



HAL
open science

Auto-focalisation par transformations orthogonales : automatisation d'un système de mesure de la longueur de fissure sur un faciès de rupture

Maher Charfi

► **To cite this version:**

Maher Charfi. Auto-focalisation par transformations orthogonales : automatisation d'un système de mesure de la longueur de fissure sur un faciès de rupture. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université Paul Verlaine - Metz, 1992. Français. NNT : 1992METZ031S . tel-01775993

HAL Id: tel-01775993

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01775993>

Submitted on 24 Apr 2018

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

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



AVERTISSEMENT

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

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

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

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

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

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

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

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

77765

THESE

Présentée à :

L'U.F.R. de Metz

Pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE METZ
en **ELECTRONIQUE**

par

Maher CHARFI

BIBLIOTHEQUE UNIVERSITAIRE -METZ	
N° inv.	19920725
Cote	S/M3 92/31
Loc	Magasin

Sujet de Thèse : Auto-focalisation par transformations orthogonales :
automatisation d'un système de mesure de la longueur de fissure sur un
faciès de rupture.

Soutenue publiquement le 4 mars 1992 devant la commission d'examen

MEMBRE DU JURY

Président M :

G. PLUVINAGE

Professeur à l'Université de Metz

Rapporteurs MM :

C. LAURENT

Professeur à l'IUT de Metz

J. LE BIHAN

Professeur à l'ENI de Brest

D. MEHDI

Maître de conférences à l'ENSPS-GRAII Strasbourg

Examineurs MM :

A. TOSSER-ROUSSEY

Professeur à l'ENI de Metz

E. YVROUD

Directeur de recherches CNRS-INPL, Nancy

Remerciements

Je témoigne à Monsieur le Professeur A. TOSSER-ROUSSEY de l'ENIM, Directeur du Laboratoire de Mécatronique Industrielle, toute ma gratitude pour les conseils nombreux et judicieux qu'il m'a donnés tout au long de ce travail et pour la confiance qu'il m'a accordée, me permettant ainsi de mener à bien ce travail et pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire.

J'adresse mes remerciements à G. PLUVINAGE Professeur à l'Université de Metz pour avoir accepté de présider ce jury.

Je tient à remercier Messieurs les Professeurs C. LAURENT de l'IUT de Metz, LE BIHAN de l'ENI de Brest et D. MEHDI Maître de conférences à l'ENSP de Strasbourg d'avoir bien voulu s'intéresser à ce travail et d'avoir accepté d'en être rapporteurs.

Je remercie Monsieur E. YVROUD Professeur à l'ENSEM de Nancy, qui ont accepté de siéger dans ce jury. J'en suis très honoré et j'exprime ici ma sincère gratitude.

Je tient à remercier également Monsieur J. GILGERT Docteur ès-Sciences à l'ENIM pour ses conseils, Mademoiselle N. DUPONT et Monsieur A. PEDRERO du service de reprographie.

Je remercie chaleureusement l'ensemble des enseignants de l'équipe ainsi que les chercheurs du Laboratoire pour l'ambiance agréable qu'ils ont su créer et pour le soutien amical qu'ils m'ont constamment témoigné.

Je terminerai en remerciant ma famille, mes proches et mes amis qui ont su me donner confiance dans les moments difficiles.

Sommaire

Introduction	5
<u>Premier chapitre</u>	
I - Formation de l'image	8
1 - Introduction	8
2 - Les différentes méthodes d'éclairage	8
3 - Effet de l'objectif	11
3.1 - Transformation géométrique	11
3.2 - Structure de l'image d'une source ponctuelle	14
3.3 - Formation de l'image d'un objet étendu compte tenu de la diffraction	15
3.4 - Fonction de transfert de l'objectif	16
4 - Effet des capteurs de la caméra	20
4.1 - Caméra vidicon	21
4.2 - Caméra CCD	21
4.3 - Comparaison caméra CCD - tube vidicon	22
5 - Le signal vidéo	23
6 - Le convertisseur analogique numérique	24
7 - Les techniques subpixel	24
8 - Conclusion	26

Deuxième chapitre

II - Les différentes méthodes de mise au point	28
1 - Introduction	28
2 - Revue bibliographique	28
2.1 - Méthode proposée par Gerd Häusler et Eva Körner	29
2.2 - Méthode proposée par Albert G. Choate	30
2.3 - Méthode proposée par S.A.Sugimoto et al.	31
2.4 - Méthode proposée par R.J.Pieper et al.	31
2.5 - Méthode proposée par Kazuyoshi et al.	32
2.6 - Un système de mise au point utilisé dans les appareils photographique	33
2.7 - Méthode proposée par R.B. Mitkin	36
2.8 - Conclusion	38
3 - Les transformées orthogonales	39
3.1 - La transformée de Fourier	40
_ Caractérisation de morphologies par transformée de Fourier	41
_ Critère d'auto-focalisation par transformée de Fourier	45
3.2 - La transformée discrète en cosinus	53
_ Caractérisation de morphologies par transformée discrète en cosinus	54
_ Critère d'auto-focalisation par transformée discrète en cosinus	57
3.3 - Comparaison de la transformée de Fourier avec la transformée discrète en cosinus	64
_ Algorithme de transformation de Fourier rapide	65

_ Algorithmes de transformation discrète rapide en cosinus	65
3.4 - Détermination de la bande passante	69
3.5 - Conclusion	70
4 - Conclusion	71

Troisième chapitre

III - Proposition de mesure en trois dimensions à partir d'auto-focus	73
1 - Introduction	73
2 - Principe	73
3 - Détermination des zones de focalisation des caméras équipées d'un système d'auto-focus	81
4 - Conclusion	88

Quatrième chapitre

IV - Automatisation d'un système de mesure de la longueur de fissure sur un faciès de rupture	91
1 - Introduction	91
2 - Eprouvette utilisée	93
3 - Description et fonctionnement du système d'inspection visuelle	96
4 - Résultats et précision des mesures	104
5- Conclusion	106
Conclusion générale	107
Bibliographie	108
Annexes	112

Annexe1 Méthode de CHEN (1977)	113
Annexe2 Méthode de VETTERLI et NUSSBAUMER (1984)	115
Annexe3 Méthode de LEE (1984)	120
Annexe4 Fonction de transfert optique	124
Annexe5 La technique du centre de gravité	126

I) Introduction

L'inspection par des systèmes de vision industrielle apportent deux avantages essentiels :

- Une meilleure qualité du produit,
- Une productivité accrue.

Ces avantages permettent aux entreprises équipées de vision industrielle d'avoir une compétitivité supérieure.

A différentes étapes des opérations de fabrication, des contrôles sont nécessaires afin d'assurer la qualité du produit. Ces tests, qui éliminent ou évitent les produits défectueux, permettent de diminuer les déchets et le recyclages, ainsi que d'alléger les coûts de fabrication. La qualité du produit est améliorée, la productivité augmentée (et les profits s'élèvent).

Une inspection efficace à 100%, aux cadences de fabrication actuelles, ne peut être assurée par des opérateurs humains. Même si ceux-ci inspectent la totalité des produits, la fatigue et la déconcentration les rendront généralement efficace à moins de 80%. Les systèmes mécaniques sont limités dans leur utilisation : ils tendent à être non flexibles (difficilement modifiables), encombrants, difficiles à mettre au point, et enclins à l'erreur. De plus, ils s'adaptent très mal aux concepts modernes du contrôle qualité et de l'automatisme tels que le contrôle statistique de procédé. Le système de vision industriel adapté à la production apportera 100% d'inspection efficace. Il permettra l'utilisation des derniers concepts en matière d'automatisation et de contrôle qualité.

Brièvement, l'inspection visuelle est une méthode utilisant un ordinateur qui analyse l'image obtenue par une caméra. Les résultats de cette analyse sont traités par le ordinateur et peuvent être utilisés afin, par exemple, de fournir des données à un ordinateur, ou d'agir sur un dispositif extérieur tel qu'un vérin d'éjection ou un robot.

Si les entreprises de grande taille peuvent se doter d'experts en vision industrielle, il en va tout autrement pour les PMI qui, bien qu'étant demandeuses de systèmes de contrôle sophistiqués, ne peuvent justifier d'une telle expertise interne.

Discipline difficile car elle fait appel à des connaissances complexes, de l'optique à l'informatique, en passant par le traitement d'image, son application n'est la plupart du temps qu'à la portée du constructeur lui même.

Dans le chapitre 1, les différentes étapes de la formation d'une image industrielle sont analysées. Nous exposons les différentes méthodes d'éclairage utilisées. Nous abordons aussi les techniques de mesure sous pixel qui améliorent la précision des mesures en utilisant un traitement supplémentaire de l'information.

Le chapitre 2 expose brièvement les techniques usuelles d'auto-focus. Ensuite nous présentons des nouvelles techniques utilisant les transformations orthogonales pour l'auto-focus et nous étudions leur aptitude à caractériser des morphologies différentes. Ce chapitre s'achève par la comparaison des deux transformations que nous avons proposées et par la présentation des algorithmes de calcul.

Le chapitre 3 présente une proposition de mesure en trois dimensions à partir d'auto-focus. Les différents paramètres agissant sur la précision des mesures sont abordés.

Dans le chapitre 4 un système de vision pour l'automatisation de la mesure de la longueur de fissure sur un faciès de rupture est proposé. Ce système utilise l'aptitude des transformations orthogonales étudiées à reconnaître une texture. Le dispositif matériel et logiciel est présenté ; les différentes étapes du traitement sont exposées.

PREMIER CHAPITRE

I) Formation de l'image

1 - Introduction :

Les caméras CCD (charge coupled device, DTC en français : dispositif à transfert de charge), sont constituées d'une matrice de cellules (256x256, 512x512, 1024x1024, etc.). Une micro-cellule photo-électrique (11x11µm par exemple) est sensible à la lumière visible (400 à 750 nm). Ces micro-éléments reçoivent l'intensité lumineuse des différentes parties de l'image de l'objet observé. Les cellules du capteur CCD génèrent des tensions électriques proportionnelles à l'intensité lumineuse reçue. Le signal analogique fourni par la caméra est numérisé en un certain nombre de niveaux de gris, 256 par exemple. Le schéma général d'un système de vision est le suivant.

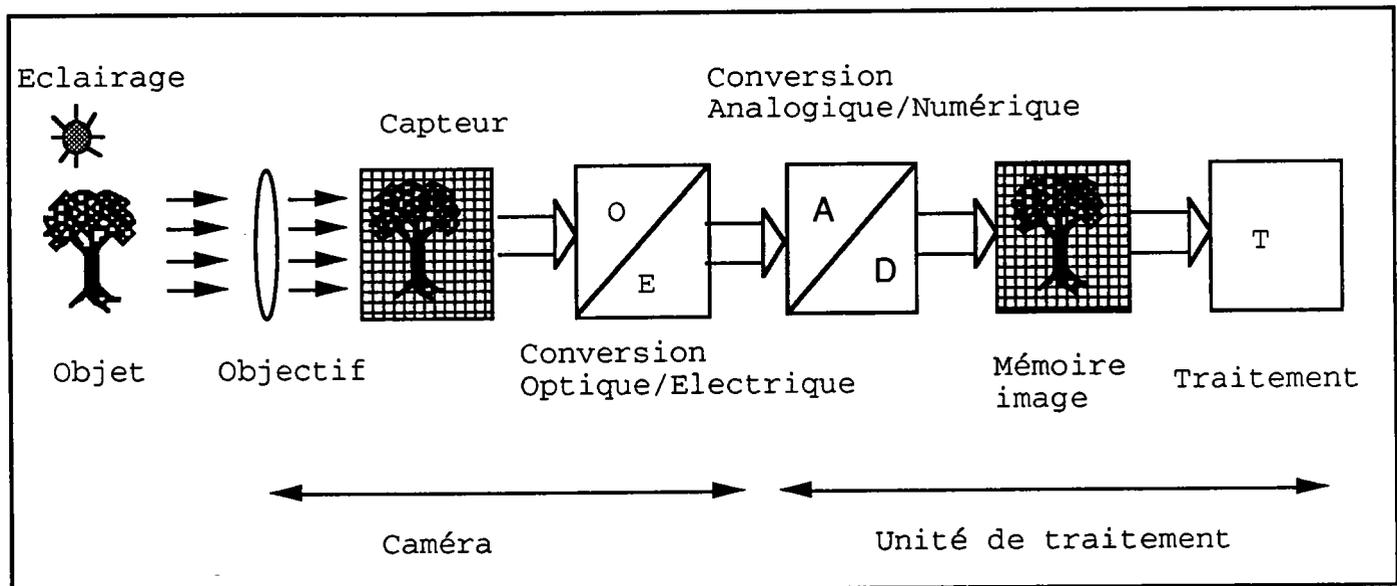


Figure I-1 : schéma général d'un système de vision.

Dans la suite l'influence des différents éléments d'un système de vision sur l'image sera examinée.

2 - Les différentes méthodes d'éclairage :

Les méthodes d'éclairage les plus utilisées sont les suivantes :

* Eclairage par transmission :

L'éclairage par transmission permet des contours plus nets donc une meilleure précision de mesure. Le champ de lumière émis doit être supérieur au diamètre de l'objet à mesurer. Bien sûr il faut que l'objet soit opaque pour avoir de bons résultats.

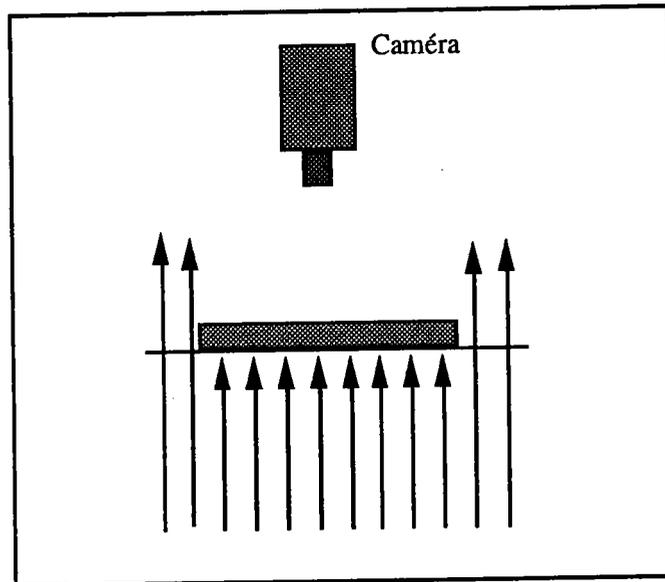


Figure I-2 : éclairage par transmission.

* Eclairage par réflexion diffuse :

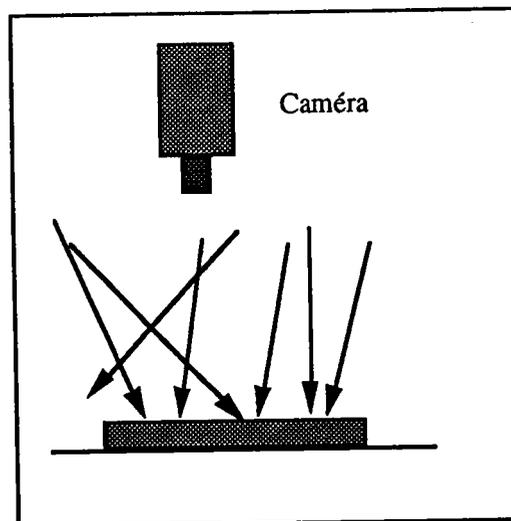


Figure I-3 : éclairage par réflexion diffuse .

Cette méthode d'éclairage permet d'avoir une vaste gamme de valeurs de gris ce qui est utile pour contrôler les éléments caractéristiques d'une surface.

* Eclairage stroboscopique :

L'éclairage stroboscopique produit une lumière très intense pendant un temps très court. Un aspect flou peut être causé par un mouvement rapide dans les applications à grande vitesse. Pour arrêter l'action et éliminer le flou produit par le mouvement, on utilise un éclairage stroboscopique.

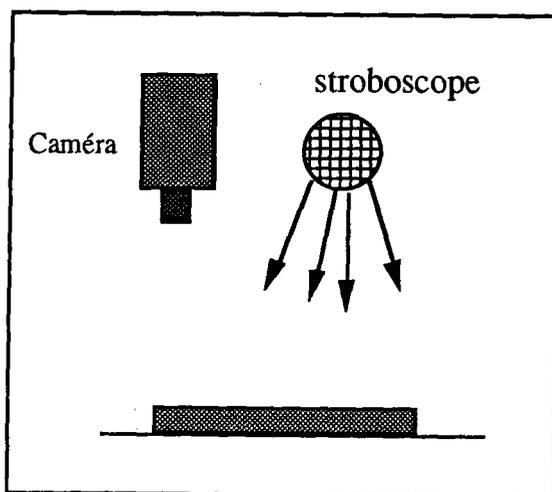


Figure I-4 : éclairage stroboscopique.

* Eclairage par un rideau laser :

Ce type d'éclairage permet de mettre en évidence la forme de la surface et les mesures de relief.

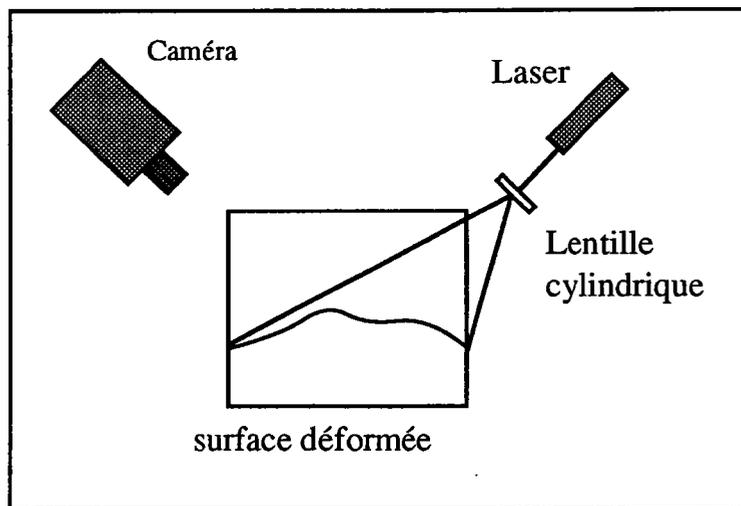


Figure I-5 : éclairage par un rideau laser.

3 - Effet de l'objectif :

Dans ce paragraphe nous étudions la formation de l'image et les caractéristiques d'un objectif [MÖl-88, TAT-75].

3.1 - Transformation géométrique :

La transformation géométrique objet-image est donnée par l'étude du trajet des rayons lumineux provenant de l'objet et se focalisant sur le plan focal image, sans tenir compte du phénomène de diffraction (approximation : optique géométrique).

En considérant un repère lié à l'objet et un autre lié au plan image, cette transformation est composée généralement d'une rotation, d'une translation, d'une perspective et d'un changement d'échelle des axes. L'image formée est appelée image géométrique.

Dans ce paragraphe, nous analysons les aberrations géométriques suivantes : aberrations d'astigmatisme, distortion, aberrations de sphéricité et défaut de mise au point, qui accompagne la formation géométrique de l'image. Chacun de ces phénomènes transforme un point en une tache [MON-89].

* Aberrations d'astigmatisme :

Les faisceaux obliques donnent fréquemment des images floues, surtout si les points visés sont écartés de l'axe, les images peuvent même être dédoublées. C'est ce défaut qui constitue l'aberration d'astigmatisme. L'association de verres d'indices différents permet de corriger le défaut d'astigmatisme.

*** Distortion :**

Elle est due à la variation du grandissement linéaire quand on s'écarte de l'axe. C'est ainsi que les côtés d'un quadrillage présentent des courbures ; les images sont altérées en forme de barillets quand le diaphragme est placé devant une lentille ou de coussinets si le diaphragme est placé derrière la lentille (Figure I-6).

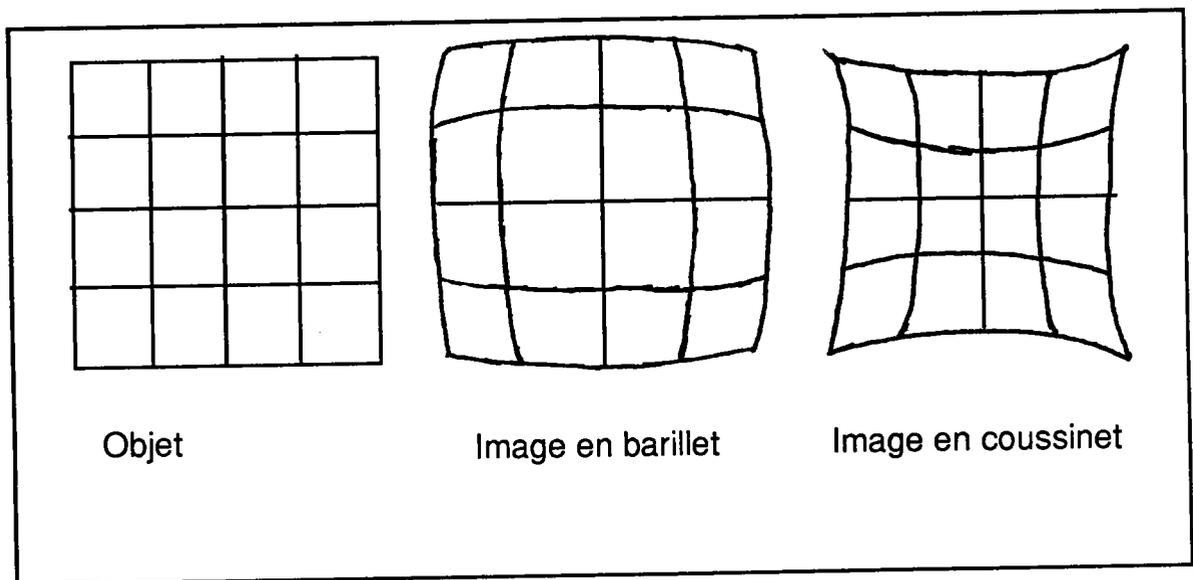


Figure I-6 : distortion.

On peut remédier aux défauts de distorsion en disposant un diaphragme entre deux systèmes symétriques : en provoquant ainsi deux distorsions de sens contraire dont les effets s'annulent. Un système ainsi corrigé est dit rectilinéaire.

*** Aberrations de sphéricité :**

Quand l'ouverture d'une lentille devient de plus en plus grande, on constate que les rayons marginaux se réfractent en passant par des points C, sur l'axe, de plus en plus

écartés du point B image, donnée par des rayons centraux, d'un point éloigné A, situé sur l'axe d'une lentille.

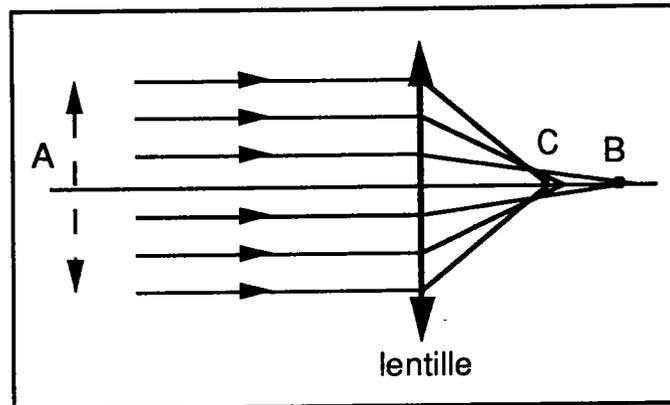


Figure I-7 : aberration de sphéricité.

Par ailleurs, ces rayons enveloppent une surface de révolution sur laquelle s'accumule la lumière, l'image d'un point est alors une tache. Ce genre d'aberration est corrigé par association de plusieurs lentilles.

* Défaut de mise au point :

Si on déplace légèrement le plan des cellules photosensibles du plan de l'image géométrique, ce qui correspond à un filtre passe bas appliqué sur l'image nette, l'image d'un point objet devient une petite tache circulaire (Figure I-8). Si la mise au point de la caméra est bien réglée ce phénomène peut être réduit pour obtenir une image nette.

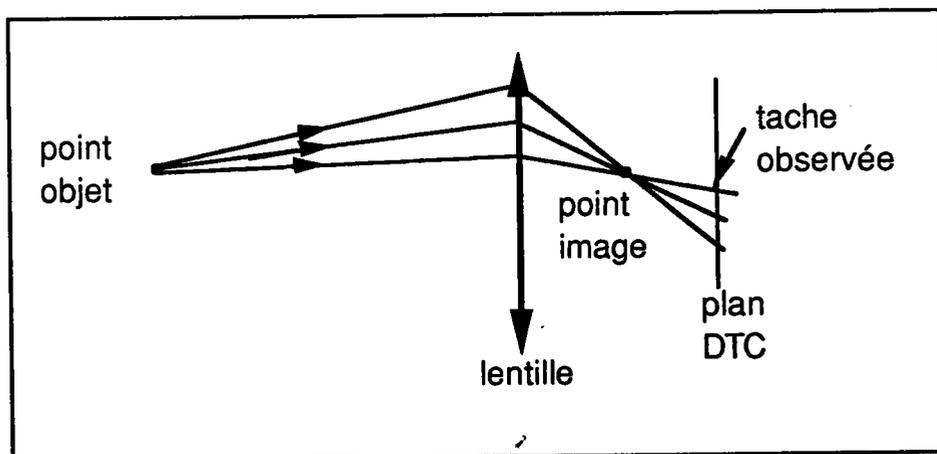


Figure I-8 : défaut de mise au point.

3.2 - Structure de l'image d'une source ponctuelle :

Lorsqu'un objectif est éclairé par une source ponctuelle, l'image est toujours une petite tache, même si l'objectif est parfaitement corrigé des aberrations.

Considérons un objectif O supposé parfait et représenté par une seule lentille pour simplifier (Figure I-9).

