans l'angle solide Ω_1 .

De plus, la brillance de la source étant isotrope (c'est à dire la quantité d'énergie émise par un point de la source ne dépend pas de la direction), la répartition d'énergie dans l'angle solide Ω_1 est également isotrope.

Notons :

Ω_3 l'angle solide sous lequel est vue la pupille d'entrée du condenseur depuis l'élément de surface $d\sigma'$

Ω_2 l'angle solide intersection de Ω_1 et Ω_3 .

La quantité d'énergie ayant traversé $d\sigma'$ et arrivant, après passage à travers le condenseur dans le plan de l'objet s'écrit :

$$dE = \frac{\Omega_2}{\Omega_1} dF$$

$$dE = F_0 \frac{\Omega_2}{\Omega_1} r dr d\phi \quad (3)$$

Le rayon r s'exprime en fonction de l'angle θ par la relation :

$$r = f_c \operatorname{tg} \theta, \quad (4)$$

d'où :

$$dr = f_c \frac{d\theta}{\operatorname{Cos}^2 \theta}, \quad (5)$$

f_c étant la distance focale du condenseur.

L'équation (3) devient :

$$dE = F_0 f_c^2 \frac{\Omega_2}{\Omega_1} \frac{\operatorname{tg} \theta}{\operatorname{Cos}^2 \theta} d\theta d\phi \quad (6)$$

Si on intègre cette expression sur la surface du disque-source S' , on obtient l'énergie totale incidente dans le plan de l'objet :

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \iint_{S'} dE \\ \varepsilon &= 2\pi F_0 f_c^2 \int_0^{\theta_{\max}} \frac{\Omega_2}{\Omega_1} \frac{\operatorname{tg} \theta}{\operatorname{Cos}^2 \theta} d\theta \quad (7) \end{aligned}$$

θ_{\max} est l'angle d'incidence maximum sur l'objet, tel que :

$$\operatorname{tg}\theta_{\max} = R_0/f_c, \quad (8)$$

R_0 étant le rayon du disque S' , qui est bien sûr celui du diaphragme d'ouverture.

D'après (7), la caractéristique d'incidence de l'éclairage au niveau de l'objet est donné par :

$$\left. \begin{aligned} f(\theta) &= K(\theta) \frac{\operatorname{tg}\theta}{\operatorname{Cos}^2\theta} \quad \text{pour } 0 \leq \theta \leq \theta_{\max} \\ f(\theta) &= 0 \quad \text{pour } \theta > \theta_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\text{avec } K(\theta) = \frac{\Omega_2}{\Omega_1}$$

1^{er} cas : cas sans limitation due au condenseur.

$$K(\theta) = 1 \text{ pour toute valeur de } \theta.$$

Cela signifie que l'angle solide Ω_1 est toujours inclus dans l'angle solide Ω_3 .

La pupille d'entrée du condenseur présente donc une taille suffisante pour ne pas limiter le faisceau lumineux, quel que soit l'angle θ considéré.

2^{ème} cas : cas avec limitation par le condenseur.

$$K(\theta) < 1 \text{ pour certaines valeurs de } \theta.$$

Supposons $\Omega_1 < \Omega_3$

$K(\theta)$ est inférieur à l'unité lorsque Ω_1 sort partiellement ou totalement de Ω_3 . La fonction $K(\theta)$ commence à décroître à partir d'une valeur θ_1 de l'angle θ ; elle présente alors l'allure indiquée Figure A.2.

La caractéristique d'incidence $f(\theta)$ avec et sans limitation par la pupille de condenseur est schématisée Figure A.3.

CONCLUSION

Cette hypothèse de la limitation géométrique du faisceau par le condenseur mène à une approche qualitative acceptable de la caractéristique d'incidence mesurée sur un dispositif (cf : figure III.5b).

Le raisonnement n'a pas été mené jusqu'à l'obtention d'un résultat théorique quantitatif car il est difficile de connaître les valeurs des différents paramètres (taille des pupilles, diaphragmes, distances focales...) d'un illuminateur réel.