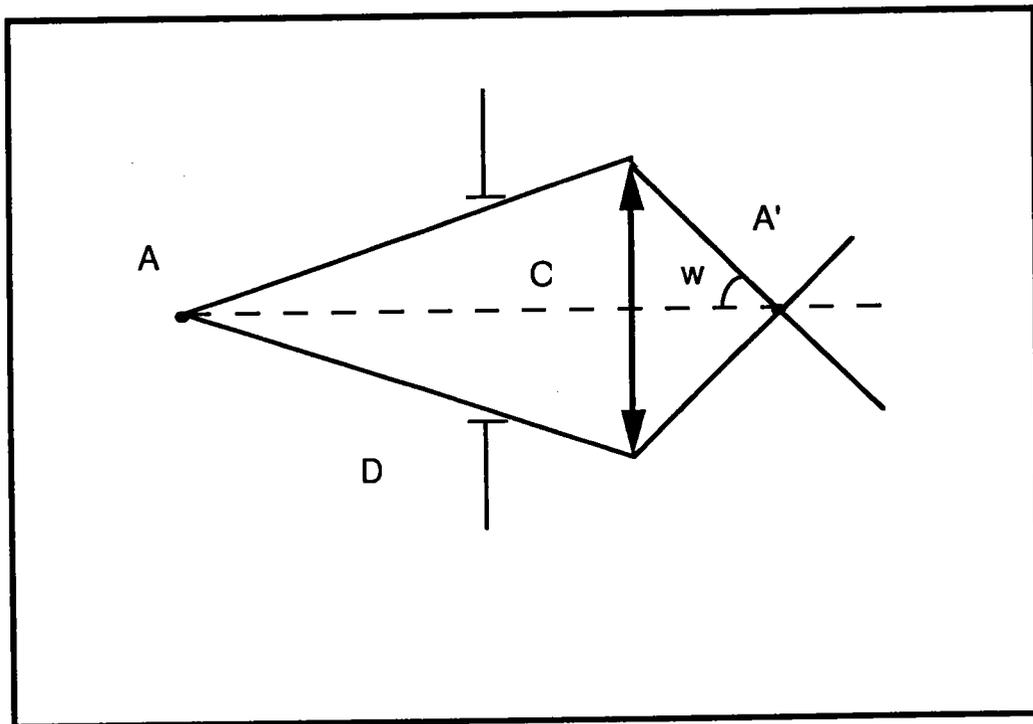


Figure I-9 : structure de l'image d'une source ponctuelle.

On place devant la lentille un diaphragme D de diamètre variable et on suppose que la source émet une lumière monochromatique de longueur d'onde λ . Si on examine l'image A' avec une loupe, on peut observer une tache centrale très brillante entourée d'anneaux beaucoup moins lumineux dont l'intensité décroît lorsqu'on s'écarte du centre. Le diamètre angulaire θ_m de la tache centrale est donné par la formule.

$$\theta_m = 2,44 \frac{\lambda}{D} \quad (1)$$

où D est le diamètre du diaphragme limitant le faisceau incident. C'est une très petite tache dont le diamètre augmente, lorsque D diminue. Un objectif fortement diaphragmé donne une image moins "piquée" qu'un objectif à grande ouverture.

La tache image d'une source ponctuelle de lumière monochromatique est produite par les phénomènes de diffraction.

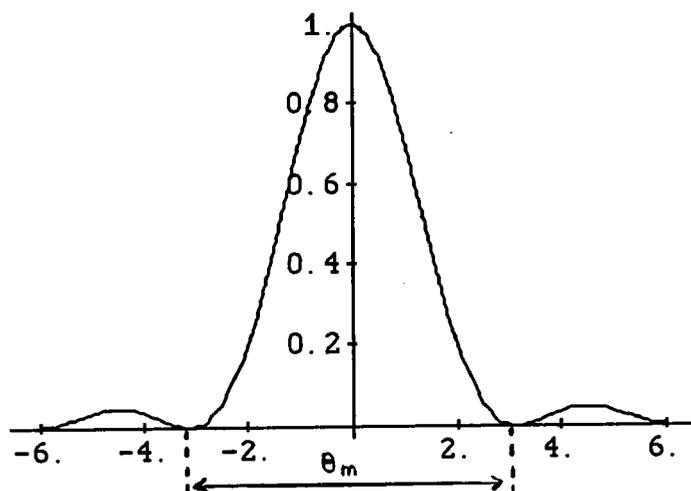


Figure I-10 : répartition des intensités dans la tache de diffraction image d'un point.
Courbe d'Airy.

La formule donnant le diamètre angulaire de la tache de diffraction montre que celui-ci varie avec la longueur d'onde. La tache de diffraction a un diamètre plus petit pour les courtes longueurs d'onde que pour les grandes longueurs d'onde. la variation est relativement faible dans le domaine des radiations visibles ; c'est pourquoi on observe la tache de diffraction en lumière blanche avec peu d'irisation.

3.3 - Formation de l'image d'un objet étendu compte tenu de la diffraction :

Chaque point de l'objet a pour image une tache de diffraction caractéristique du diamètre de l'objectif. Si tous les points de l'objet sont incohérents, il faut faire la somme des taches de diffraction en affectant chaque tache d'un coefficient proportionnel à l'intensité du point objet correspondant.

Soit un objet dont la distribution d'intensité est $I(u_1, v_1)$, suivi d'un système optique qui donne une image $E(u, v)$. L'intensité en un point quelconque de l'image est donnée par :

$$E(u, v) = \iint I(u_1, v_1) O(u-u_1, v-v_1) du_1 dv_1 \quad (2)$$

Où, $O(u-u_1, v-v_1)$ est la fonction de répartition des intensités dans la tache de diffraction image d'un point (courbe d'Airy).

Ce qui correspond au produit de convolution des fonctions $O(u, v)$ et $I(u, v)$:

$$E(u, v) = O(u, v) \otimes I(u, v) \quad (3)$$

3.4 - Fonction de transfert de l'objectif :

On utilise la formule (3) pour calculer la répartition des intensités dans l'image d'un objet particulier. Considérons comme objet un ensemble de traits parallèles et équidistants, alternativement noirs et blancs, éclairés en lumière monochromatique.

L'objet est périodique ; son intensité varie dans une seule direction celle perpendiculaire à ces traits, l'intensité $I(s)$ varie comme $\cos^2(\pi s/s_0)$ (Figure I-11). L'objectif formant l'image a une tache de diffraction (Figure I-10).

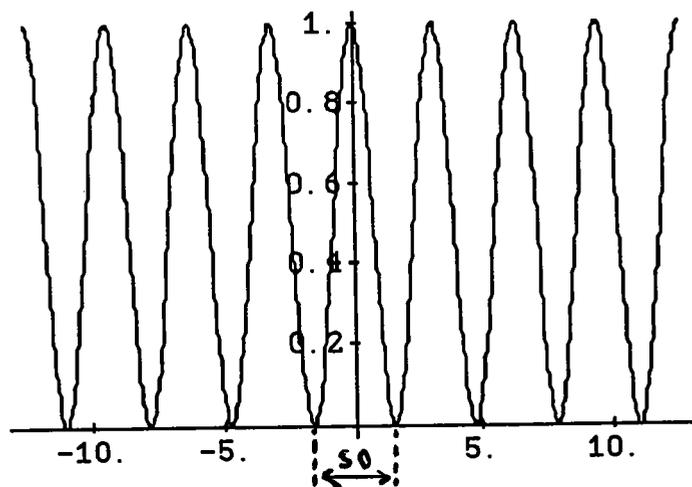


Figure I-11 : répartition des intensités dans l'objet étudié.

Puisque l'objectif a un contour circulaire, on peut remplacer $O(u,v)$ par $O(w)$ où $w = \sqrt{u^2+v^2}$. L'équation (3) s'écrit alors :

$$E(s) = I(s) \otimes O(w)$$

Prenons la transformée de Fourier des deux membres :

$$TF(E(s)) = TF(I(s)) \times TF(O(w)).$$

La transformée $TF(I(s))$ est représentée par les trois signaux de la figure I-12 et la transformée $TF(O(w))$ par une courbe du type de la figure I-13, où w_0 est l'ouverture de l'objectif formant l'image. Pour obtenir la transformée de Fourier de l'image $E(s)$, il faut faire le produit des ordonnées des figures I-12 et I-13, lesquelles sont réunies dans la figure I-14. Les signaux $-\mu/s_0$ et μ/s_0 ne sont pas reconstitués, le produit des ordonnées fournira par exemple les trois signaux de la figure I-15. Evidemment on ne retrouve pas la fonction $\cos^2(\pi s/s_0)$ mais bien une courbe comme celle de la figure I-16.

La diffraction réduit le contraste et par conséquent dégrade les images. On pourrait même ne plus avoir d'image, c'est à dire avoir un champ uniforme, si la courbe $TF(O(w))$ avait la disposition de la figure I-17.

En notant $1/s_0$ la fréquence spatiale de l'objet, on dit que si : $\mu/s_0 = w_0$, la fréquence $1/s_0$ est la fréquence de coupure de l'objectif. La courbe de la figure I-13 joue un rôle très important : cette courbe représente la fonction de transfert de l'objectif. C'est elle qui caractérise la qualité d'un instrument d'optique. La fréquence de coupure limite les fréquences transmises : au-dessus de la fréquence de coupure, les fréquences spatiales ne sont pas transmises. L'objectif effectue un filtrage des fréquences spatiales ; c'est un filtre du type passe-bas.

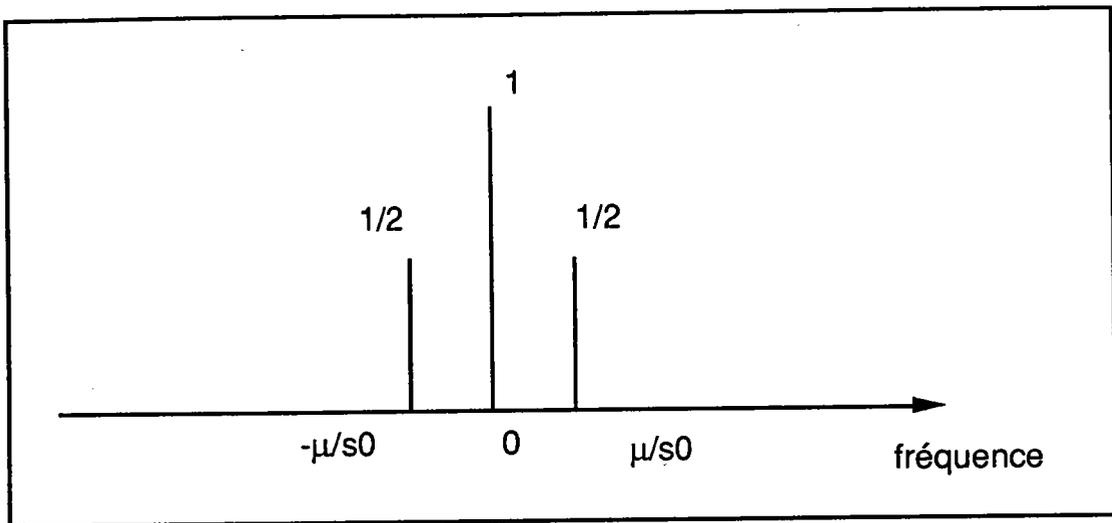


Figure I-12 : transformée de Fourier de l'objet représenté par la courbe de la figure I-11.

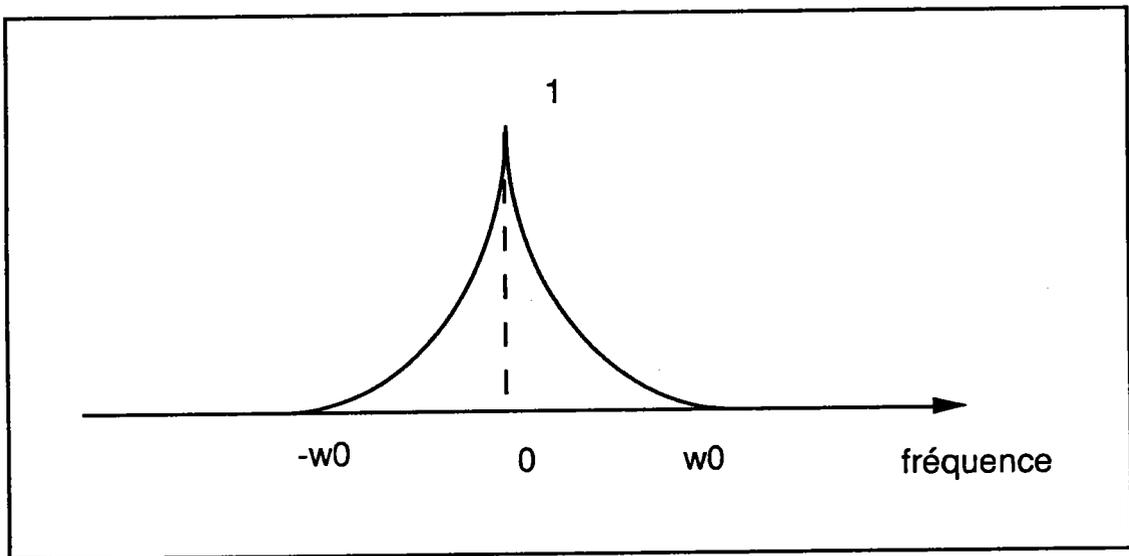


Figure I-13 : transformée de Fourier de la tache de diffraction de la figure I - 10. Elle représente la fonction de transfert de l'objectif.

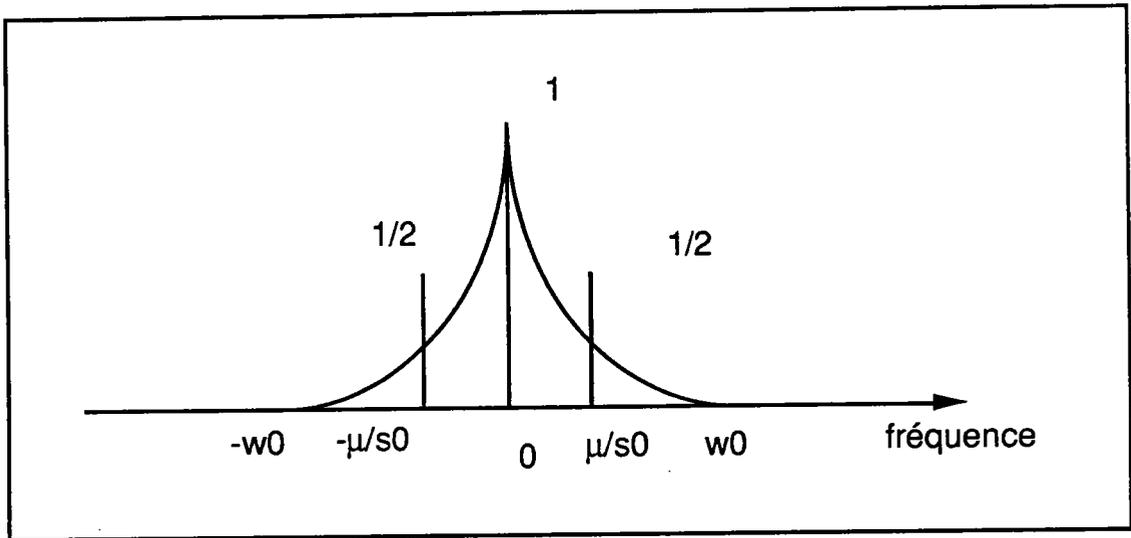


Figure I-14 : pour avoir la transformée de Fourier de l'image, il faut faire le produit des ordonnées des figures I-12 et I-13.

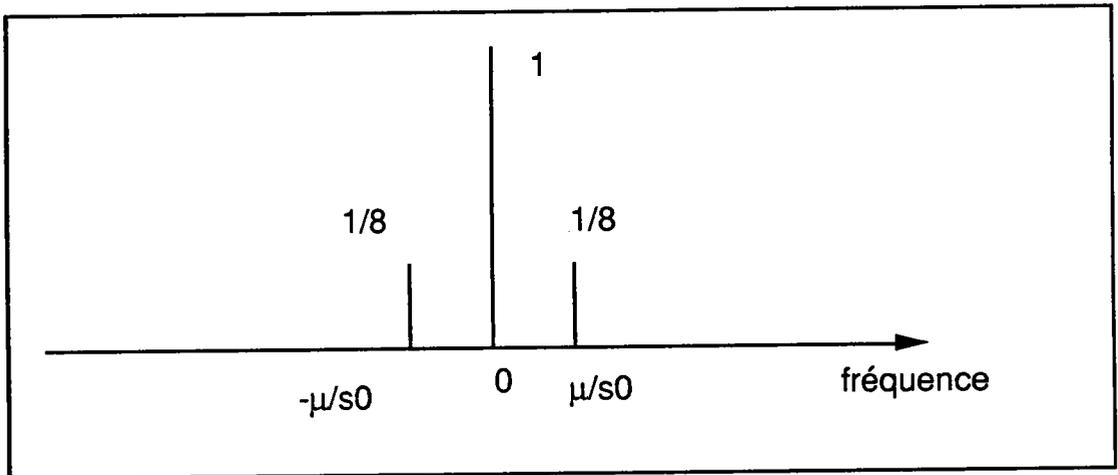


Figure I-15 : la transformée de Fourier de l'image n'est plus formée par les trois signaux d'ordonnées 1/2, 1 et 1/2.

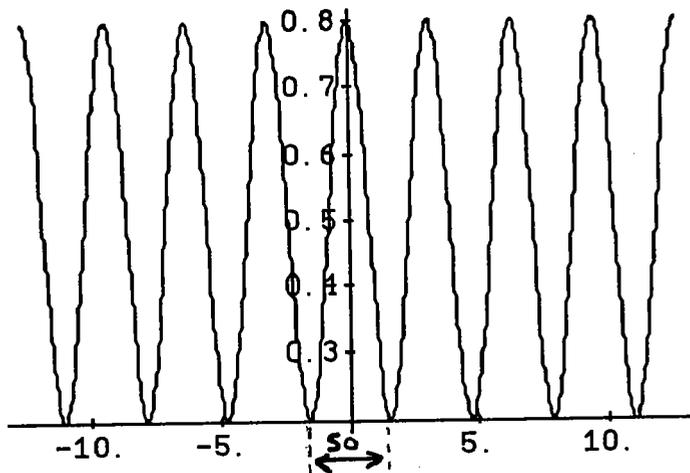


Figure I-16 : la transformée de Fourier inverse de la figure I-15.

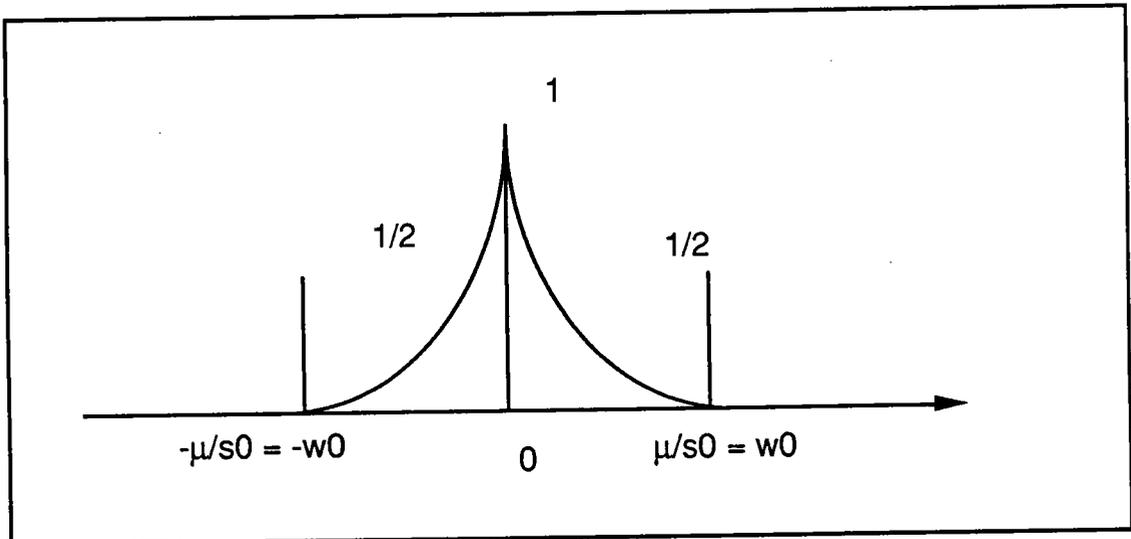


Figure I-17 : Lorsque $\mu/s_0 = w_0$ la fréquence limite $1/s_0$ est la fréquence de coupure.

4 - Effet des capteurs de la caméra :

Dans ce paragraphe nous analysons les deux types de caméras, vidicon et CCD [RAV-89]. Pour chaque type de caméras nous expliquons brièvement sa fonctionnalité et ses caractéristiques.

4.1 - Caméra vidicon :

Un faisceau d'électrons balaye une cathode photosensible ligne par ligne en commençant par la trame paire constituée des lignes paires. puis le faisceau revient pour balayer la trame constituée des lignes impaires.

A un moment donné, le faisceau d'électrons illumine seulement un petit spot de la surface de la cathode photosensible, et cause la décharge d'une petite surface pour générer un signal électrique, fonction croissante de l'intensité lumineuse. Le signal ainsi obtenu, est amplifié et mélangé avec le signal de synchronisation pour générer le signal vidéo composite [CAR-78, PEL-88].

La fonction de transfert optique électrique obéit à la loi suivante :

$$I = I_b \left(\frac{E}{E_b} \right)^y$$

I_b et E_b sont respectivement les valeurs du courant et de l'intensité lumineuse lorsque la cathode est éclairée en lumière blanche. Pour les vidicons standards y varie de 0,65 à 0,75 [MON-89]. Pour $y = 1$ on dit que le transfert optique électrique est linéaire, ce qui est le cas des caméras CCD.

4.2 - Caméra CCD :

Dans les caméras CCD une matrice d'éléments photosensibles permet de stocker et de déplacer une information représentée par des charges électriques sous forme analogique [BES-88]. Chaque élément accumule les signaux générés par la lumière durant l'exposition : les photons frappant une cellule photosensible libèrent des électrons dont le nombre est proportionnel à la quantité de lumière reçue par la cellule. La capacité d'un élément CCD est limitée. Après avoir recueilli d'une certaine quantité d'énergie, l'élément CCD se sature. La linéarité de la conversion optique électrique se dégrade au fur et à mesure qu'on s'approche de la saturation, c'est pourquoi pour une bonne linéarité on a intérêt à opérer au-dessous de la saturation (niveau de gris 255).

4.3 - Comparaison caméra CCD - tube vidicon :

Mise à part l'imagerie en couleur, les matrices ou barettes CCD ont pris un avantage irréversible dans toutes les applications de la vision artificielle comme celles de la robotique, de la surveillance, du tri et de l'inspection des procédés industriels.

	CCD	Tube type Vidicon
Temps de vie et fiabilité.	Long ;stable	Détérioration due au chauffage du faisceau électronique.
Poids et encombrement	Réduit en poids et en taille	Long à cause des bobines de déflection et du canon à (e-).
Rémanence	Pratiquement supprimée	Inévitable à cause de la couche photo-conductrice.
Blooming (sur-éclairage)	Grande résistance, jusqu'à 100 fois la saturation	Faiblesse des tubes.
Gamma	≈ 1	Plus faible (non linéaire).
Distortion	Absence	Forte sur les coins et les bords
Chauffage préalable	Aucun	Temps de mise en route de quelques 20 secondes.
Consommation et alimentation	Faible ; BT.	Grande par rapport au CCD à cause du canon et des bobines ; HT nécessaire.
Usage en environnement électromagnétique	Sans effet	Influence non négligeable.
Sensibilité	Jusqu'à 1,5 Lux pour F 1.4	Moins bonne.
Résolution	Excellente jusqu'à 450 lignes	Excellente jusqu'à 650 lignes.
Couleur	Manque de contraste	Qualité parfaite.

Figure I-18 : tableau de comparaison tube cathodique-matrice CCD.

5 - Le signal vidéo :

Le signal vidéo composite à la sortie de la caméra est constitué du signal de synchronisation composite (ligne + trame) négatif ajouté au signal de luminance, proportionnel à l'intensité lumineuse des pixels [CAR-78, PEL-88]. Si 0 représente le niveau le plus bas du signal et 100% le niveau du blanc, de 0 à 30% on a une luminance nulle et les impulsions de synchronisation et de 30% à 100% les différents niveaux de luminance.

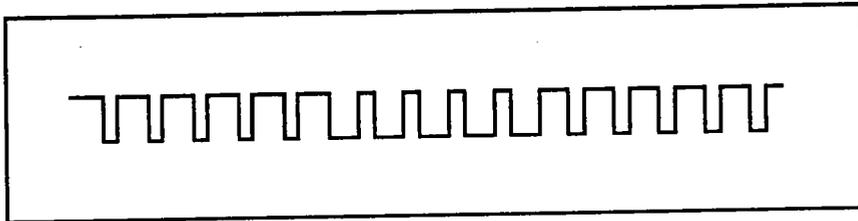


Figure I-19 : synchro. ligne et trame.

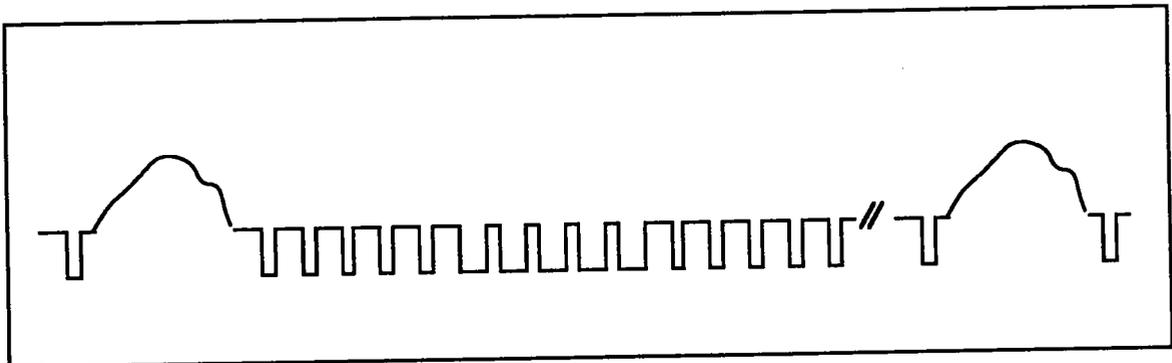


Figure I-20 : signal vidéo composite.

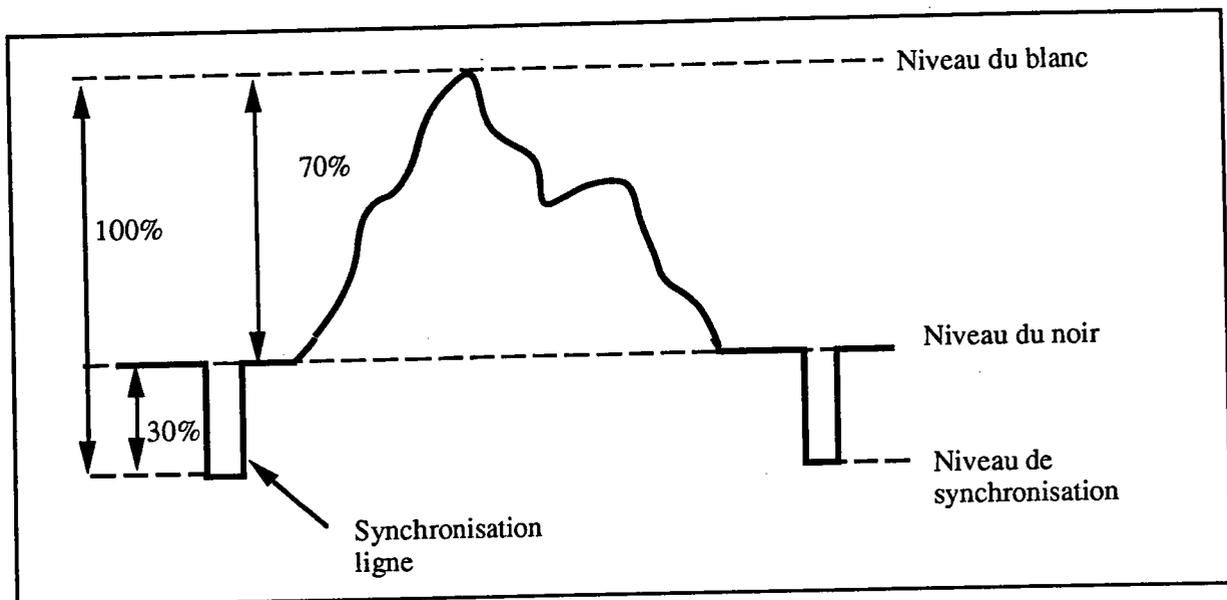


Figure I-21 : allure du signal vidéo au sein d'une ligne.

6 - Le convertisseur analogique numérique :

Le convertisseur permet un échantillonnage et une numérisation du signal vidéo à une fréquence de 15 MHz sur huit bits par exemple [BES-88], ce qui nous permet d'avoir 256 niveaux de gris. La fréquence d'échantillonnage du convertisseur analogique numérique est différente de celle de la caméra. Les pixels prélevés ne correspondent pas aux capteurs de la caméra. Ce phénomène n'est pas gênant si le spectre du signal vidéo est limité en valeur absolue par la moitié de la fréquence d'échantillonnage.

La sortie analogique de la caméra est suffisamment filtrée par un passe-bas avant d'être numérisée (la valeur du bruit de quantification est toujours négligée pour un convertisseur A/D 8 bits en comparaison à d'autres sources de bruits) [LEN-90].

7 - Les techniques sous pixel :

On remarque que la résolution du capteur proprement dit est proportionnelle au nombre de pixels disponibles, ceux-ci se partageant une taille donnée du champ d'observation. Par contre, la croissance du nombre d'éléments sensibles ne peut que réduire la fréquence des scrutations. La recherche d'un compromis est à l'origine d'un des choix auxquels doivent se soumettre les constructeurs. Choix "facilité" pour certaines

applications (contrôle dimensionnel et positionnement d'objet) par la technique du "subpixel" qui, sans améliorer la résolution de l'image (celle-ci aurait même tendance à diminuer), permet par contre de multiplier la résolution des mesures issues du traitement informatique interne [HYD-83,JAC-81,KRO-86,NAL-87,PEL-87,PEL-82,TAB-84].

Le principe des techniques sous pixel est le suivant : à partir d'une zone d'intérêt, le système lisse l'image numérique (niveau de gris) en un signal analogique. Le signal est alors rééchantillonné sur cette zone d'intérêt avec une période différente plus petite. Ainsi, à une valeur de gris donnée, il devient possible d'associer une position repérée avec une précision de mesure inférieure au pixel.

Cette propriété permet de réduire le nombre de pixels du capteur et donc de gagner sur le coût du système et le temps de balayage, tout en compensant la diminution de résolution par une précision de mesure nettement améliorée.

Si le rééchantillonnage permet d'augmenter la résolution de mesure qui s'applique au contrôle dimensionnel, il a pour effet aussi de faire disparaître tous les détails dont la taille est inférieure ou égale à un pixel. Ainsi cette technique ne sera d'aucune utilité pour les applications de contrôle d'aspect.

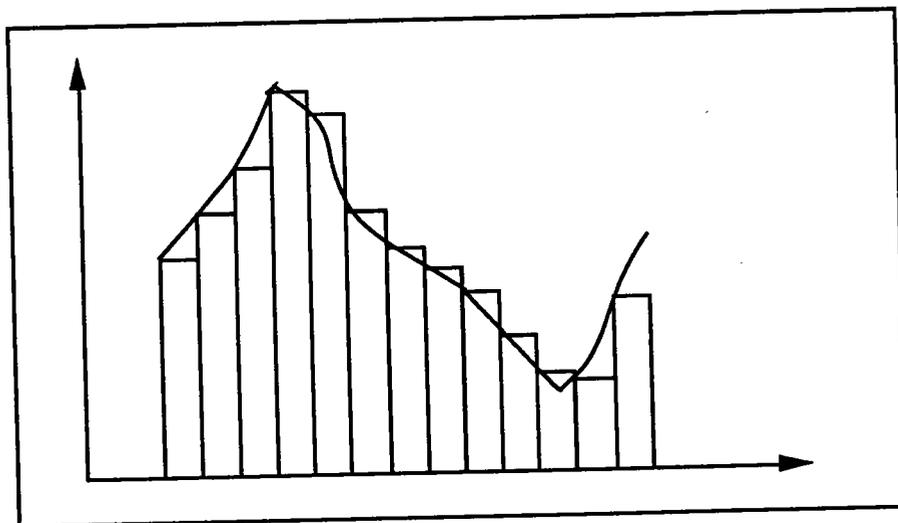


Figure I-21 : lissage de l'image initiale.

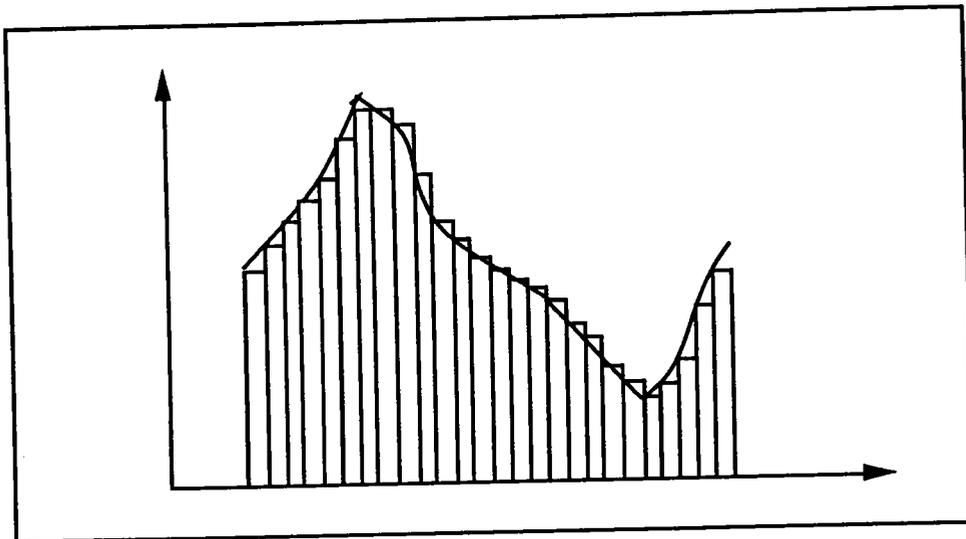


Figure I-22 : rééchantillonnage de l'image avec une fréquence plus élevée.

8 - Conclusion :

Dans ce chapitre les différentes étapes de la formation d'une image industrielle ont été examinées. Plusieurs phénomènes de la formation de l'image (aberration d'astigmatisme, distortion, aberration de sphéricité et défaut de mise au point), ainsi que les différentes méthodes d'éclairage ont été cités.

L'objectif permet un filtrage du type passe-bas, ce qui limitera les fréquences transmises.

La linéarité de la transformation optique-électrique, dans le cas des caméras CCD est idéale pour les systèmes d'acquisition d'image en termes de précision géométrique et de stabilité dans le temps [BES-88,RAV-89]. C'est un avantage des CCD dans les opérations de la vision artificielle comme celles de la métrologie par vision, de la reconnaissance de forme ...etc.

Le choix d'un éclairage adéquat permet d'avoir une précision des mesures égale à un pixel, une amélioration de cette précision pour atteindre une résolution d'une fraction de pixel est possible avec les techniques sous pixel.

DEUXIEME CHAPITRE

II) Les différentes méthodes de mise au point

1 - Introduction :

Dans le souci constant de la rentabilité et de l'amélioration de la qualité dans le milieu industriel, l'automatisation des systèmes de production et de contrôle est une étape obligatoire. Les systèmes de vision qui occupent une part du marché de plus en plus importante doivent suivre cette tendance à l'automatisation totale. Dans ce but plusieurs méthodes de mise au point automatique des systèmes de vision, plus connues sous le nom d'auto-focus, ont été proposées.

Dans un premier temps, nous présentons une revue critique de l'état de l'art, puis dans un deuxième temps les méthodes que nous avons développées seront exposées.

2 - Revue bibliographique :

Les systèmes de mise au point automatique, plus connus sous le nom d'auto-focus, sont aujourd'hui, intégrés à la plus part des systèmes de visions. Deux catégories de systèmes sont actuellement employées par les fabricants. Il s'agit d'une part des systèmes actifs, où une lumière fournie par un émetteur est employée dans le processus de focalisation, tandis que dans les systèmes passifs c'est l'illumination naturelle, réfléchie ou émise par l'objet photographié qui est utilisée.

Dans les systèmes actifs un émetteur émet de la lumière modulée ou continue, dirigée vers l'objet à traiter. Les signaux réfléchis sont captés par le récepteur du système qui fournit un signal qui une fois traité commande le déplacement de l'objectif. Un certain nombre de systèmes actifs [RAV-89], ayant recours à la mesure de l'angle d'incidence d'un faisceau infrarouge, émis vers l'objet cadré et réfléchi par celui-ci vers le dispositif d'analyse du système de vision.

Les systèmes passifs utilisés sur la très grande majorité des systèmes de vision, dont le fonctionnement repose sur la détection du contraste des images focalisées au travers de l'objectif.

Les auto-focus passifs présentent certains avantages par rapport aux auto-focus actifs. En effet, étant donné qu'ils opèrent à partir de l'analyse de netteté des images formées sur les capteurs photo-sensibles, leur action peut être étendue aux prises de vues réalisées en mode "macro", ce qui, et pour cause, est interdit aux auto-focus actifs, compte-tenu de l'importante parallaxe existant entre les axes optiques de l'objectif de la caméra et les éléments émetteur et récepteur du faisceau infrarouge.

Par contre quand on travaille avec de très faibles niveaux d'éclairement : 5 lux, 3 lux et même moins, le comportement d'ensemble des auto-focus actifs s'avère davantage satisfaisant que celui des auto-focus passifs. En effet ces derniers demandent, en raison même de leur principe de fonctionnement, que les objets cadrés présentent un niveau de contraste minimal, pour être opérationnels de façon pleinement satisfaisante.

Quelques auteurs ont proposé des méthodes de mise au point pour les systèmes de vision.

2.1 - Méthode proposée par Albert G. Häusler et Eva Körner :

Gerd Häusler et Eva Körner ont proposé une méthode de mise au point utilisant la variation de l'intensité d'un certain nombre de points de l'image en fonction de la focalisation de l'image [HÄU-84].

Ils ont montré que l'intensité de l'image $I(x,z)$ en une position x en fonction de la défocalisation z admet toujours un extrémum à la bonne mise au point ($z=0$). Il y a d'autres extrémums correspondant à des valeurs de $z \neq 0$, mais leurs localisations dépendent de l'objet et de la position de x . Pour trouver la bonne mise au point de l'image ils proposent la procédure suivante : d'abord ils mesurent la valeur de l'intensité $I_n(z)=I(x_n,z)$ pour un certain nombre de points x_n . Alors l'extrémum commun à toutes les intensités $I_n(z)$ fournira la bonne mise au point. (Le nombre de positions dépend de la complexité de l'objet à traiter). La fonction de focalisation proposée est la suivante :

$$R(z) = \sum_{n=0}^N \left| \frac{dI(x_n,z)}{dz} \right|$$

où la fonction $R(z)$ admet l'extrémum le plus bas pour l'image la plus nette.
 x_n correspond à un pixel arbitraire de l'image.
 $I(x_n, z)$ désigne l'intensité au pixel x_n et z la position de focalisation.

2.2 - Méthode proposée par Albert G. Choate :

L'utilisation du gradient pour la mise au point automatique d'un système de vision a été évoquée par Albert G. Choate [CHO-89]. Il associe la netteté de l'image avec le maximum de la somme des carrés des gradients locaux.

En fait le gradient est une méthode de différentiation utilisé dans le traitement de l'image, qui donne une valeur proportionnelle à la différence des niveaux de gris des pixels adjacents. Donc la valeur du gradient est d'autant plus élevée que l'image est plus contrastée. Le gradient est défini comme suit :

$$G[I(x,y)] = \begin{bmatrix} \frac{\partial I}{\partial x} \\ \frac{\partial I}{\partial y} \end{bmatrix}$$

et l'amplitude de $G[I(x,y)]$:

$$G[I(x,y)] = \left[\left[\frac{\partial I}{\partial x} \right]^2 + \left[\frac{\partial I}{\partial y} \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Une approximation pour les images numériques est donnée par :

$$G[I(x,y)] \cong \left[[I(x,y) - I(x+1,y)]^2 + [I(x,y) - I(x,y+1)]^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Pour des raisons de rapidité de programmation on utilise :

$$G[I(x,y)] \cong |I(x,y) - I(x+1,y)| + |I(x,y) - I(x,y+1)|$$

2.3 - Méthode proposée par S.A.Sugimoto et al. :

S.A.Sugimoto et al. ont utilisé la variance pour focaliser sur un segment d'une image microscopique [SUG-85]. Le filtre proposé est sensible aux basses fréquences de la distribution de l'éclairage dans l'image. Un inconvénient de cette méthode est qu'elle ne fonctionne pas bien lorsqu'un objet est très fortement éclairé ou très peu éclairé.

$$LV_k(m,n) = \frac{1}{w} \sum_{p=-w_x}^{w_x} \sum_{q=-w_y}^{w_y} |I_k(m+p,n+q) - I_k(m,n)|^2$$

où $I_k(m,n)$ est la moyenne locale donnée par :

$$I_k(m,n) = \frac{1}{w} \sum_{p=-w_x}^{w_x} \sum_{q=-w_y}^{w_y} I(m+p,n+q)$$

$$w = (2w_x+1) (2w_y+1)$$

Ici $(2w_x+1)$ et $(2w_y+1)$ les deux faces du segment image rectangulaire.

2.4 - Méthode proposée par R.J. Pieper et al. :

R.J. Pieper et al. ont proposé l'opérateur de différence non directionnel pour effectuer l'opération de mise au point [PIE-83]. La caractéristique importante de cette méthode est qu'elle est relativement insensible aux éléments basses fréquences de la distribution d'éclairage. Par contre l'expérience a montré une légère sensibilité de ce filtre au bruit aléatoire, qui peut être attribuée aux faibles dimensions des segments d'image utilisés dans le traitement.

L'opérateur de différence non directionnel proposé est défini comme suit :

$$D_p(m,n) = \frac{|I_p(m-1,n+1) - I_p(m+1,n-1)| + |I_p(m+1,n+1) - I_p(m-1,n-1)|}{|I_p(m,n+1) - I_p(m,n-1)| + |I_p(m-1,n) - I_p(m+1,n)|}$$

Où $I_p(m,n)$ est l'intensité au point de coordonnées (m,n) dans le plan p perpendiculaire à l'axe optique (à la direction de focalisation). Le plan p correspondant à l'image la plus nette est celui qui contient la valeur maximale de $D_p(m,n)$.

2.5 - Méthode proposée par Kazuyoshi et al. :

A partir des deux dernières propositions, Kazuyoshi et al. ont proposé un filtre qui se base sur la moyenne de la différence non directionnelle [KAZ-89]. Ce filtre, qui combine en un seul les deux précédents, est appelé la moyenne de la différence non directionnelle. Il est défini comme suit :

$$AD_k(m,n) = \frac{1}{W} \sum_{p=-w_x}^{w_x} \sum_{q=-w_y}^{w_y} \{ |I_k(m+p+1,n+q+1) - I_k(m+p,n+q)| + |I_k(m+p,n+q+1) - I_k(m+p,n+q)| \\ |I_k(m+p+1,n+q) - I_k(m+p,n+q)| + |I_k(m+p+1,n+q) - I_k(m+p,n+q+1)| \}$$

le filtre a été proposé pour être utilisé dans le cas où l'objet à focaliser est opaque. Par contre, dans le cas d'un objet semi transparent où plusieurs plans images peuvent être focalisés, une deuxième méthode a été proposée. Cette dernière utilise un système d'imagerie astigmatique avec un filtre de variance locale différentielle, ce qui permet d'éliminer les effets causés par les modes du bruit commun. Ce dernier filtre est défini comme suit :

$$DV_k(m,n) = V_{x_k}(m,n) - V_{y_k}(m,n)$$

Où :

$$V_{x_k}(m,n) = \frac{1}{W} \sum_{q=-w_y}^{w_y} \sum_{p=-w_x}^{w_x} [I_k(m+p,n+q) - I_{x_k}(m,n,p)]^2$$

$$V_{y_k}(m,n) = \frac{1}{W} \sum_{p=-w_x}^{w_x} \sum_{q=-w_y}^{w_y} [I_k(m+p,n+q) - I_{y_k}(m,n,p)]^2$$

$$I_{x_k}(m,n,q) = \frac{1}{(2w_x+1)} \sum_{p=-w_x}^{w_x} I_k(m+p,n+q)$$

$$(q = -w_y, -w_y+1, \dots, w_y)$$

$$I_{y_k}(m,n,q) = \frac{1}{(2w_y+1)} \sum_{p=-w_y}^{w_y} I_k(m+p,n+q)$$

$$(p = -w_x, -w_x+1, \dots, w_x)$$

2.6 - Un système de mise au point utilisé dans les appareils photos :

Un système de mise au point utilisé essentiellement dans les appareils photographiques se base sur un phénomène optique qui est la diffraction de l'objectif. Le réglage utilise un système connu : lorsque la mise au point est correcte, l'objectif forme l'image nette sur le film (et dans le viseur sur le plan de verre dépoli). Si cette image nette se forme soit en avant, soit en arrière du film (et du dépoli), sur ce film et sur ce dépoli elle est alors floue.

Dans le système des caméras un écran DTC (dispositif à transfert de charge) de n cellules à deux détecteurs (soit $2n$ détecteurs au total) reçoit l'image transmise par l'objectif (plus exactement, la partie centrale de cette image, d'ailleurs repérée dans le viseur par un petit rectangle). En simplifiant, disons que le travail de ces cellules revient à mesurer le degré de flou, donc le degré de défocalisation due à la mauvaise mise au point. Dans son principe, le processus est simple : en cours de mise au point, l'image passe du flou au net, d'où un déplacement des rayons lumineux qui balayent l'écran DTC.

• Mise au point correcte.

L'image nette se forme sur le plan focal (plan du film). Les rayons marginaux d'un faisceau lumineux se croisent donc sur ce plan et atteignent chacun un détecteur d'une cellule. Le réseau DTC (dispositif à transfert de charge) compte n cellules de 2 détecteurs chacune. Chaque détecteur délivre des impulsions électriques identiques qui sont en phase (Figure II-1). L'ordinateur utilise cette concordance des signaux pour arrêter le moteur de mise au point si celui-ci est en marche.

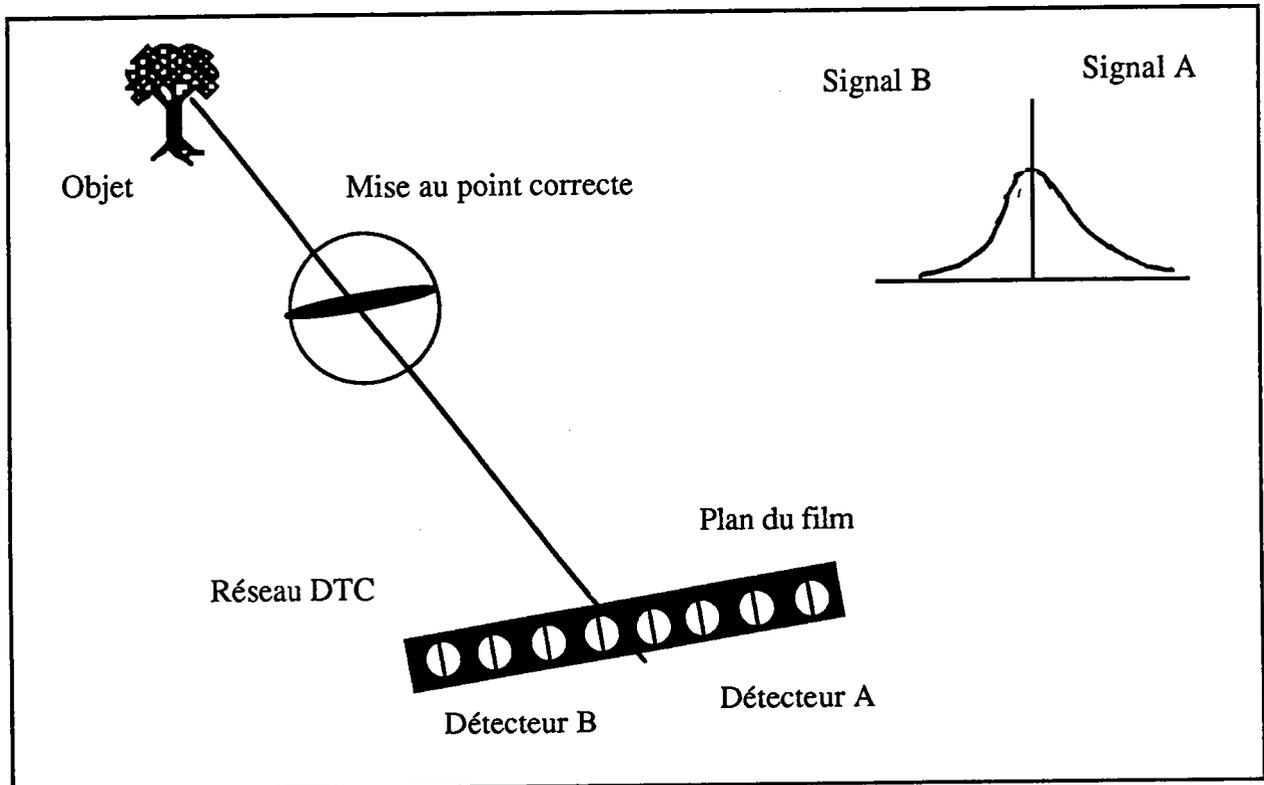


Figure II-1 : Mise au point correcte.

- Mise au point en avant.

L'image nette se forme en avant du plan focal (plan du film). Le moteur qui entraîne l'objectif fait déplacer cette image vers le plan focal. Le faisceau lumineux atteignant les cellules, large au début, se rétrécit et ses rayons marginaux balayent les détecteurs en se rapprochant l'un de l'autre. Les signaux électriques ne sont plus en phase (Figure II-2), mais les phases se rapprochent jusqu'à coïncider lorsqu'on revient à la première situation.

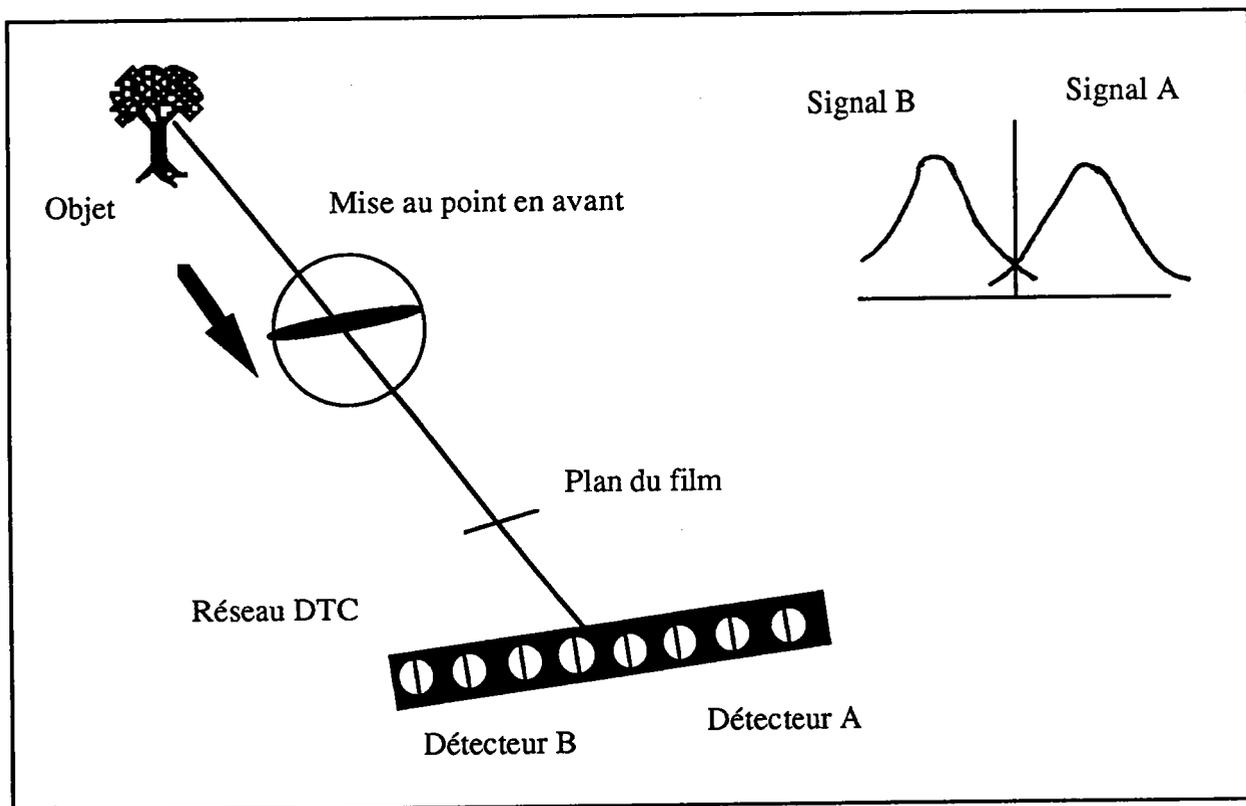


Figure II-2 : Mise au point en avant.