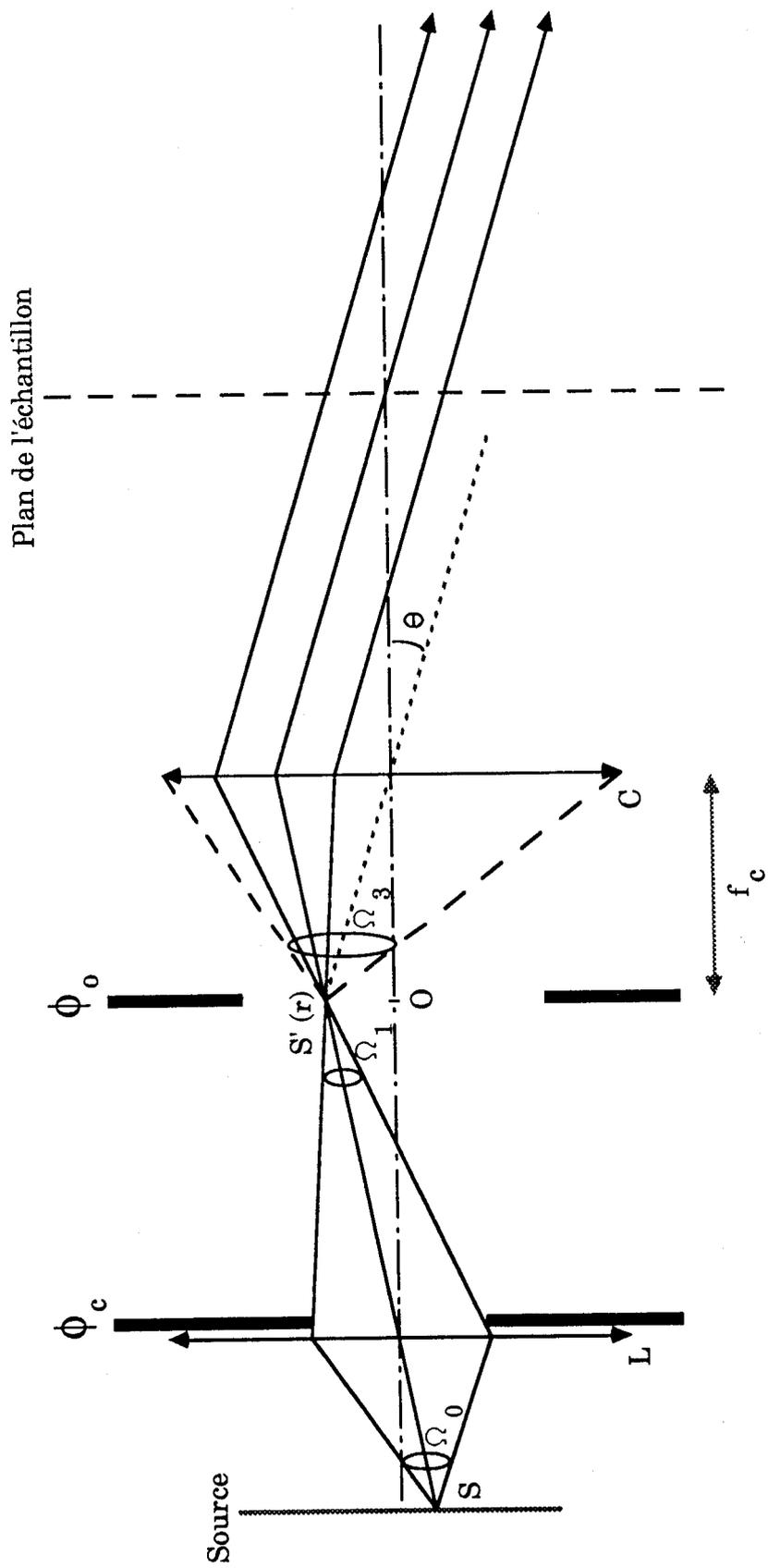


Figure A.1 : Eclairage de Köhler

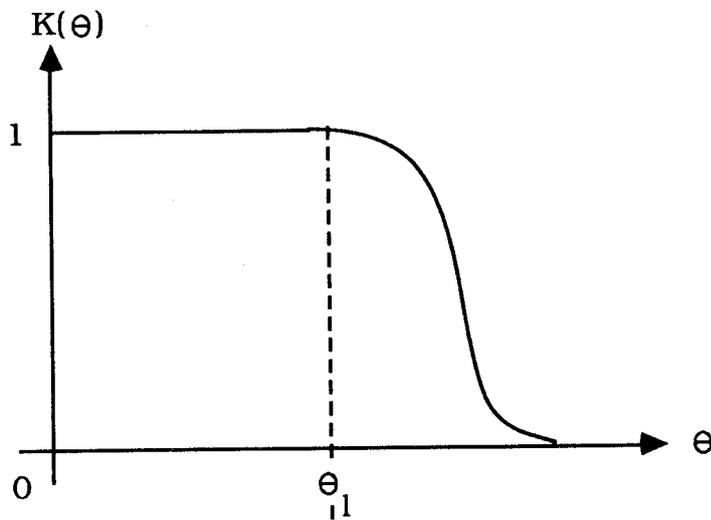


Figure A.2 : Allure du coefficient de limitation

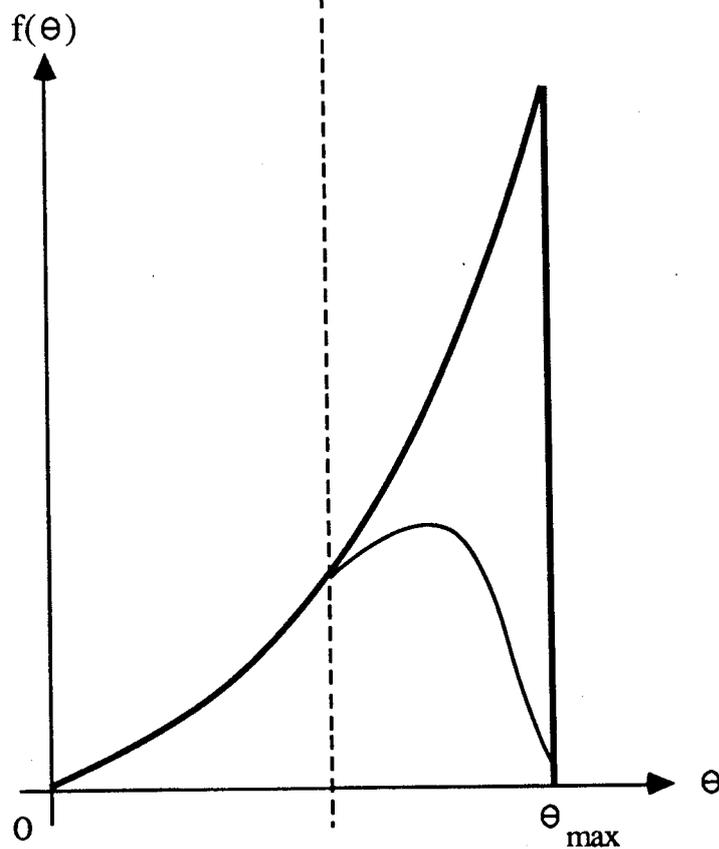


Figure A.3 : Caractéristique d'incidence avec(—) et sans(---) limitation