• Mise au point en arrière.

C'est la situation inverse de la précédente. Le processus est le même, mais les phases sont inversées (Figure II-3). De cette inversion dépend le sens de rotation du moteur pour réaliser la mise au point.

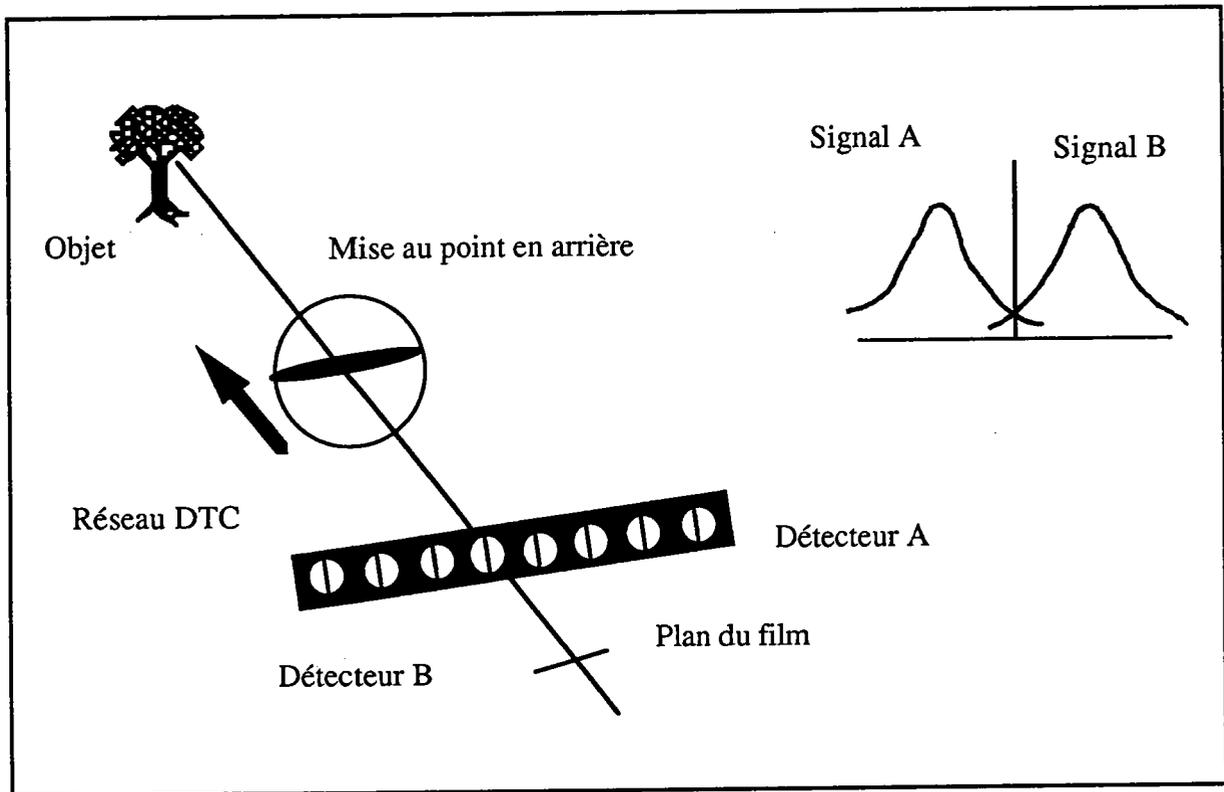


Figure II-3 : Mise au point en arrière.

2.7 - Méthode proposée par R.B. Mitkin :

Un système d'auto-focus basé sur la technique de triangulation utilisant un dispositif optique (optically controlled transparency : OCT), qui permet de faire la corrélation entre l'image directe et l'image passant par le miroir 2 (voir Figure II-4), et un algorithme d'exploitation ont été proposés par R.B. Mitkin [MIT-89].

Le principe utilisé est le suivant ; la distance objet-objectif est déterminée par la connaissance de deux paramètres : la distance b entre le miroir 2 et l'axe optique et l'angle de rotation β du miroir (voir Figure II-4) :

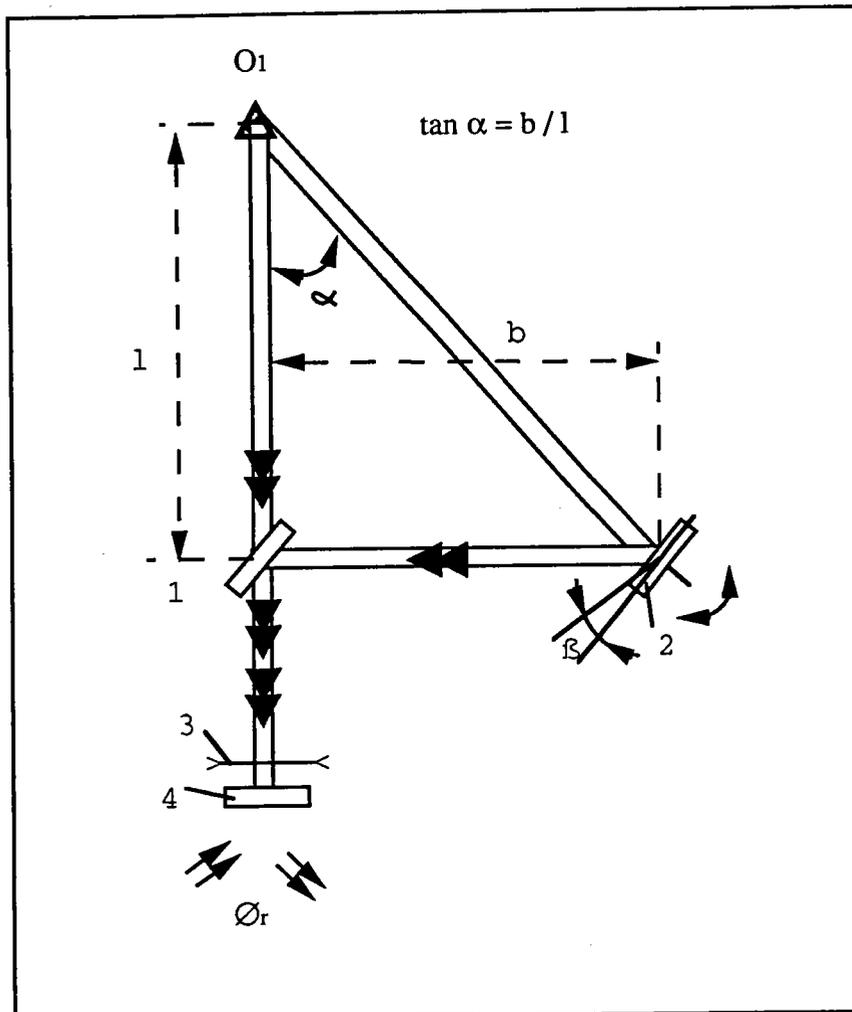


Figure II-4 : trajectoire des rayons optiques dans un système d'auto-focalisation par triangulation : 1-miroir semi-transparent, 2-miroir rotatif, 3-lentille de l'objectif, 4-dispositif de traitement et de contrôle (OCT).

Pendant l'auto-focalisation l'élément 2 de la Figure II-4 se met en rotation synchrone avec l'objectif de la caméra. Quand le signal fournit par l'OCT a une valeur maximale, la mise au point est achevée et on procède au calcul du déplacement x de l'objectif nécessaire :

$$x = \frac{2\beta f_1^2}{b}$$

où $f_1=f'_1$ sont les distances focales à l'arrière et à l'avant de l'objectif. D'après l'auteur, le système est capable de localiser un objet dans un champ compris entre 0.9 et 10 m avec une précision de $\pm 5 \mu\text{m}$.

2.8 - Conclusion:

L'auto-focalisation des objectifs des caméras, est un traitement qui contient un nombre considérable de difficultés, qui est plus important dans le cas des systèmes de focalisation actifs que passifs. En effet, la multitude des sources de lumière proposées pour les systèmes d'auto-focalisation actifs dans le but d'augmenter leur précision et leur fiabilité, utilisent des éléments de modulation d'amplitude et de phase et des sources de lumière d'une puissance suffisamment grande, ce qui pose un problème d'intégration des modules d'éclairage à cause de la petite taille des caméras.

Les méthodes d'auto-focus actives se basant sur l'émission et la réception d'un faisceau infrarouge, exigent que l'objet soit réfléchissant. L'avantage de ces systèmes est qu'une bonne mise au point est possible même dans de mauvaises conditions d'éclairage.

De plus les dispositifs optiques particuliers utilisés, d'un coût très élevé, sont difficiles à mettre en œuvre, comme par exemple celui utilisé dans les appareils photos ou bien celui développé par Mitkin et al.

Les systèmes de mise au point passifs peuvent être divisés en deux catégories : la première utilise la variation de l'intensité d'un point image quand la caméra se déplace le long de l'axe z indépendamment des points voisins. Par contre la deuxième catégorie utilise la variation d'un point image avec d'autres points de la même image, et ceci pour mesurer le contraste de l'image. Les systèmes de mise au point passifs sont peut coûteux puisque le traitement se fait par ordinateur en utilisant une simple caméra, sans nécessiter un système d'éclairage sophistiqué ou un dispositif optique difficile à mettre au point.

Mais dans tous les cas, il est nécessaire d'utiliser des éléments mécaniques d'une grande précision pour la motorisation de l'objectif.

Dans la suite nous proposons deux méthodes de mise au point, ces méthodes sont du type passif cité ci-dessus. Elles utilisent les transformations orthogonales.

De plus ces transformations orthogonales sont utilisées pour la caractérisation de la morphologie d'une surface dans le but du classement et de la reconnaissance de formes.

3 - Les transformées orthogonales :

L'idée d'exprimer une fonction de forme compliquée, comme une combinaison linéaire de fonctions élémentaires de forme simple, est bien connue. Par exemple, dans un intervalle $[u_1, u_2]$, une fonction $f(u)$ peut être représentée par :

$$f(u) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i g_i(u)$$

où les fonctions $g(u)$ forment un ensemble de fonctions élémentaires de forme simple. Si ces fonctions sont orthogonales, alors les coefficients a_i sont indépendants les uns des autres. On parle dans ce cas, d'un développement en série de fonctions orthogonales.

Dans ce chapitre nous allons parler essentiellement des différentes transformées utilisées en exhibant leurs propriétés. Les transformées orthogonales ont été utilisées principalement pour la reconnaissance de formes et le codage de l'information dans le but d'effectuer de la compression [GRI-80], du rehaussement et de la restauration des images [GON-].

La reconnaissance de formes est un traitement effectué dans le but de classifier ou de fournir une description structurelle des images. La classification nécessite la mesure de propriétés et l'extraction de caractéristiques. La description nécessite en plus, la segmentation et l'établissement de relations structurelles. L'extraction de caractéristiques et la mesure de propriétés sur une image effectuées dans un but de classification sont deux cas particuliers d'une discipline appelée reconnaissance de formes.

Après avoir été simulés pendant des centaines d'heures les algorithmes de compression d'image sont aujourd'hui finalisés et parfaitement au point. L'une des

utilisation récente est le visiophone à base de RNIS (Réseau numérique à intégration de services)[JAI-81,TEC-91].

La qualité d'une image peut être dégradée lorsque celle-ci change de support (reproduction, transmission, mémorisation, réduction de redondance, etc.). Une image peut être de mauvaise qualité au départ à cause d'un mauvais réglage de prise de vue. L'ensemble des méthodes développées pour compenser les dégradations connues ou estimées, afin de rétablir la qualité initiale est appelé restauration d'images.

L'ensemble des méthodes qui modifient l'apparence d'une image, de manière à ce qu'un observateur ou une machine puisse extraire plus facilement une certaine information désirée, est appelé rehaussement d'images.

3.1 - Transformation de Fourier discrète :

De tous les développements en série de fonctions orthogonales, la série de Fourier est sans doute celle dont on fait le plus grand usage en traitement des signaux.

La transformation de Fourier des signaux numériques est définie :

Pour les signaux bidimensionnels :

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \exp(-j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}))$$

- Pour les signaux unidimensionnels :

$$F(u) = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(x) \exp(-j2\pi \frac{ux}{M})$$

La transformation de Fourier inverse est la suivante :

- Pour les signaux bidimensionnels :

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) \exp(j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}))$$

Pour les signaux unidimensionnels :

$$f(x) = \sum_{x=0}^{M-1} F(u) \exp(j2\pi \frac{ux}{M})$$

où $f(x,y)$ est le niveau de gris du point de coordonnées x et y dans l'image.

M est le nombre d'échantillons suivant l'axe x .

N est le nombre d'échantillons suivant l'axe y .

Pour analyser l'image dans l'espace des fréquences, on utilise la transformée de Fourier. La transformation $F(u)$ est une autre représentation simple de la fonction image. Sa signification peut être comprise par l'interprétation de l'équation suivante pour une valeur spécifique de x notée x_0 :

$$f(x_0) = \sum_{u=0}^{M-1} F(u) \exp(j2\pi \frac{ux_0}{M})$$

Cette équation montre qu'un point particulier de l'image peut être représenté par une somme pondérée d'exponentielles complexes pour différentes fréquences u . $F(u)$ est alors une fonction de pondération pour les différentes fréquences.

Dans la suite nous allons exposer les deux critères utilisant la TFR que nous avons développés [CHA-91]; le premier concerne la caractérisation de morphologies et le second permet l'auto-focalisation d'une caméra.

- Caractérisation de morphologies par la transformée de Fourier :

La transformée de Fourier fournit un certain nombre d'indications sur l'image analysée. Sachant que $f(x)$ représente l'amplitude du signal au point x , $|F(u)|^2$ représente le spectre de puissance de l'image. Ce spectre est directement relié à la morphologie de la structure à analyser. En particulier dans le cas d'une structure très fine on aura une courbe enveloppe, c'est à dire un spectre de puissance très étalé (figure II-6), alors que dans le cas d'une structure grossière, le spectre sera beaucoup plus étroit (figure II-7).

Les courbes de la figure II-6 et II-8 correspondent aux spectres de puissance d'une ligne de 256 points respectivement des images figure II-5 et II-7. Comme il y a symétrie du spectre par rapport à l'origine nous n'avons représenté que 128 points du spectre.

La caractérisation de morphologies par la transformée de Fourier peut être utilisée dans les systèmes de reconnaissance de formes.

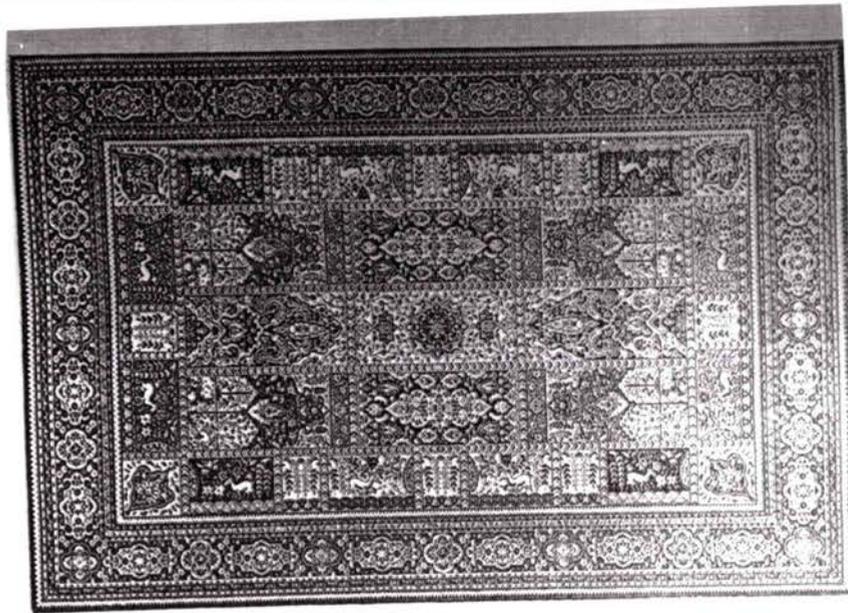


Figure II-5 : image d'une structure fine

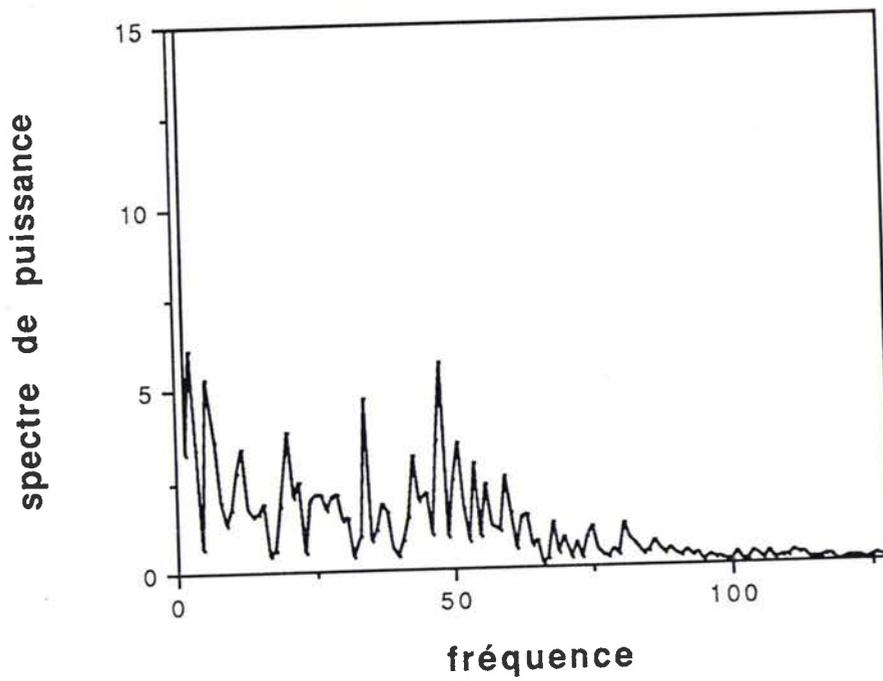


Figure II-6 : spectre de puissance d'une structure fine

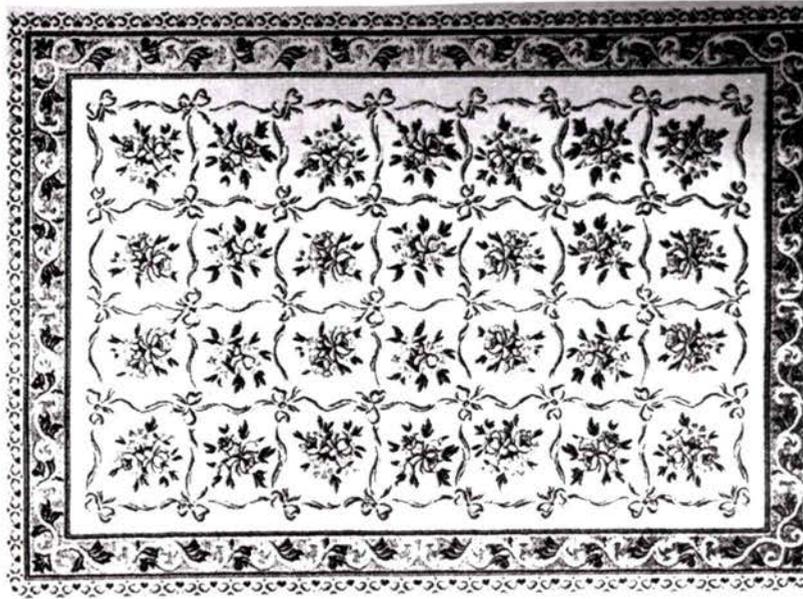


Figure II-7 : image d'une structure grossière

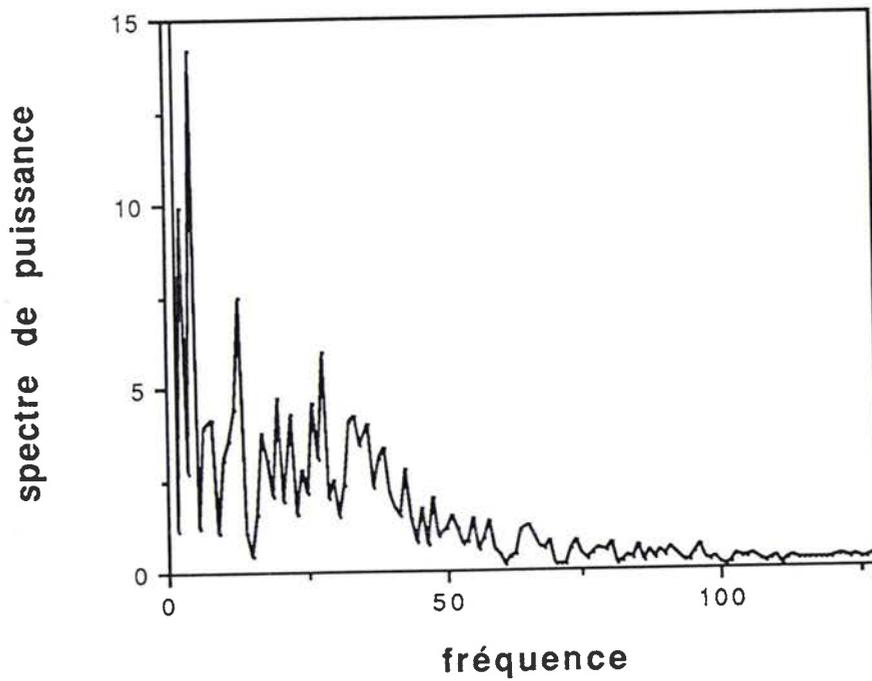


Figure II-8 : spectre de puissance d'une structure grossière

- Critère d'auto-focalisation par transformée de Fourier :

Une autre propriété peut être dégagée du spectre de puissance : l'image est d'autant plus nette que la valeur de la fonction de pondération dans les hautes fréquences est importante. On a représenté les trois spectres de puissance (image II-9 nette, image II-11 un peu floue et image II-13 floue) pour une structure de la Figure II-9.

En comparant les courbes II-10, II-12 et II-14 correspondant respectivement aux images II-9, II-11 et II-13 on remarque que la courbe II-10 admet des coefficients supérieurs à ceux de la courbe II-12 dans la partie des hautes fréquences et que la courbe de la figure II-12 admet des coefficients supérieurs à ceux de la courbe II-14 dans la partie des hautes fréquences.

Donc l'image la plus nette d'une structure est celle qui admet une fonction de pondération maximale dans le domaine des hautes fréquences.

On vérifie ici le principe suivant : les basses fréquences qui constituent le spectre de l'image, représentent la luminance générale des régions, tandis que la partie hautes fréquences du spectre représente les contours et les changements brusques de luminance.

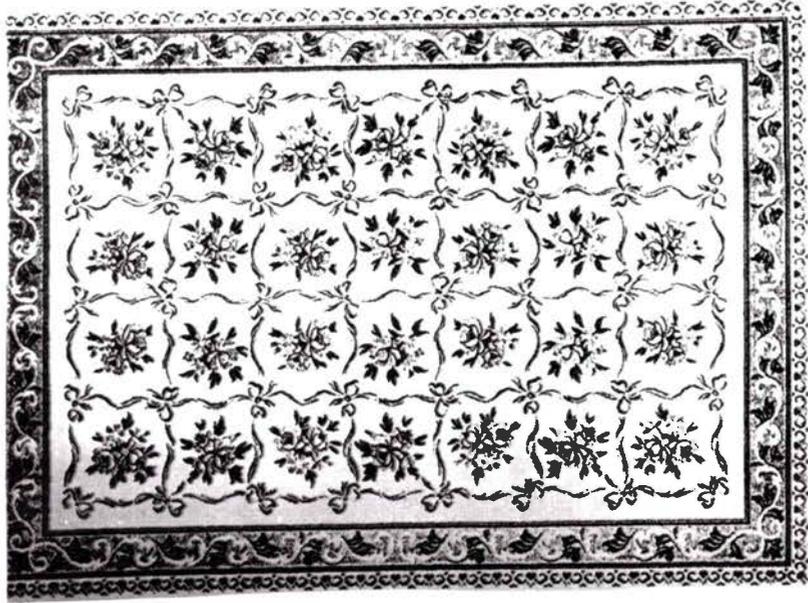


Figure II-9 : image nette

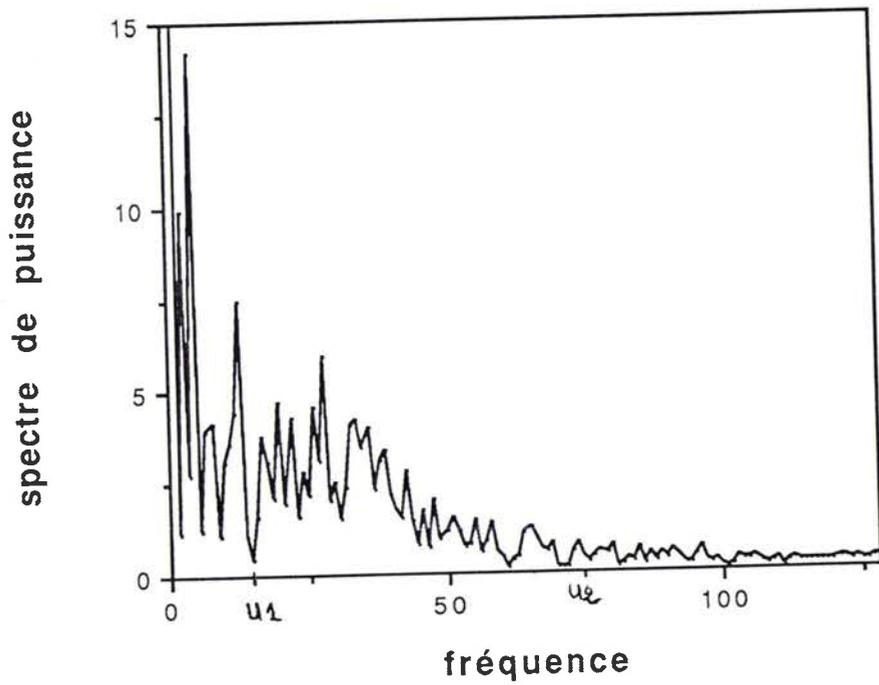


Figure II-10 : spectre de puissance d'une image nette.

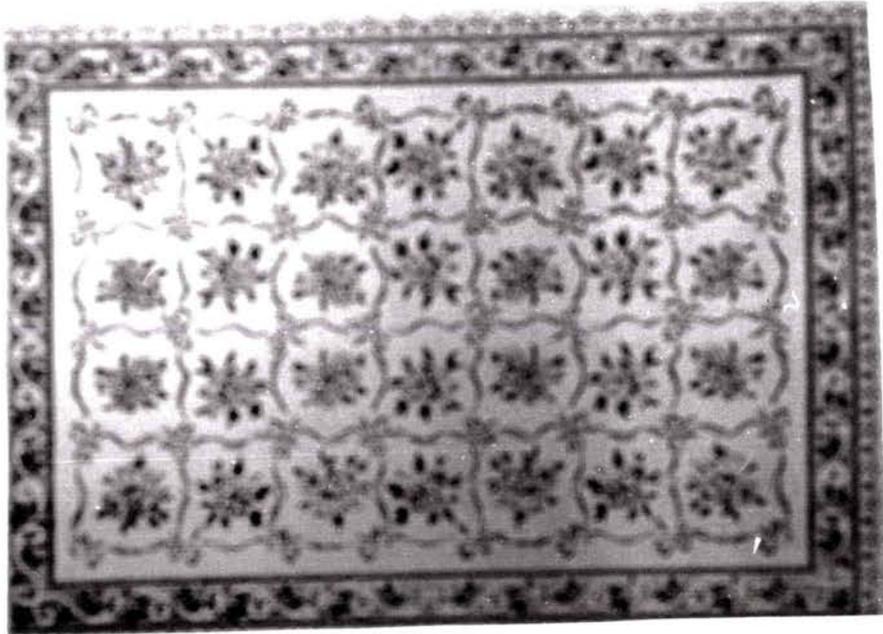


Figure II-11: image un peu floue

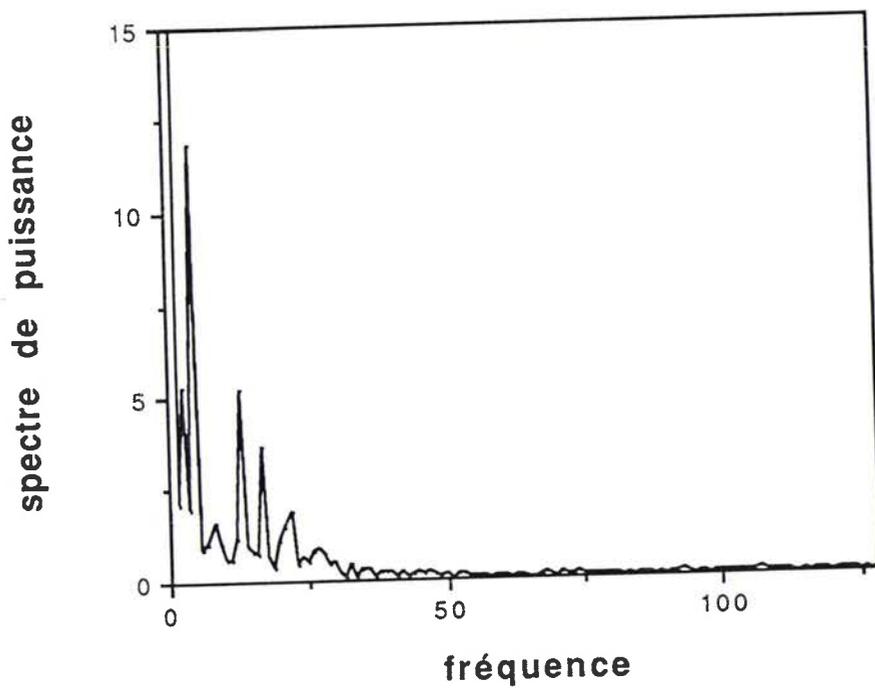


Figure II-12: spectre de puissance d'une image un peu floue

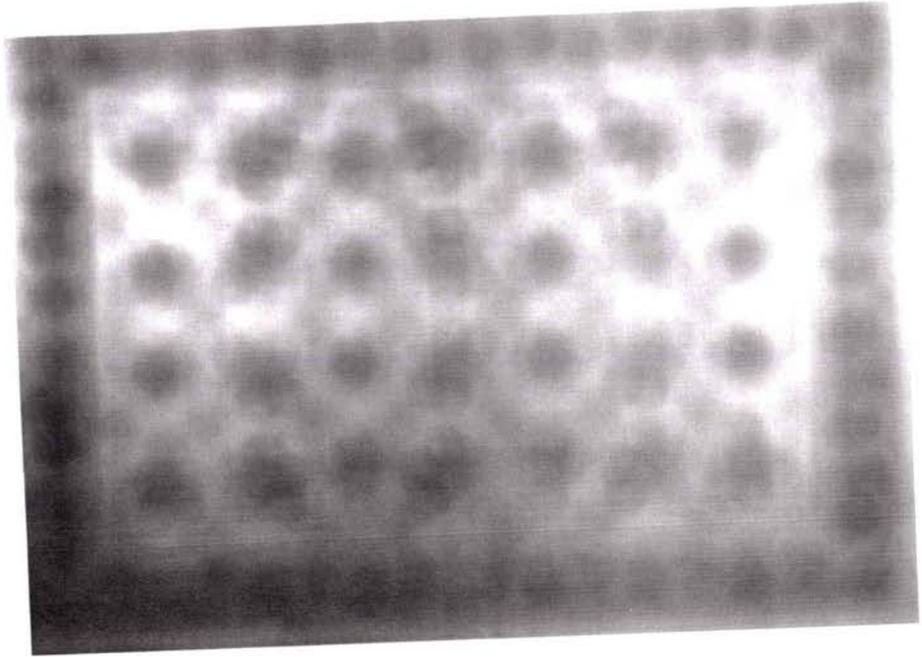


Figure II-13 : image floue

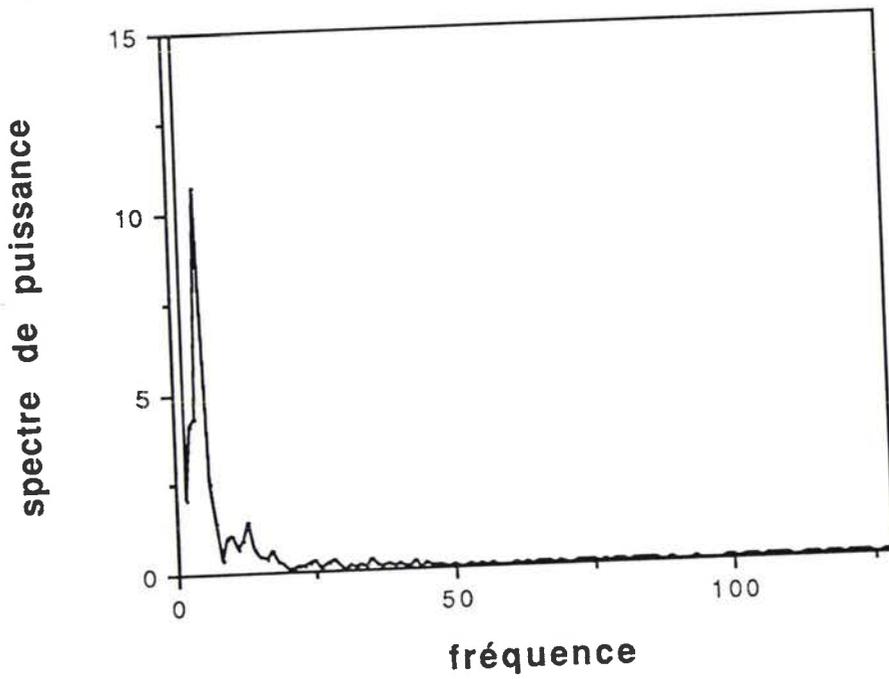


Figure II-14 : spectre de puissance d'une image floue

Par conséquent, pour chercher la position de l'objectif qui correspond à l'image la plus nette il suffit de trouver la position qui correspond à l'intensité maximale de la somme des coefficients du spectre de puissance de l'image dans le domaine des hautes fréquences.

Si on prend l'exemple de la figure II-10 il suffit de filtrer le spectre de l'image pour ne laisser passer que la bande de fréquences qui nous intéresse, c'est à dire entre u_1 et u_2 . Alors l'image la plus nette est celle qui correspond à la valeur maximale de la somme des coefficients du spectre de puissance entre les deux fréquences u_1 et u_2 .

L'expérience suivante a été réalisée au laboratoire ; Un réglage de la lumière a été effectué pour avoir l'image de la figure II-15 nette sur l'écran d'un moniteur vidéo. Ensuite l'objectif de la caméra a été tourné à fond à gauche de façon à avoir une image floue sur l'écran de visualisation. On tourne l'objectif d'une petite variation constante vers la droite, on calcule le spectre de puissance d'un certain nombre de points puis on additionne les coefficients compris entre deux bornes u_1 et u_2 (ce qui revient à intégrer le spectre de puissance entre ces deux bornes) et ce qu'on appellera dans la suite paramètre de focalisation, on obtient une valeur qu'on stocke dans une matrice A. Une fois qu'on est arrivé au bout de course de l'objectif, nous avons tracé la courbe de la figure II-16 correspondant à la matrice A. Cette courbe montre qu'à partir d'un certain seuil on obtient une image (voir l'image de la figure II-17) qui est plus ou moins nette entre O_1 et O_2 .

Précisons tout d'abord le fait que l'intensité de la courbe ci-dessus ne correspond pas à une intégrale sur l'image complète, mais plutôt sur une partie de l'image qui dans notre cas correspond à une demi ligne de 256 pixels. Le nombre de points pris ensemble peut être choisi et ceci suivant l'application comme nous le verrons plus loin.

Si l'image représente un objet en relief (en trois dimensions), on pourrait avoir plusieurs plans différents (parallèles au plan de l'image) correspondant à des images nettes. Chaque image correspond à un plan de profondeur précise qui contient un certain nombre de points de l'objet.

Pour rechercher un plan d'image précis il suffit d'effectuer les calculs pour un ensemble de points appartenant à ce plan.

Si on retourne à la courbe II-17 on remarque que la position O correspond à un maximum global pour la fonction intégrale, ce qui correspond à la bonne mise au point de l'image, c'est-à-dire à la position de l'objectif qui donne l'image la plus nette.

Remarques :

La bande de fréquences $[u_1, u_2]$ a été choisie à partir du spectre de puissance d'une image nette (figure II-10) ; c'est la bande hautes fréquences où le spectre admet des valeurs importantes. Cette même bande de fréquences pourrait être utilisée pour toutes les images traitées, mais un choix d'une bande appropriée par morphologie d'image permet d'avoir une courbe de focalisation avec un maximum plus prononcé.

Le seuil correspond à peu près à la moitié de la valeur du maximum dans la courbe d'autofocalisation. C'est la valeur à partir de laquelle on obtient une image plus ou moins floue.

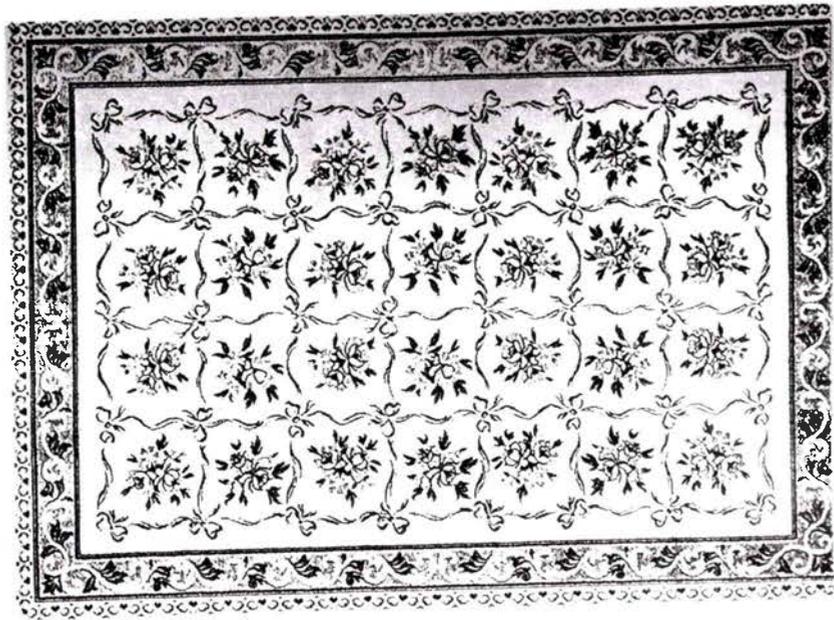


Figure II-15 : image nette

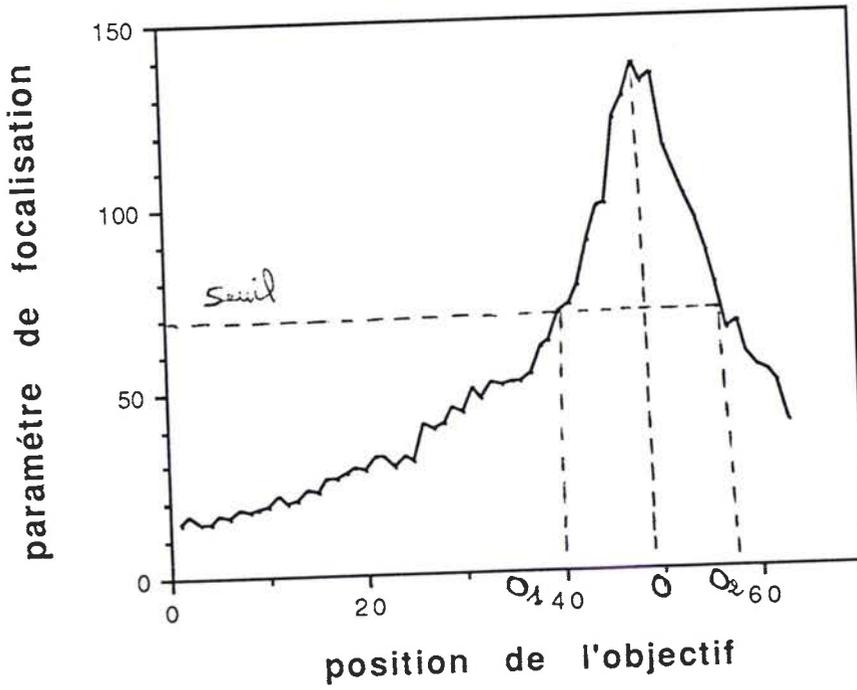


Figure II-16 : courbe d'auto-focalisation.

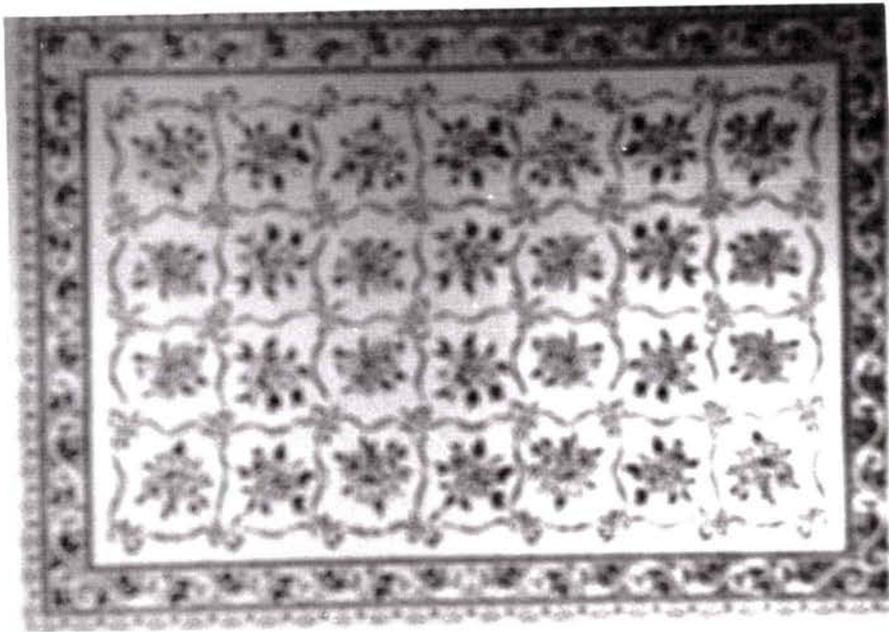


Figure II-17 : image un peu floue ; au-dessus du seuil.

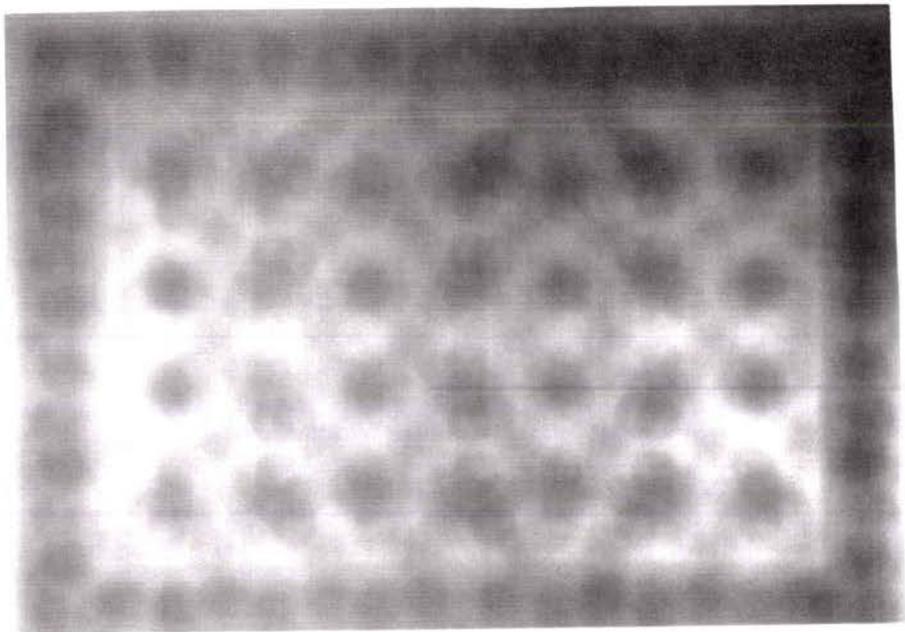


Figure II-18 : image complètement floue ; au-dessous du seuil.

3.2 - Transformation discrète en cosinus :

La transformation discrète en cosinus est définie :

- Pour les signaux bidimensionnels :

$$F(0, 0) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(m, n)$$

$$F(u, v) = \frac{1}{2N^3} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n) \cos[\pi m(2u+1)] \cos[\pi n(2v+1)]$$

Pour $u=1,2,\dots, N-1$ et $v=1,2,\dots, N-1$.

- Pour les signaux unidimensionnels :

$$F(0) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{m=0}^{N-1} f(m)$$

$$F(u) = \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{m=0}^{N-1} f(m) \cos(\pi u(2m+1)/2N)$$

Pour $u=1,2,\dots, N-1$.

La transformée discrète en cosinus inverse est définie par :

- Pour les signaux bidimensionnels :

$$f(m,n) = \frac{1}{N} F(0,0) + \frac{1}{2N^3} \sum_{m=1}^{N-1} \sum_{n=1}^{N-1} F(u,v) \cos[\pi u(2m+1)] \cos[\pi v(2n+1)]$$

Pour $m=0,1,2,\dots, N-1$ et $n=0,1,2,\dots, N-1$.

- Pour les signaux unidimensionnels :

$$f(m) = \frac{1}{\sqrt{N}} F(0) + \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{m=0}^{N-1} F(u) \cos(\pi u(2m+1)/2N)$$

Pour $m=0,1,2,\dots,N-1$.

Remarque : Du fait de la séparabilité du noyau de la transformation 2-D en un produit de transformations 1-D, la transformation TDC 2-D s'effectue par la mise en séquence de deux séries de transformations TDC 1-D. Chaque ligne du bloc d'origine subit une transformation TDC 1-D, et la matrice ainsi obtenue, formée des lignes précédentes transformées, est ensuite transformée colonne par colonne, d'où la transformation en TDC 2-D.

Dans la suite les deux nouveaux critères utilisant la TDC que nous avons mis au point l'un concernant la caractérisation de morphologies et l'autre l'auto-focalisation seront exposés [CHA-91].

- Caractérisation de morphologies par la transformée discrète en cosinus :

Une séparation des blocs de textures différentes peut se faire en utilisant la transformation TDC. En effet, la TDC fournit un certain nombre d'indications sur l'image analysée. Sachant que $f(x)$ représente l'amplitude du signal au point x , $|F(u)|$ représente la valeur absolue de la TDC de l'image. Cette courbe est directement reliée à la morphologie de la structure à analyser. En particulier dans le cas d'une structure très fine on aura une courbe très étalée (figure II-20), alors que dans le cas d'une structure grossière, la courbe sera beaucoup plus resserrée (figure II-22).

Les courbes des figures II-20 et II-21 ont été obtenues dans les mêmes conditions que ceux des figures II-6 et II-8 ce qui nous permettra dans la suite de comparer les performances des deux transformées.

Dans le quatrième chapitre nous utilisons la TDC dans un système de reconnaissance de formes.

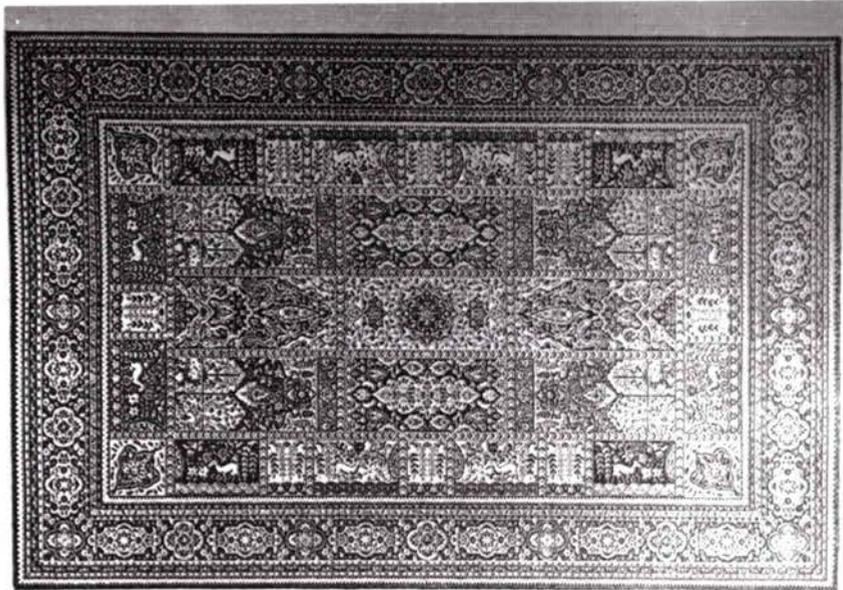


Figure II-19 : image nette d'une structure fine

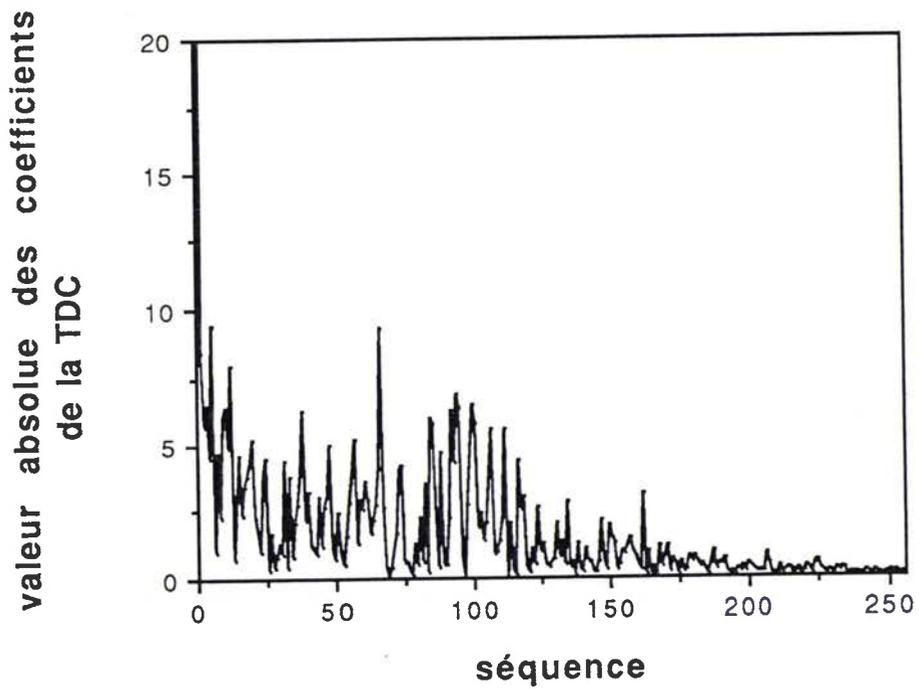


Figure II-20 : valeur absolue de la TDC d'une structure fine

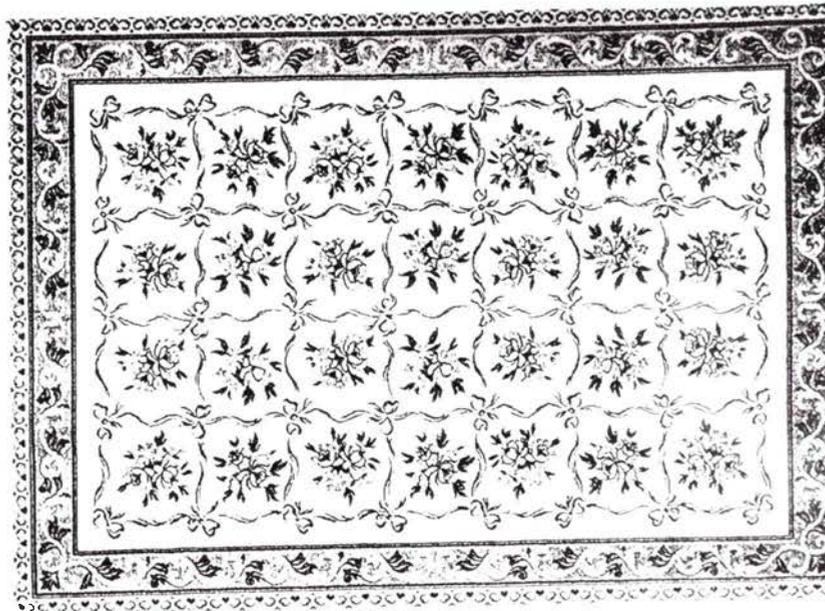


Figure II-21 : image d'une structure grossière

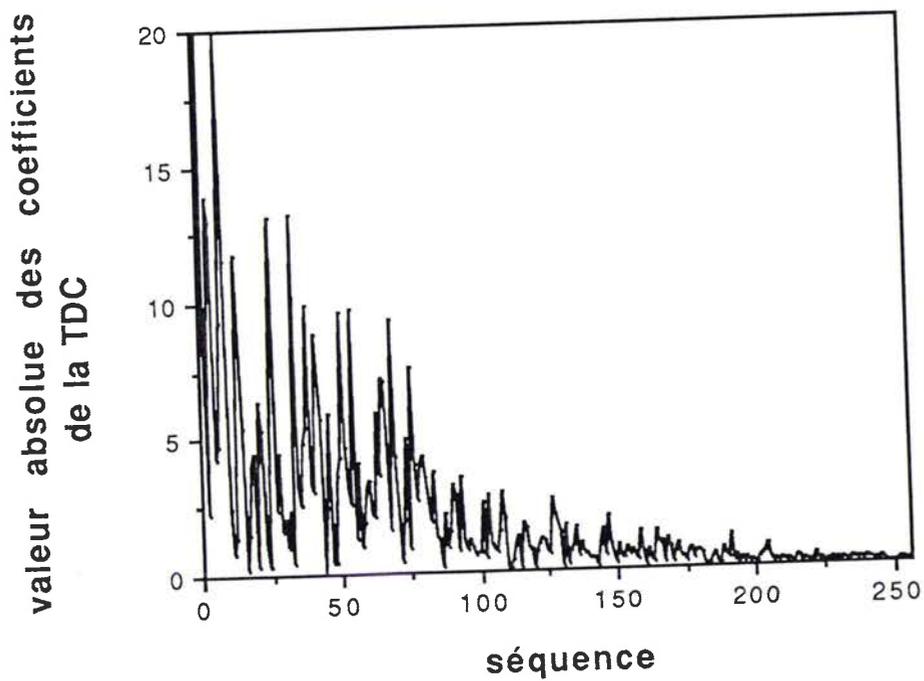


figure II-22 : valeur absolue de la TDC d'une structure grossière

- Critère d'auto-focalisation par transformée discrète en cosinus :

On a représenté les courbes donnant la valeur absolue des coefficients de la TDC dans le cas d'une image nette figure II-24, une image un peu floue figure II-26 et une image floue figure II-28.

En comparant les trois courbes, nous pouvons conclure que l'image est d'autant plus nette qu'on a des coefficients plus importants dans les hautes fréquences.

Si on considère, par extension de la transformée de Fourier, qu'on peut associer des fréquences pures aux coordonnées i des coefficients de la TDC, bien qu'en toute rigueur cela ne soit pas exactement vrai, on retrouve les mêmes interprétations des courbes que pour la transformée de Fourier.

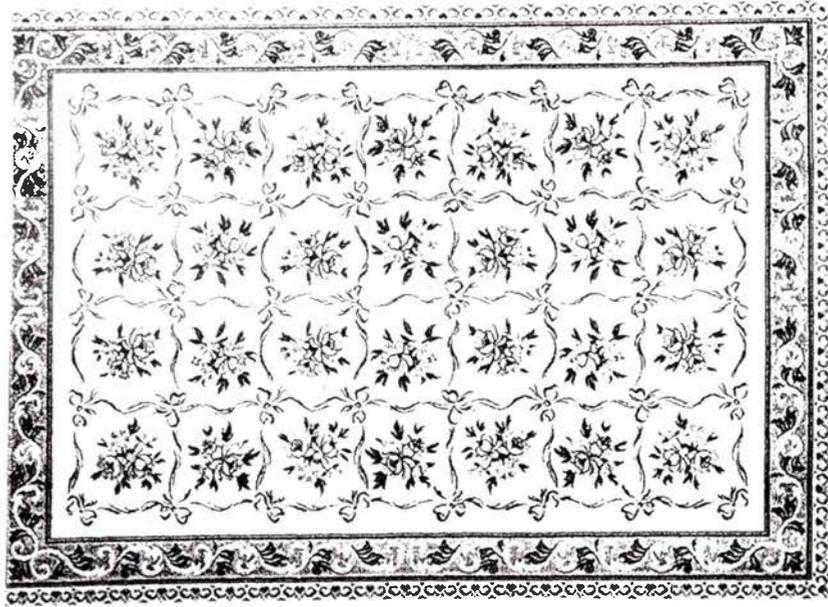


Figure II-23 : image nette

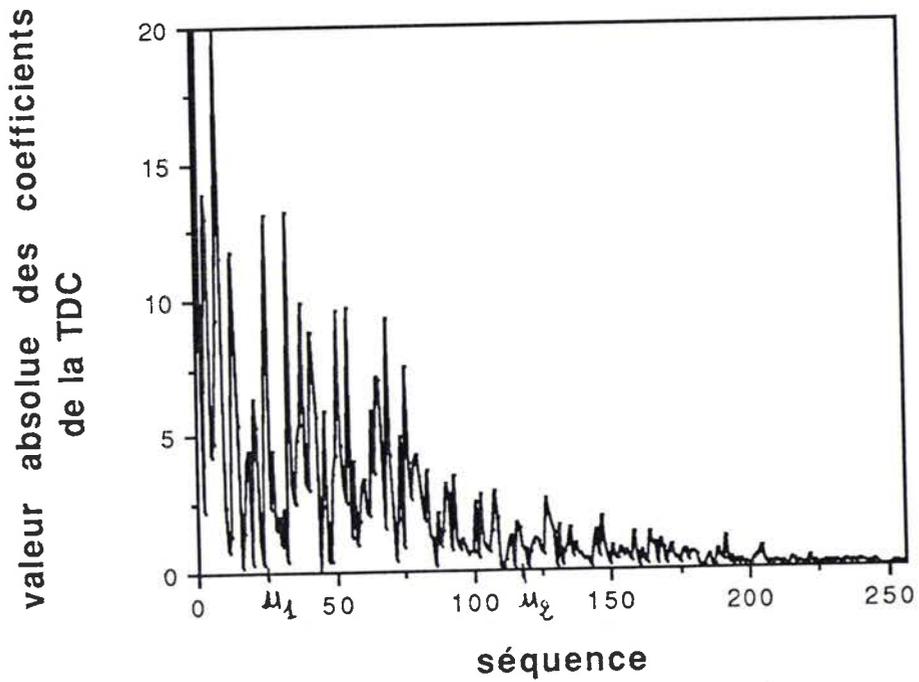


Figure II-24 : valeur absolue de la TDC d'une image nette.

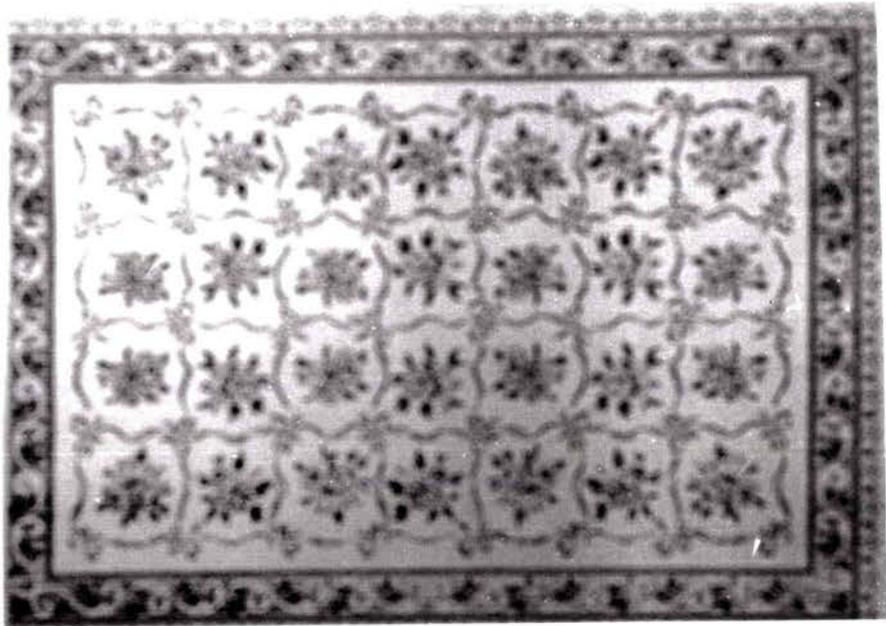


Figure II-25 : image un peu floue

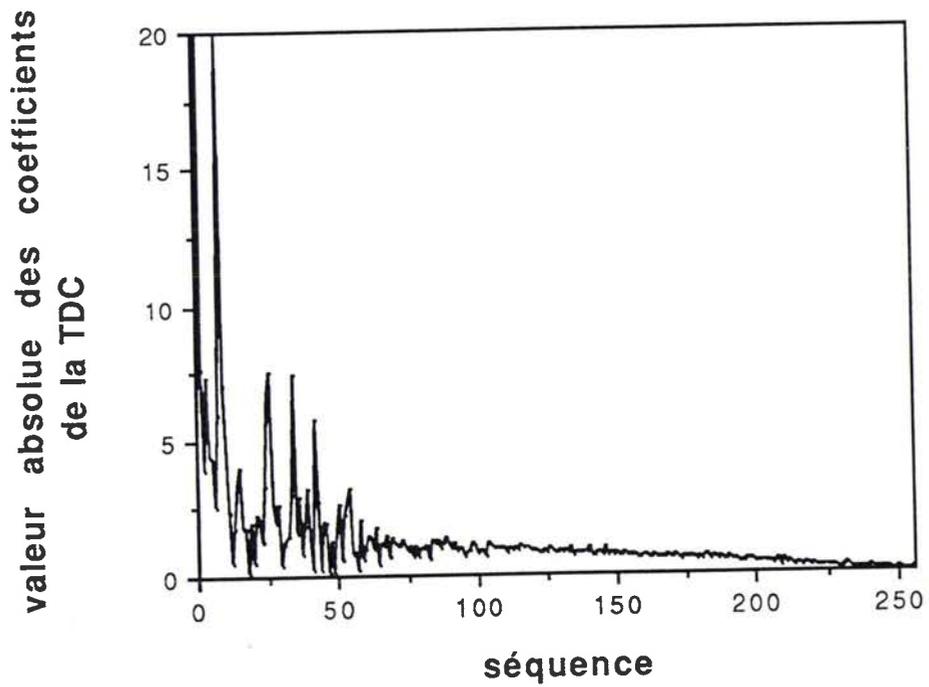


Figure II-26 : valeur absolue de la TDC d'une image un peu floue

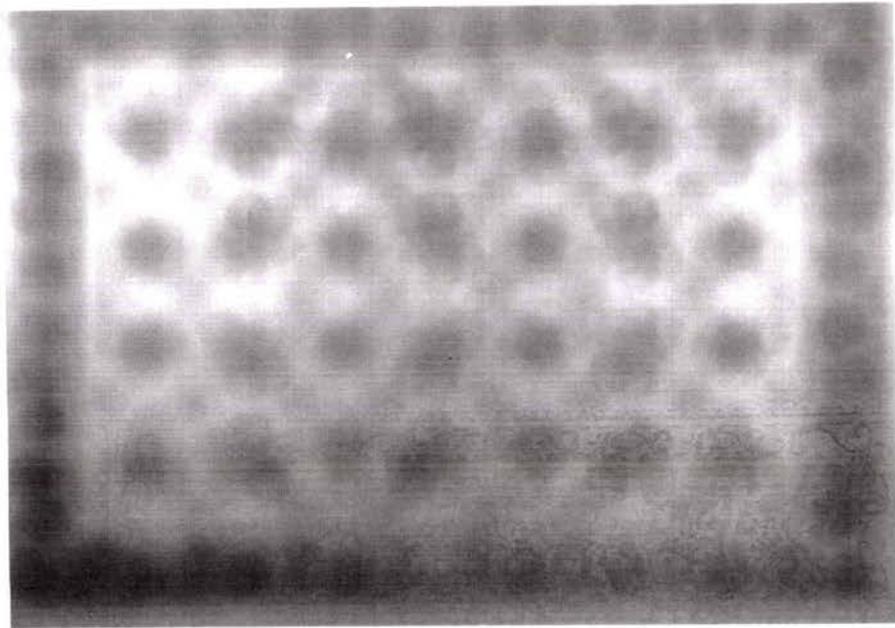


Figure II-27 : image floue

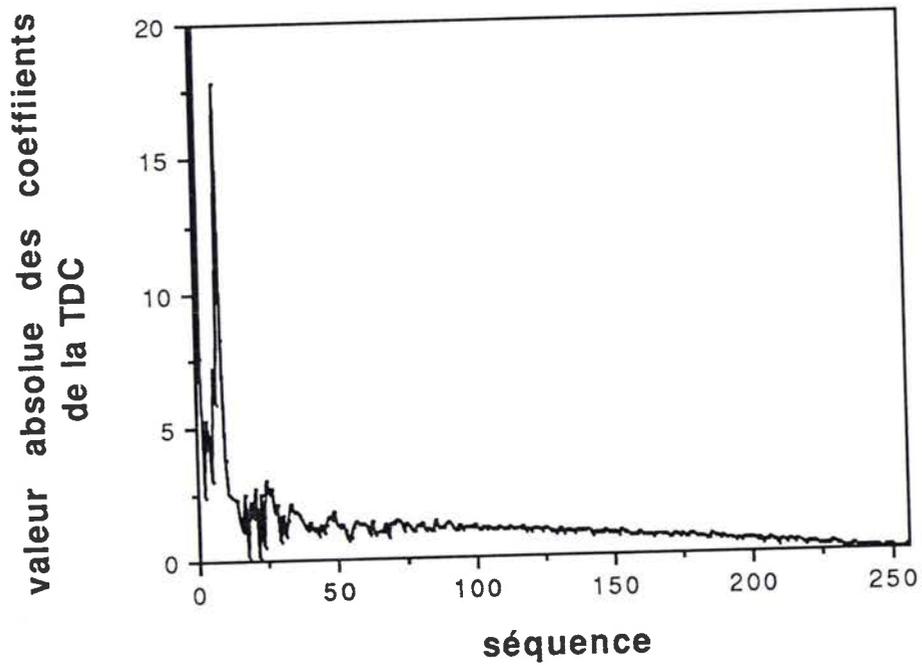


Figure II-28 : valeur absolue de la TDC d'une image floue

Pour trouver la courbe d'auto-focalisation, nous avons procédé de la même manière que pour la transformée de Fourier. Au lieu de calculer le spectre de puissance nous avons calculé la valeur absolue de la TDC et nous avons intégré le signal entre u_1 et u_2 . On a obtenu la courbe II-30.

Dans cette courbe le paramètre de focalisation correspond à la sommation de la valeur absolue des coefficients de la TDC de rang compris entre 50 et 150. Le choix du rang des coefficients à additionner sera éclaircie dans le paragraphe 3.4 de ce chapitre.

On a tracé ici la courbe d'auto-focalisation de la TDC en utilisant la même image de la TFD et dans les mêmes conditions on a obtenu la courbe suivante :

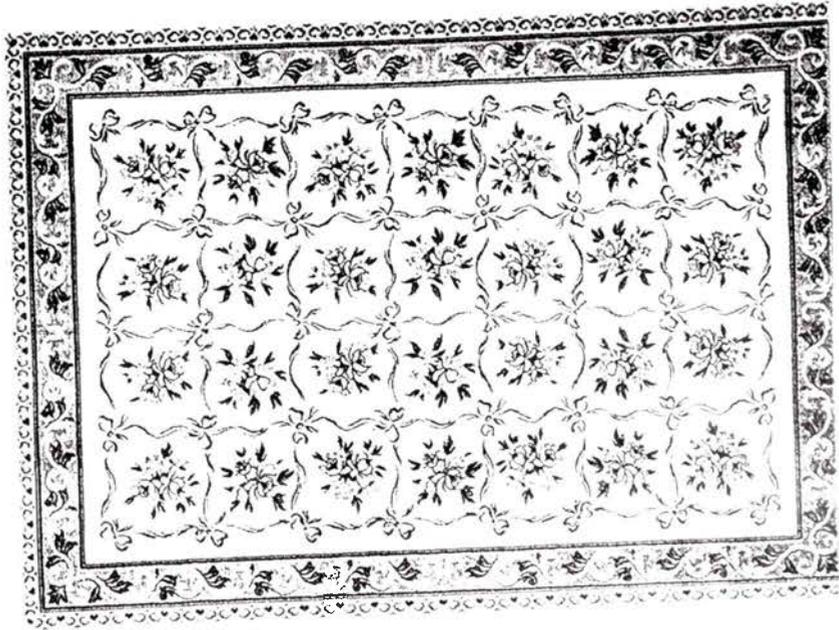


Figure II-29 : image nette

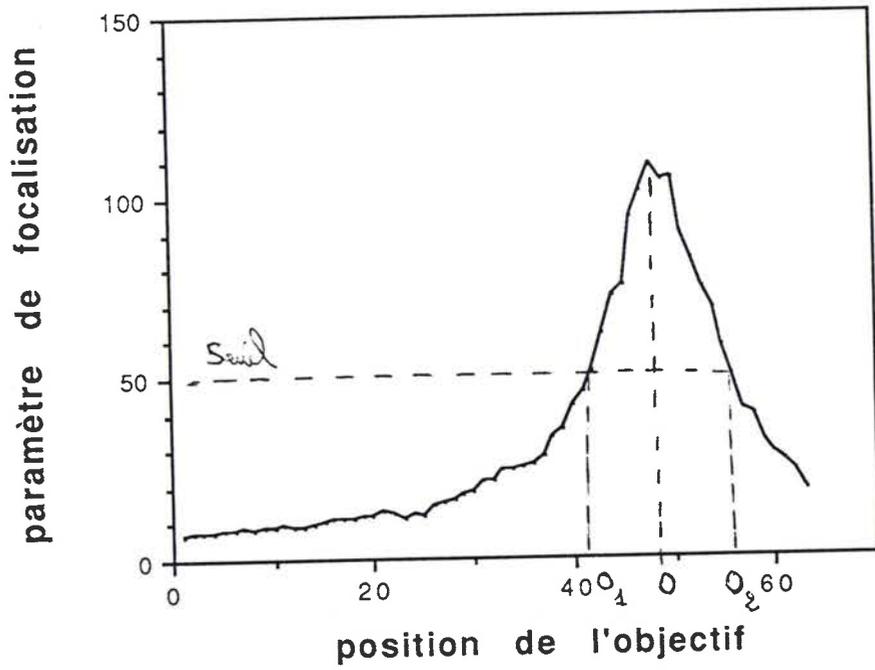


Figure II-30 : courbe d'auto-focalisation.

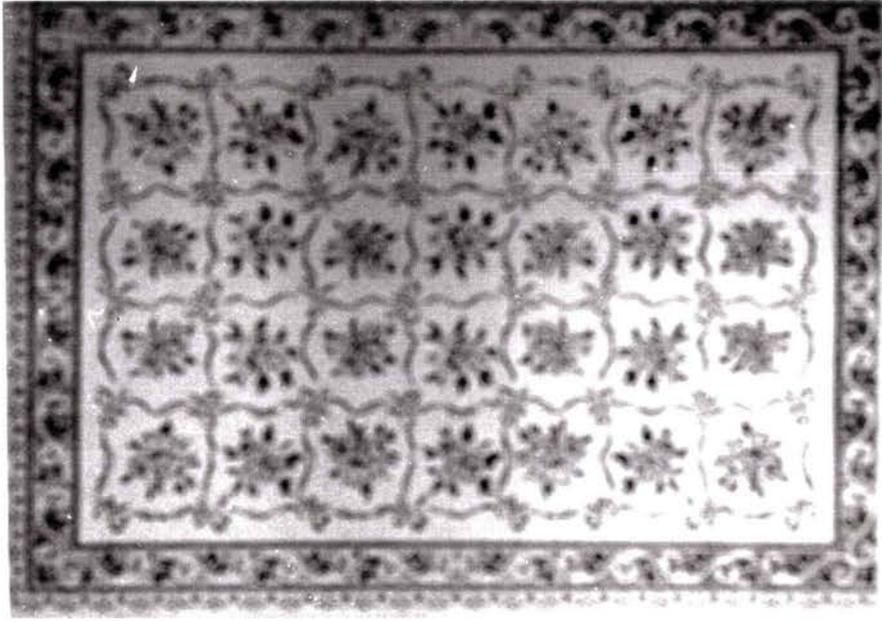


Figure II-31 : image un peu floue ; au-dessus du seuil.

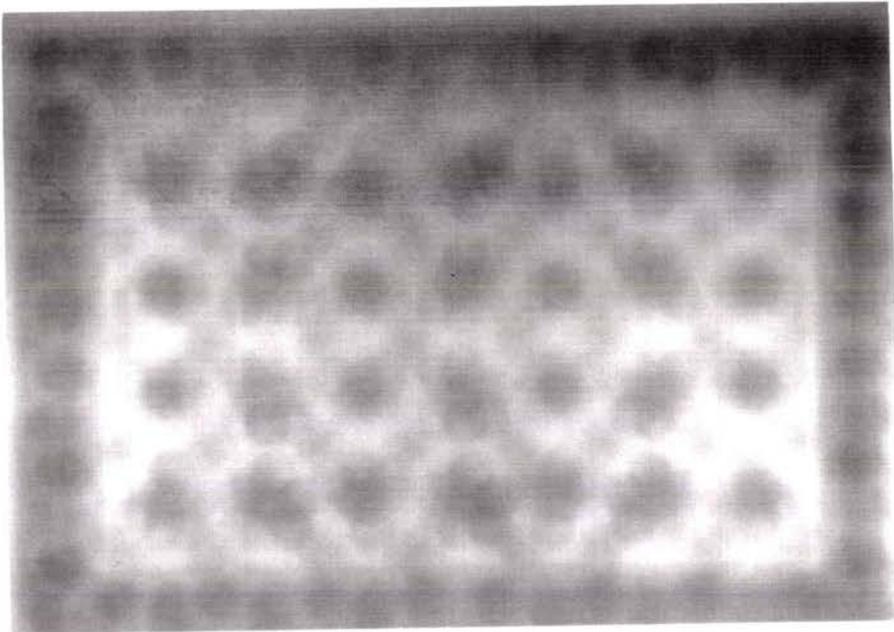


Figure II-32 : image complètement floue ; au-dessous du seuil.

3.3 - Comparaison entre les deux transformations :

Parmi les transformations unitaires connues actuellement et pour lesquelles il existe des algorithmes de transformation rapide, la transformation discrète en cosinus semble la meilleure en terme de capacité de concentrer l'énergie du signal sur un nombre réduit ($M < N$) de coefficients. La raison est que les vecteurs de base de cette transformation sont très voisins des vecteurs propres de la transformation de KARHUNEN-LOEVE (TKL), laquelle est considérée comme optimale [AHM-74, AHM-75].

La figure II-33 montre l'évolution de l'énergie des coefficients transformés en fonction de leur rang pour les transformations unitaires suivantes effectuées sur les vecteurs de dimension $N = 16$:

- HAAR.
- WALSH-HADAMARD
- FOURIER
- TDC
- KARHUNEN-LOEVE (avec $p = 0.95$)

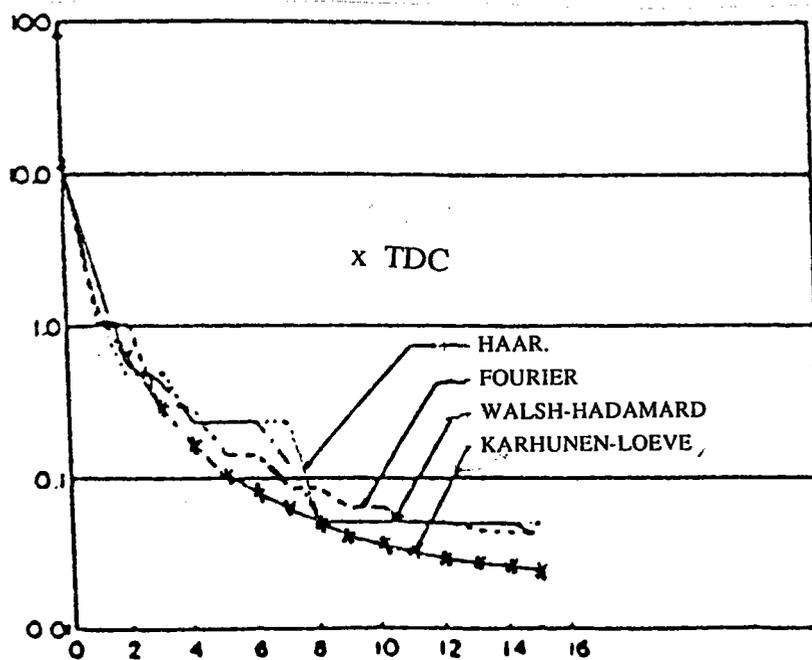


Figure II-33 : évolution de l'énergie des coefficients transformés en fonction de leur rang.

La décroissance de l'énergie des coefficients transformés est tout à fait similaire pour les deux dernières transformations (TDC et TKL), et elle est plus rapide que celles correspondant aux autres transformations.

- Algorithme de transformation de Fourier rapide :

Depuis son établissement en 1965 par COOLEY et TUKEY [COO-65], divers algorithmes de transformation de Fourier rapide (FFT fast Fourier transform) ont été proposés en vue d'accélérer les calculs dans l'algorithme initial.

Le nombre d'additions complexes (nbreA) est sensiblement supérieur d'un facteur multiplicatif 1/2 à celui des multiplications complexes (nbreM), comme le montre la formule ci-dessous ;

$$\text{nbreA} = M \log M$$

$$\text{nbreM} = \frac{M}{2} \log M$$

- Algorithmes de transformation discrète rapide en cosinus :

Plusieurs méthodes de calcul rapide de la transformation discrète en cosinus ont été proposées.

- Méthode de CHEN (1977) :

La méthode proposée par CHEN [CHE-77] est basée sur une propriété de décomposition récursive de la matrice de transformation, permettant de construire le vecteur transformé à partir du vecteur du signal image.

$$\text{nbreA} = \frac{3M}{2} (\log M - 1) + 2$$

$$\text{nbreM} = M \log M - \frac{3M}{2} + 4$$

- Méthode de VETTERLI et NUSSBAUMER (1984) :

Cette méthode [VET-84] permet de calculer de manière efficace la transformation discrète en cosinus (TDC) et la transformation de Fourier discrète (TFD). Les deux transformations sont liées dans la mesure où une transformation TFD de dimension M peut être calculée à partir de deux transformations TDC de dimension M/4 et qu'une transformation TDC de dimension M est obtenue à partir d'une transformation TFD de dimension M et de quelques opérations arithmétiques supplémentaires.

$$\text{nombreA} = \frac{M}{2} [3 \log M - 2] + 1$$

$$\text{nombreM} = \frac{M}{2} \log M$$

- Méthode de LEE (1984) :

Cette méthode apparue récemment [LEE-84], utilise dans son principe une décomposition analogue à celle de COOLEY-TUKEY pour la transformation de Fourier rapide.

$$\text{nombreA} = \frac{M}{2} [3 \log M - 2] + 1$$

$$\text{nombreM} = \frac{M}{2} \log M$$

- Conclusion :

L'analyse des trois méthodes de calcul rapide de la transformation discrète en cosinus que nous venons de présenter montre qu'en terme de réduction du nombre d'opérations arithmétiques nécessaires au calcul de la transformation et, plus encore, en considérant plus particulièrement les opérations de multiplications, l'algorithme de VETTERLI et NUSSBAUMER et celui de B.G. LEE sont similaires et assez supérieurs à celui de CHEN. En termes de facilité et économie de réalisation, celui de B.G. LEE a un graphe plus régulier, surtout pour les étages pipeline comportant les opérations de multiplications. Aussi, parmi les trois méthodes que nous avons considérées, c'est incontestablement celle de B.G. LEE qui semble la plus prometteuse pour une réalisation matérielle.

Enfin, dans l'optique du développement d'un opérateur de transformation TDC sur des blocs 2-D de points images, il ne faut pas négliger les possibilités qu'apportent les architectures systoliques où l'accent est mis sur la simplicité et la régularité de distribution et d'interconnection des processeurs arithmétiques élémentaires plutôt que sur la réduction de leur nombre, ce qui est généralement une propriété intéressante pour la conception de circuits VLSI. Des architectures systoliques de type à maille hexadécimale ont été étudiées, en particulier pour la transformation TDC [BOZ-85].

La transformation discrète en cosinus permet de transformer une série de points réels en une autre série de points réels de même longueur. Elle semble être mieux adaptée aux traitements d'images que la transformée de Fourier. En effet, le temps de calcul est inférieur dans le cas de la TDC comparé à celui de la TFR, puisque les données traitées ne comportent que des valeurs réelles.

Dans le tableau ci-dessous nous présentons un certain nombre de processeurs de calcul rapide de la TDC et de la TFD [DAN-].

Processeur	TDC	FFT
L 64730 LSI LOGIC	données sur 12 bits vitesse de 30 ou 40 Mhz pixel	
Floating point DSP Board Bun Brown		1024 "complexe TFR" 3,04 ms
Processeur vectorielle DT 7020 Data Translation		1024 "complexe TFR" 23 ms 1024 "réel TFR" 13 ms 128x128 "réel TFR" 0,39 s 512x512 "réel TFR" 6,29 s
LH 9124 Sharp Electronics	oui	1024 "complexe TFR" 1s
TMC 2311 TRW LSI	8x8 pixels 15 MHz	
TMC 2310 TRW LSI		16 bits 20 Mhz 1024 complexe TFR 514 μ s avec des résultats intermédiaires sur 19 bits
VSP Silicon & Software Systems	oui	oui vitesse de l'horloge 27 MHz

Figure II-34 : liste des processeurs de calcul de la TDC et la TFD.

3.4 - Détermination de la bande passante :

L'allure des variations de tension à la sortie d'un tube analyseur lors de l'analyse d'une image, comportant des blancs, des noirs et des gris de différentes nuances. les différents tons de gris étant distribués dans la largeur de l'image de façon tout à fait erratique. Remarquons dès maintenant que pour une plage unie, la tension fournie par le tube analyseur ne varie pas, ce qui correspond à la fréquence zéro. Remarquons également que l'image peut présenter une transition brutale allant du blanc au noir absolu : dans ce cas, le signal correspondant dit transitoire, à front très raide, comporte, d'après la loi de décomposition en série de Fourier, une gamme de fréquences s'étendant jusqu'à l'infini.

Pour calculer la bande de fréquence acquise pour transmettre les transitions rapides du signal vidéo, plaçons nous dans le cas le plus défavorable : celui où l'image est constituée par une suite de bandes verticales, alternativement noires et blanches.

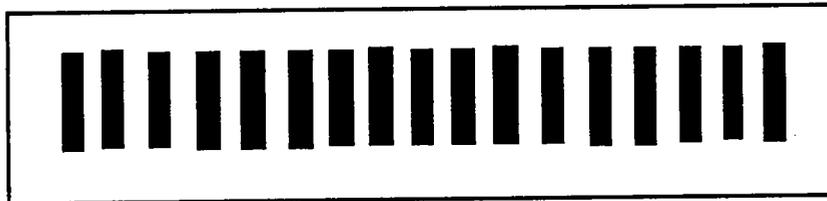


Figure II-35 : suite de bandes verticales, alternativement noires et blanches.

Nous supposons également que la définition horizontale (c'est à dire le nombre de points élémentaires par unité de longueur, sur une même ligne) est égale à la définition verticale (c'est à dire le nombre de lignes par unité de longueur), et que les temps de retour ont une valeur négligeable ; prenons le cas du balayage à 625 lignes [PEL-88].

$$\text{nombre de points élémentaires par ligne} = \text{nombre de lignes} \times \frac{4}{3} \approx 830$$

Si ces 830 points élémentaires sont alternativement noirs et blancs, le signal vidéo correspondant aura, théoriquement, l'allure d'un signal carré de fréquence de récurrence :

$$830/2 \times 625 \times 25 \approx 6,5 \text{ MHz}$$

En réalité il y a un certain nombre de lignes qui ne sont pas utilisées au cours d'une image (pendant le retour de trame et au début de chaque trame) ainsi la définition verticale réelle est diminuée de 10% environ par rapport à la valeur nominale du nombre de lignes. En plus, la définition horizontale pourrait être légèrement inférieure à la définition verticale et réduire la fréquence théorique.

Tout ceci nous a mené à choisir une bande passante inférieure à 6 MHz. Comme en TV ce résultat a été confirmé par l'expérience. Tous les spectres de puissance mesurés sur des images réelles ont une bande passante ne dépassant pas les 5 MHz. L'image haute fréquence est la partie de l'image qui contient les hautes fréquences du spectre de l'image complète. Mais la bande de fréquence utile dans laquelle on intègre la fonction de pondération peut être limitée à un domaine de fréquences inclus dans le domaine de l'image haute fréquence ; cette bande utile peut être choisie selon la morphologie de la structure à étudier c'est-à-dire correspondre au domaine des hautes fréquences où le spectre de puissance admet un maximum.

3.5 - Conclusion

La TDC semble être plus avantageuse que la TFR en terme de concentration de l'énergie des images pour la reconnaissance de formes. La rapidité de calcul des algorithmes de la TDC et leur architecture laissent espérer le développement de processeurs dédiés.

D'autre part la TDC demande moins de temps pour le calcul de la valeur du paramètre de focalisation que la TFR, en effet, pour la TDC il suffit d'additionner la valeur absolue d'un certain nombre de coefficients réels, par contre pour la TFR il faut calculer le module des valeurs complexes avant de les additionner.

Pour une réalisation matérielle, la TFR peut être réalisée avec des composants analogiques [CHA-88,CHA-91]. En réalisant un circuit passe bande pour ne laisser passer que les fréquences qui nous intéressent, ensuite le signal est intégré par un circuit analogique adéquat avant d'être numérisé et traité par un ordinateur. Par contre la TDC ne peut être réalisée qu'avec des composants numériques ce qui ne permet pas un traitement aussi rapide que la TFR.

4 - Conclusion :

Dans ce chapitre, après une brève revue bibliographique concernant les méthodes d'auto-focalisation, deux nouveaux critères ont été développés pour la reconnaissance de morphologies et la focalisation des caméras.

L'avantage des méthodes développées est qu'elles sont faciles à mettre en œuvre et rapides dans leur fonctionnement grâce à l'existence d'algorithmes rapides de calcul des coefficients de ces transformations. La facilité de programmation de ces algorithmes permet une modification facile du système pour l'adapter aux images traitées.

Le critère de mise au point décrit ci-dessus peut être utilisé pour la mise au point d'un appareil optique en appliquant le critère à un certain nombre de points de l'image qui peuvent être choisis selon l'application. Aussi il pourrait être utilisé pour déterminer la forme d'un objet représenté en trois dimensions. En effet si on applique cette méthode à un petit nombre de points adjacents de l'image on peut déterminer la profondeur de ce point, autrement dit la distance entre le point et le capteur d'image. En utilisant un traitement informatique sur les différentes données concernant la profondeur de tous les points, la forme de l'objet peut être représentée. Les performances de ce calcul dépendent bien entendu de la qualité du traitement informatique.

Une autre application qui pourrait être développée, c'est la détection de contours à l'aide d'un seuil et d'une poursuite des points de l'image où le module est important.

Dans le troisième chapitre la mesure en trois dimensions à partir d'auto-focus est proposée.

TROISIEME CHAPITRE

III) - Proposition de mesure en trois dimensions à partir d'auto-focus.

1 - Introduction :

Les mesures 3-D par caméra demandent la connaissance et le contrôle d'un certain nombre de paramètres pour permettre une bonne précision des mesures [BAT-85, BLA-89, MOR-89]. Dans la suite les différents paramètres et leur influence sur les mesures seront abordés.

2 - Principe :

La première étape pour un système de métrologie par vision consiste à faire la mise au point de la caméra en utilisant l'une des méthodes d'auto-focus citées dans le deuxième chapitre. Une fois la mise au point effectuée, la distance objet caméra peut être déterminée en utilisant la formule de Descartes (figure III-1)[MÖL-88, TAT-75].

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{P} + \frac{1}{P'} \quad (1)$$

Où f : distance focale de l'objectif.

P : distance centre optique - objet.

P' : distance centre optique - image.

La valeur du grandissement est calculée par la formule suivante :

$$g = \frac{f}{p-f} \quad (2)$$

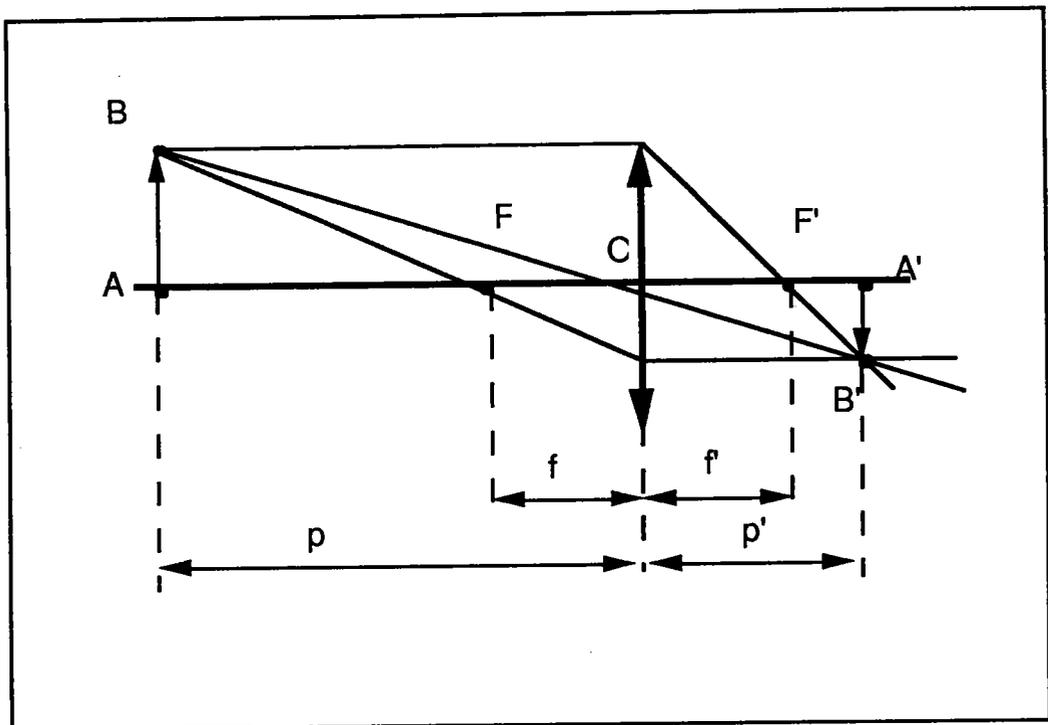


Figure III-1 : image du point B par l'objectif.

Si on n'utilise pas de zoom la distance focale (f) est fixe, elle est inscrite sur l'objectif, dans le cas contraire la distance focale varie comme une fonction continue dans un intervalle qui est également inscrit sur le zoom.

La distance (p') peut être calculée à partir de l'angle de rotation de l'objectif, ce qui nous permet de calculer la distance centre optique-objet (p) en utilisant la formule (1).

Dans le cas d'une mise au point qui se fait par un déplacement rectiligne de l'objet par rapport à la caméra (exemple : microscope), (f) et (p') sont fixes et la valeur de (p) est connue.

On peut déjà remarquer que l'étape la plus importante de la métrologie en visionique constitue la mise au point faite par la caméra. En effet, toutes les mesures utilisent l'image fournie par la caméra.

On peut effectuer des mesures sur l'image et calculer les valeurs réelles et ceci en tenant compte de la valeur du grandissement et de la géométrie du capteur (cellules photosensibles).

Le problème majeur consiste à déterminer la bonne mise au point ; pour ceci les différents paramètres qui nous permettent de définir la précision de notre mesure et de la contrôler seront examinés.

Quand on fait la mise au point d'une caméra, on a une profondeur de champ qui est la zone dans laquelle l'objet peut se déplacer en gardant une image nette; c'est une conséquence de la profondeur du foyer : zone dans laquelle on peut déplacer les cellules photosensibles sans que la netteté de l'image présente de différence détectable par un système de mise au point. Les formules de profondeur de foyer et de profondeur de champ sont les suivantes [TAT-75] :

$$\text{profondeur de foyer : } \partial = \pm N e (1+g) \quad (3)$$

profondeur de champ :

$$\begin{aligned} x_a &= \frac{f^2}{x' - \partial} \\ x_b &= \frac{f^2}{x' + \partial} \end{aligned} \quad (4)$$

où $N = f/o$: nombre d'ouverture.

e : cercle de confusion.

g : grandissement.

o : diamètre de l'ouverture du diaphragme.

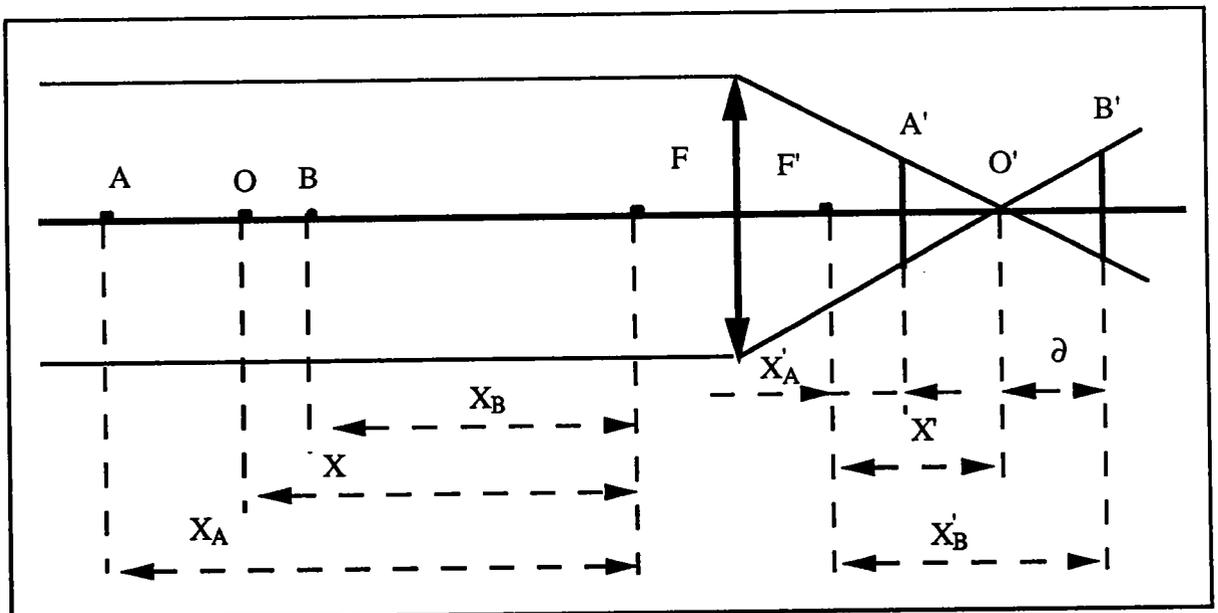


Figure III-2 : Profondeur de champ et profondeur de foyer.

Pour que les images de deux points soient séparées sur l'écran, il suffit qu'elles impressionnent deux cellules photosensibles adjacentes de la caméra. Le pouvoir séparateur varie donc suivant les dimensions des cellules photosensibles. On arrive actuellement, à mettre au point des cellules de quelques microns de dimension.

Pour calculer le pouvoir séparateur β d'un appareil de focale f utilisé avec des cellules de diamètre d on utilise la formule [TAT-75] :

$$\beta = 2d/f. \quad (5)$$

C'est le pouvoir séparateur qui détermine la valeur du cercle de confusion (c) si les deux détails sont contenus ensemble dans ce cercle on dit que la caméra ne distingue pas les deux détails. Le pouvoir séparateur varie avec le contraste et l'éclairement en effet pour séparer deux détails voisins il faut qu'il y ait un changement du niveau de gris en passant du premier au deuxième et ceci n'est possible que s'il y a un bon contraste entre les deux détails. Il ne faut pas oublier que la numérisation de l'image permet de passer d'un nombre de niveaux de gris infini à un nombre fini qui dépend de la résolution du convertisseur. Dans cette compression de niveaux de gris, si on n'a pas un bon contraste de l'objet on perd un grand nombre d'informations à la numérisation. Le nombre d'ouverture $N = f/O$, où O est le diamètre de l'ouverture du diaphragme. Quand l'objet s'approche de l'objectif, les cellules photosensibles s'éloignent de la focale, ce qui nous oblige, pour respecter la loi de Lambert qui dit que l'éclairement est proportionnel à l'inverse du carré de la distance, à augmenter le diamètre d'ouverture ce qui diminue la valeur du nombre d'ouverture.

Si on examine les courbes III-8 et III-10, qui correspondent à la même image mais prise avec des ouvertures du diaphragme différentes, on peut remarquer que l'image III-7 est plus nette que l'image III-9 bien qu'on ait dans les deux cas la même position de la lentille. En effet, les images III-3 et III-5 correspondent au même réglage de la lentille de l'objectif, ainsi que III-7 et III-9 correspondent au même réglage de la lentille de l'objectif qui donne une image moins nette que dans le premier cas.

[redacted] scientifique et technique de
 [redacted] avec l'entreprise et l'admin
 base
 aux discussions de 1987-88, et aux
 R, la base de rémunération d'un Pte
 netre.
 est appliquée à l'équipe d'encadreme
 Pte est attribuée. Cette rémunérati
 base (M), fixé annuellement par les ta
 r lequel sont prises les rémunérations
 proprement-dits : il provient du Men.
 semaine
 est déclaratif :
 age d'enseignants estime :
 fobal du travail, qui modulera M à + o
 nage de travail de chacun
 : la pratique actuelle d'encadrement o
 valeur par semaine pour un Pte, mais
 à la difficulté du Pte Intervient égalem

Figure III-3 : image nette avec une petite ouverture du diaphragme.

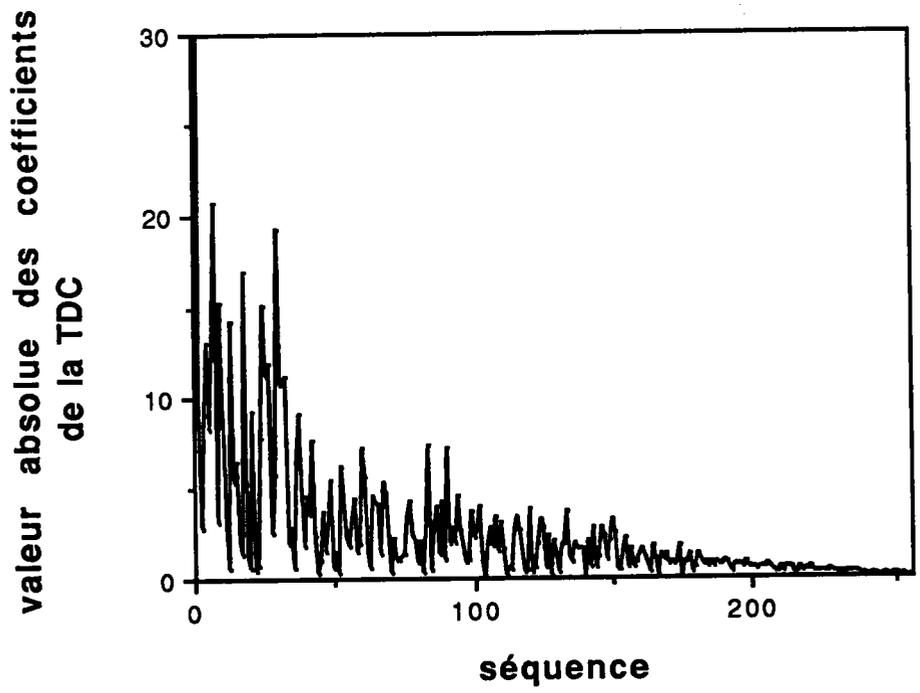


Figure III-4 : valeur absolue des coefficients de la TDC de l'image de la figure III-3.

[redacted] scientifique et technique de
 [redacted] avec l'entreprise et l'admin
 [redacted]
 base
 aux discussions de 1987-88, et aux
 K, la base de rémunération d'un Pte
 [redacted].
 [redacted] appliquée à l'équipe d'encadrement
 Pte est attribuée. Cette rémunération
 base (M), fixé annuellement par les ta
 [redacted]
 [redacted] sont prises les rémunérations
 [redacted] : il provient du Men.
 [redacted]
 [redacted] est déclaratif :
 [redacted] d'enseignants estime :
 [redacted] du travail, qui modifera M à + ou
 [redacted] de travail de chacun
 [redacted] : la pratique actuelle d'encadrement c
 [redacted] par semaine pour un Pte, mais
 [redacted] la détachés du Pte interviennent égalem

Figure III-5 : image nette avec une grande ouverture du diaphragme.

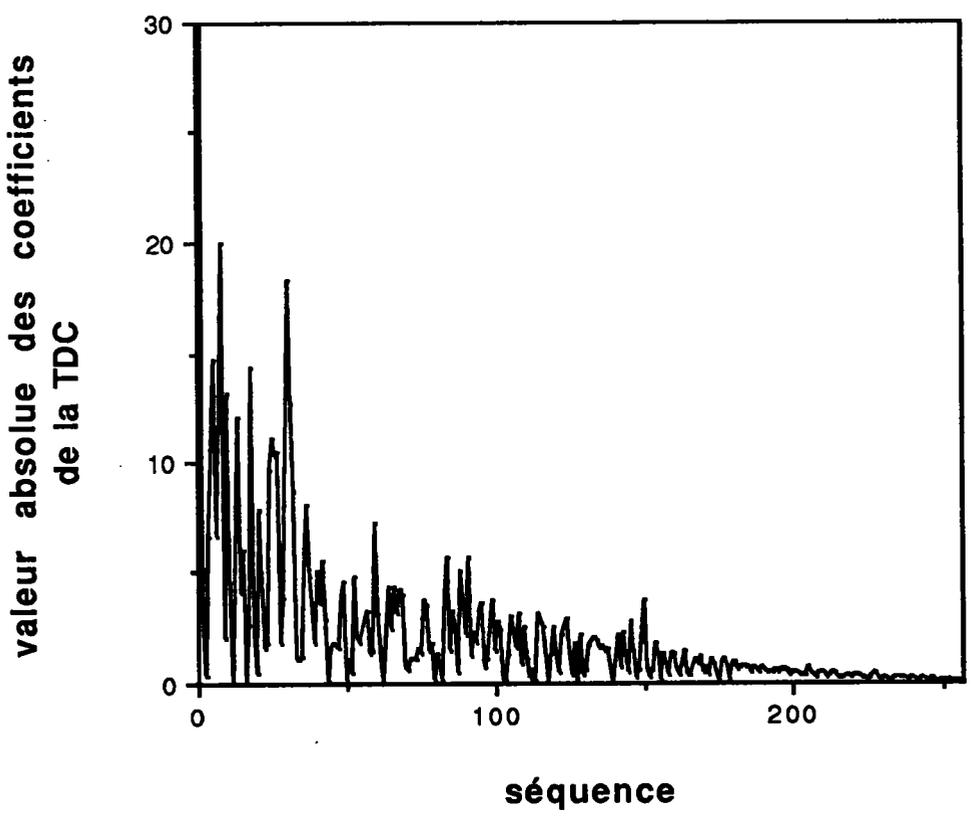


Figure III-6 : valeur absolue des coefficients de la TDC de l'image de la figure III-5.

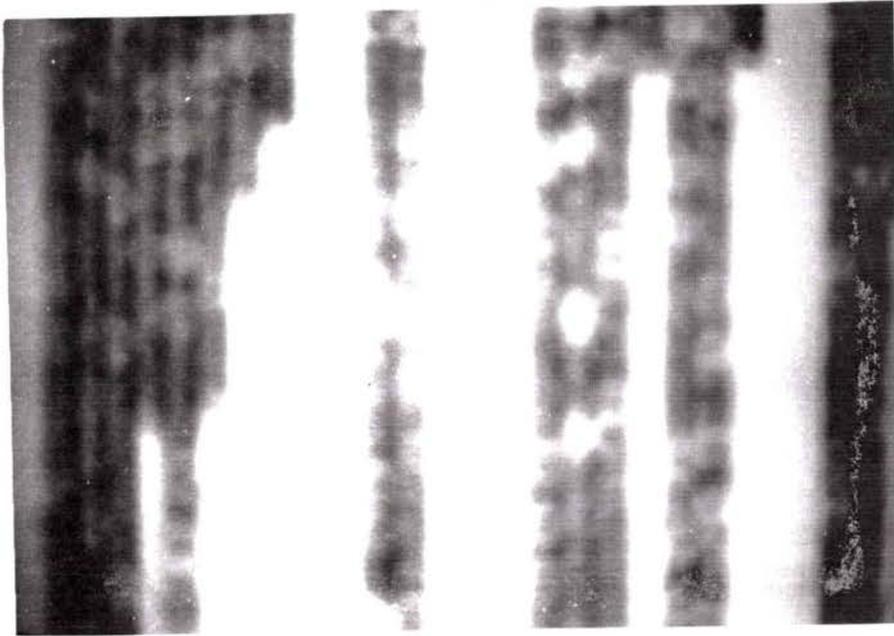


Figure III-9 : image floue avec une grande ouverture du diaphragme.

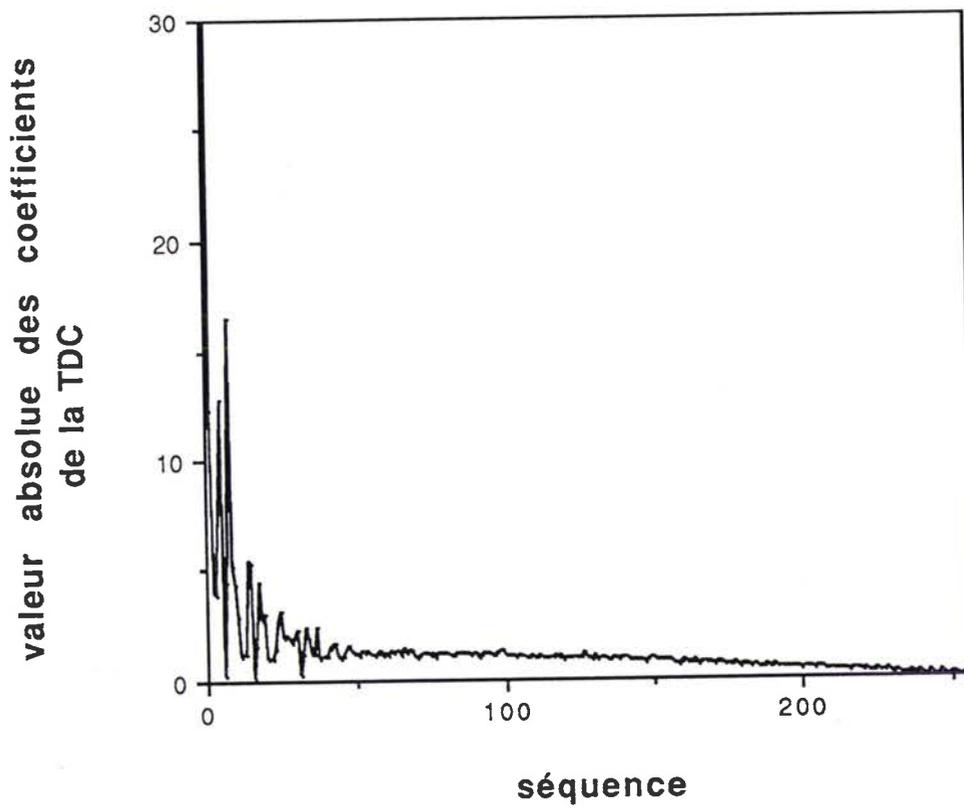


Figure III-10 : valeur absolue des coefficients de la TDC de l'image de la figure III-9.

Plus l'ouverture du diaphragme est étroite, plus la profondeur de champ est grande. Les rayons marginaux, qui donnent des aberrations importantes, altèrent, en effet, la netteté des images. Réduit aux rayons centraux, le faisceau lumineux donnera de bonnes images sur une plus grande distance.

3 - Détermination des zones de focalisation des caméras équipées d'un système d'auto-focus :

La détermination du nombre et la distribution spatiale des zones de focalisation dans le domaine du traitement des diverses caméras équipées d'un système d'auto-focalisation, ont été étudiées par A.M. TAREEV [TAR-88], qui a proposé un algorithme permettant d'avoir des résultats corrects et d'une manière rapide.

Dans un premier temps nous considérons les caméras équipées d'un objectif possédant une focale constante et dans un deuxième temps nous élargissons les résultats au cas des caméras équipées d'un zoom.

Si nous considérons f' la distance focale de l'objectif, K_{\min} la valeur minimale du "lens stop number" ($k = N(1+g)$), et les distances minimale D_{\min} et maximale D_{\max} aux objets focalisés. Nous supposant la dégradation maximale de la qualité de l'image permise laquelle nous évaluons comme le cercle de confusion d_{all} maximum permis. Nous supposons aussi que la quantité ∂ du déplacement de l'objectif lelong de son axe optique de la position nominale, causant le maximum de dégradation permise de la qualité de l'image ne dépend que de K_{\min} et d_{all} et est indépendante de la direction du déplacement. Son expression est la suivante :

$$\partial = K_{\min} * d_{\text{all}} \quad (1)$$

Finalement, nous supposons que l'erreur Δl , de positionnement de l'objectif, due à l'imprécision du système d'auto-focalisation pendant l'ajustement de l'objectif et à d'autres facteurs, est connue. Alors pour être sûr de la netteté de l'image, ∂ est remplacée par :

$$\partial' = \partial - \Delta l \quad (2)$$

Si on considère les positions figées de 1 jusqu'à m de la lentille O de l'objectif d'un système d'auto-focalisation (voir figure III-11), à la $i^{\text{ème}}$ position de la lentille, le plan P_i image coïncide avec un plan objet Q_i , et la distance D_i séparant ces deux plans est donnée approximativement par la formule [KUL-86] :

$$D_i = \frac{f^2}{x'_i} + A \quad (3)$$

où x'_i est la distance entre la focale arrière de la lentille et le plan P, et A est une quantité constante, dans notre cas on prend $A = L$ distance entre la focale avant et arrière de la lentille.

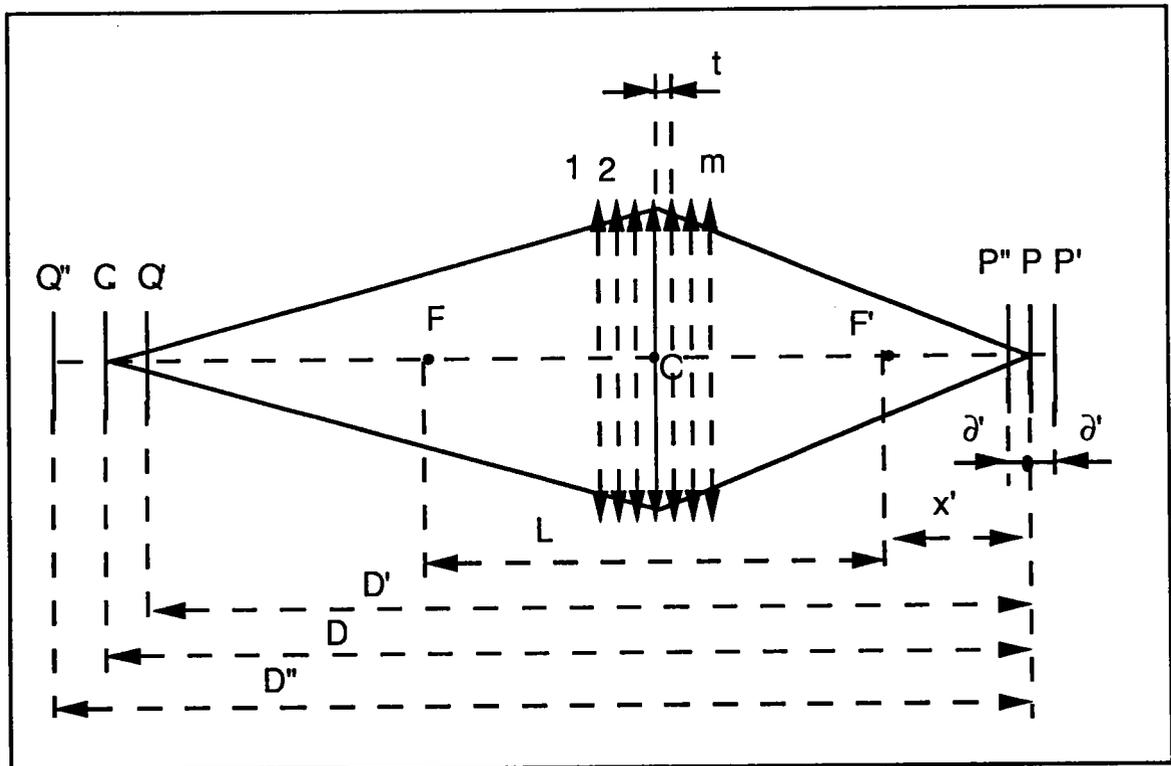


Figure III-11 : Détermination des zones de focalisation des caméras équipées d'un système d'auto-focus.

La figure III-11 montre aussi les plans Q'_i et Q''_i , qui sont les limites avant et arrière de la $i^{\text{ème}}$ zone de focalisation dans l'espace objet, P'_i et P''_i qui sont les plans image correspondant aux plans Q'_i et Q''_i .

Alors les distances D'_i et D''_i du plan P aux plans Q'_i et Q''_i par analogie avec l'équation (2) peuvent être représentées comme suit.

$$D'_i = \frac{f^2}{(x'_i + \partial')} + A \quad (4)$$

$$D''_i = \frac{f^2}{(x'_i - \partial')} + A$$

Ce qui nous permet d'en déduire que la profondeur de la $i^{\text{ème}}$ zone de focalisation est ΔD_i :

$$\Delta D_i = D''_i - D'_i = \frac{2f^2\partial'}{x'^2_i - \partial'^2} \quad (5)$$

Pour avoir des images de bonne qualité des objets localisés entre les plans D_{\min} et D_{\max} , il faut que les distances entre les positions adjacentes de la lentille n'excèdent pas la valeur $2\partial'$, ce qui nous donne la valeur minimale de m :

$$m = T/(2\partial') + 1 + w \quad (6)$$

où T est la course maximale de la lentille, et w est la quantité qu'il faut ajouter à m pour le rendre entier.

La quantité T peut être représentée sous la forme :

$$T = x'_{\min} - x'_{\max} - \Delta x'_1 - \Delta x'_m \quad (7)$$

où x'_{\min} et x'_{\max} sont les distances représentées sur la figure III-11 quand la lentille est focalisée sur les plans localisés respectivement à la distance D_{\min} et D_{\max} de la caméra, et $\Delta x'_1$ et $\Delta x'_m$ satisfont la relation :

$$0 \leq \Delta x'_1 \leq \partial', \quad 0 \leq \Delta x'_m \leq \partial'$$

Les quantités x'_{\min} et x'_{\max} peuvent être trouvées à partir de l'équation (3).

$$x'_{\min} = \frac{f^2}{(D_{\min} + A)} \quad (8)$$

$$x'_{\max} = \frac{f^2}{(D_{\max} + A)}$$

Alors, avec (8) prise en compte, nous obtenons :

$$T = \frac{f^2}{(D_{\max} - A)(D_{\min} - A)} - \Delta x'_1 - \Delta x'_m \quad (9)$$

à la place de l'équation (7).

La distance t entre les positions adjacentes de la lentille peut être trouvée comme suit:

$$t = T/(m - 1) \quad (10)$$

Dans ce cas la quantité x_i peut être représentée sous la forme générale :

$$x'_i = x'_{\max} + \Delta x'_m + (m-i)t \quad (11)$$

En utilisant les relations (2), (9), (6), (10), (11), (3), (4) et (5) dans l'ordre, on peut déterminer les quantités m , D_i , D'_i , D''_i , ΔD_i ($i=1,2,\dots,m$), T et t , nécessaires pour le développement d'un système de métrologie en trois dimensions. Dans ce cas la relation

$$\Delta l = \left(\sum_{n=1}^5 \Delta \Delta_n^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

peut être utilisée pour une estimation approchée de la quantité Δl , où $\Delta \Delta_1$ est l'erreur maximale possible sur l'épaisseur des cellules photosensibles, $\Delta \Delta_2$ est l'erreur maximale possible de positionnement de la lentille, $\Delta \Delta_3$ est l'erreur maximale possible de fléchissement des cellules, $\Delta \Delta_4$ est l'erreur maximale possible de positionnement de la lentille par rapport aux cellules photosensibles, $\Delta \Delta_5$ est l'erreur maximale possible de positionnement de la lentille due à l'imprécision dans l'opération d'auto-focalisation.

Les quantités $\Delta x'_1$ et $\Delta x'_m$ sont choisies par l'intégrateur, suivant la qualité de l'image demandée pour un objet se trouvant à une distance comprise entre D_{\min} et D_{\max} de la caméra en prenant en compte les caractéristiques du système d'auto-focalisation, etc. prise en compte. La figure III-12 montre un exemple de distribution spatiale dès

zones de focalisation d'une caméra équipé d'un système d'auto-focalisation pour deux choix différents des quantités $\Delta x'_1$ et $\Delta x'_m$.

La figure III-12-a montre le cas où les positions extrêmes de la lentille 1 et m focalisent des objets localisés respectivement à la distance D_{\min} et D_{\max} de la caméra. L'image de tels objets a le maximum de netteté. Cependant, dans ce cas il est possible d'obtenir des images aussi nettes d'objets localisés aux distances $D' < D_{\min}$ et $D' > D_{\max}$ de la caméra, qui tombent en dehors des limites pour le parcours des distances pour lequel la caméra est conçue. La figure III-12-b illustre le cas où les objets photographiés sont localisés a des distances D_{\min} et D_{\max} de la caméra et sont visualisés sur les cellules photosensibles avec le maximum de dégradation de l'image permis. Comme on peut le déduire des équations (6) et (7), le nombre minimum requis de zones de focalisation dans ce cas est inférieur de une unité par rapport au cas précédent, et la quantité T est inférieure de 2 ∂' .

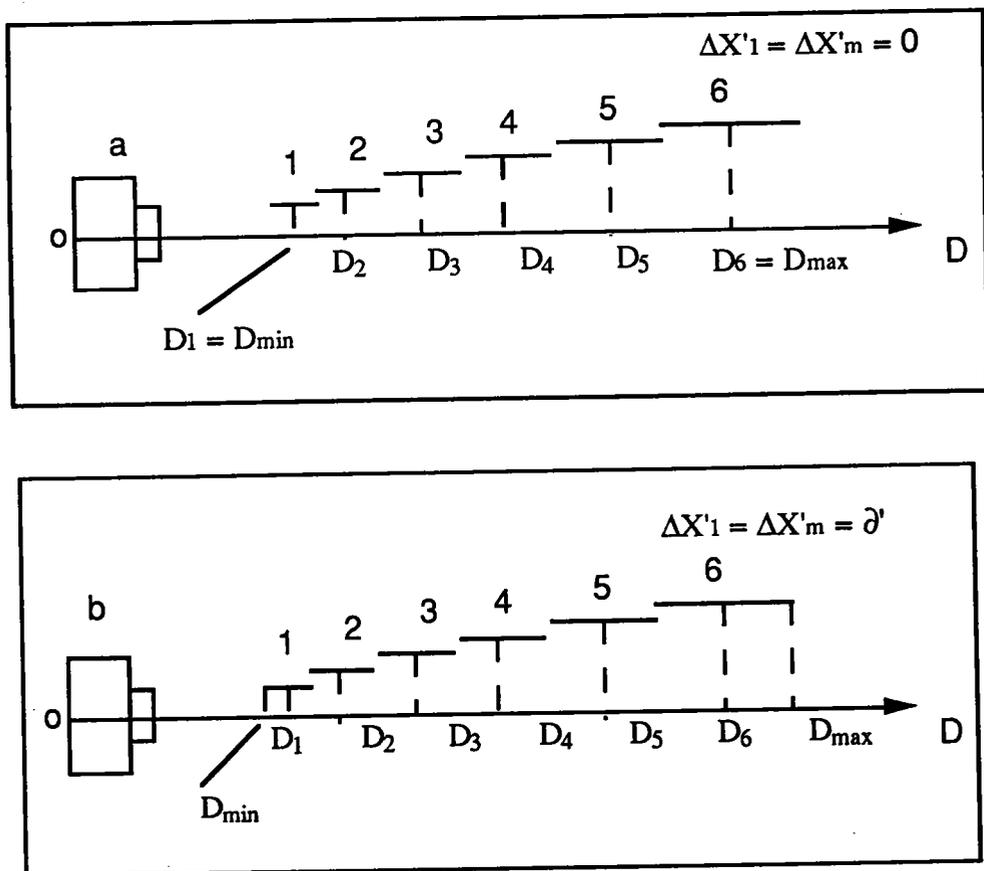


Figure III-12 : exemple de distribution spatiale des zones de focalisation d'une caméra équipée d'un système d'auto-focalisation.

La figure III-13 montre le schéma de l'objectif d'une caméra, incluant l'élément 1 positif ayant une focale f et le convertisseur 2 négatif. Les positions des éléments 1 et 2 de l'objectif dans ce cas sont montrées par les lignes en pointillé. Pour opérer dans le régime "téléphoto" l'élément positif est déplacé de sa position origine de la quantité C , et le convertisseur est inséré dans le faisceau de rayon, lequel permet une projection d'image, formé par l'élément positif du plan P_p , dans le plan film P , avec une amplification linéaire de V . La longueur focale de la lentille devient égale à f_T (valeur maximale de la longueur focale). La focalisation de l'objet est accomplie en déplaçant seulement l'élément positif. Dans le but de fournir la qualité d'image exigée dans le plan P , le cercle de confusion maximal permis dans le plan P_p ne doit pas excéder la valeur $d'_{all} = d_{all}/V$. Dans ce cas la quantité ∂' peut être représentée par :

$$\partial' = K_{min} * d'_{all} - \Delta l = K_{min} * d_{all}/V - \Delta l \quad (13)$$

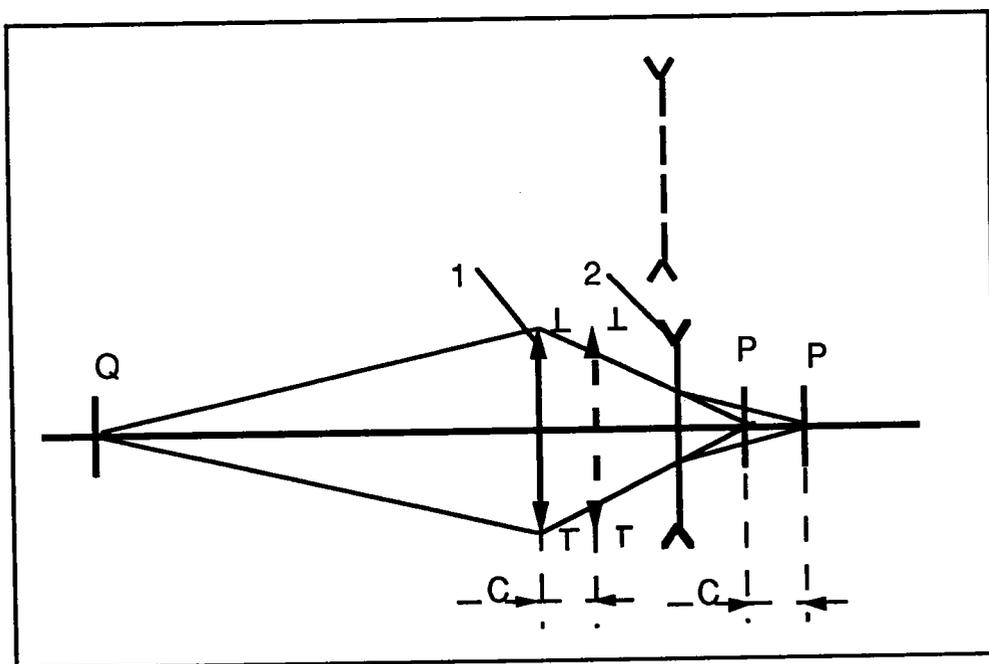


Figure III-13 :Caméra équipée d'un système d'auto-focalisation avec zoom.

Ici K_{min} est la valeur minimale du "lens stop number" pour l'élément positif. La quantité Δl dans ce cas peut être évaluée en utilisant la relation :

$$\Delta l = \left[\left(\frac{\sum_{n=1}^3 \Delta \Delta l_n^2}{V^4} + \sum_{n=4}^6 \Delta \Delta l_n^2 + \left(1 - \frac{1}{V^2} \right) \Delta \Delta l_7^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (14)$$

où $\Delta \Delta l_1, \dots, \Delta \Delta l_5$ sont les éléments de la quantité Δl introduits plus tôt, $\Delta \Delta l_6$ est l'erreur maximale possible du déplacement de l'élément positif quand on change la longueur focale de l'objectif, et Δl_7 est l'erreur maximale possible de la position du convertisseur le long de l'axe optique de l'objectif.

L'algorithme pour la détermination des quantités $m, D_i, D'_i, D''_i, \Delta D_i, T$, et t dans ce cas est constitué de la série des relations suivantes utilisées dans l'ordre indiqué.

$$(14), (13), (9), (6), (10), (11), (3), (4), \text{ et } (5). \quad (15)$$

Dans ce cas il faut prendre en fait :

$$A = L + C \text{ dans les équations } (3), (4), (5) \text{ et } (9).$$

Dans le cas où $V = 1, C = 0$ et $\Delta \Delta l_6 = 0$, l'algorithme (15) est applicable aux caméras équipées d'une focale constante.

Cet algorithme peut aussi être utilisé pour les caméras équipées d'une focale variable. Le schéma d'un tel objectif peut être schématisé par la figure III-13, mais pour changer la focale aussi bien l'élément positif que négatif de l'objectif sont déplacés le long de l'axe optique. Pour la réalisation de l'algorithme (15) il est nécessaire de tenir compte de la valeur maximale de l'agrandissement de l'élément négatif, la quantité C étant égale à la distance entre les plans P et P_p pour la valeur maximale de la focale.

Dans le cas d'une focale constante on prend les valeurs suivantes pour les différents paramètres :

$$f' = 35 \text{ mm}, K_{\min} = 2,8, d_{\text{all}} = 0,05 \text{ mm}, \Delta x' = \Delta x'' = \Delta x''', \Delta l_1 = \Delta l_2 = \Delta l_3 = 0,025 \text{ mm}, \Delta l_4 = \Delta l_5 = 0,02 \text{ mm}; \Delta l = 0,05 \text{ mm}.$$

Le tableau de la figure III-14 montre un exemple de calcul des quantités D, D', D'' et ΔD , $1 \leq i \leq m$.

i numéro de la zone de focalisation	$D_{min} = 1m, D_{max} = \infty$			
	D	D'	D''	ΔD
1	0,73	0,70	0,77	0,07
2	0,80	0,76	0,84	0,08
3	0,89	0,84	0,94	0,10
4	1,00	0,94	1,06	0,12
5	1,13	1,06	1,23	0,16
6	1,33	1,23	1,46	0,23
7	1,62	1,46	1,82	0,36
8	2,05	1,80	2,38	0,58
9	2,85	2,38	3,57	1,19
10	4,61	3,47	6,87	3,40
11	13,69	6,87	∞	∞

Figure III-14 : exemple de calcul des quantités D , D' , D'' et ΔD

4 - Conclusion :

L'étude présentée dans ce chapitre montre qu'il est possible de faire de la métrologie en trois dimensions à partir d'auto-focus passif. La précision des mesures peut être approximée en utilisant l'algorithme exposé (15), ce qui nous permet de choisir les différents paramètres qui nous permettent d'atteindre la précision souhaitée.

On remarque d'après le tableau de la figure III-14 que la précision des mesures est meilleure lorsque l'objet est plus proche de l'objectif de la caméra, d'où l'on peut déduire une bonne précision des mesures effectuées avec les microscopes optiques.

On retrouve les résultats connus, à savoir que :

- Le pouvoir séparateur de l'objectif dépend de la longueur d'onde de la lumière utilisée pour l'éclairage de l'objet.
- La profondeur de champ est plus grande derrière l'objet mis au point que devant.

- A une petite ouverture, correspond une grande profondeur de champ ; si vous fermez le diaphragme, vous augmentez la profondeur.

Les domaines d'utilisation de la métrologie en visionique sont multiples, et ne peuvent pas être couverts par un système unique. C'est pourquoi une étude préliminaire doit être faite pour chaque application, pour optimiser les mesures. En outre des éclairages performants doivent être développés pour s'adapter à chaque cas de figure, à titre d'exemple : des éclairages avec une lumière de courte longueur d'onde pour la microscopie.

QUATRIEME CHAPITRE

IV) Automatisation d'un système de mesure de la longueur de fissure sur un faciès de rupture

1. Introduction :

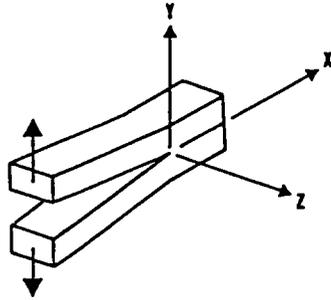
Dans ce chapitre nous décrivons une solution pour l'automatisation de la mesure de la longueur de fissure, pour des essais de mécanique de la rupture. Le but de cette automatisation est d'améliorer la précision de la mesure et de remplacer l'opérateur dans les tâches répétitives.

Après un rappel sur les concepts de la mécanique de la rupture, les différentes étapes qui nous permettent de mesurer les différents paramètres d'essai sont expliquées et leur précision est donnée.

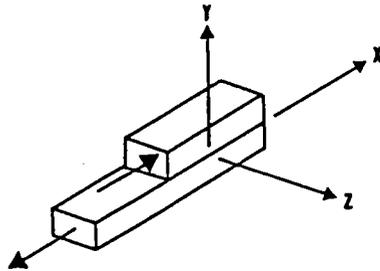
Rappel sur la mécanique de rupture

La mécanique de la rupture décrit le comportement des solides ou structures présentant des discontinuités géométriques macroscopiques à l'échelle de la structure. La mécanique de la rupture permet de prévoir l'évolution d'une fissure macroscopique jusqu'à la rupture complète de la structure. G. R. Irwin [NEW-88], en 1956, a défini des facteurs d'intensité des contraintes, correspondant à des cinématiques particulières du mouvement des fissures. Ces paramètres semi-locaux sont largement utilisés pour étudier la rupture fragile ou la rupture par fatigue des milieux bidimensionnels ou tridimensionnel.

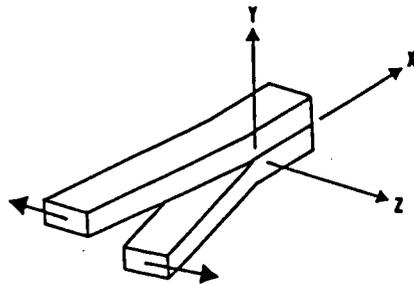
Considérons une fissure dans un milieu plan, selon la direction de la sollicitation par rapport à celle de la fissure, on distingue trois cinématiques remarquables du déplacement relatif des lèvres de la fissure, elles sont indiquées ci-dessous.



- Mode I : ou mode d'ouverture.



- Mode II : ou mode de cisaillement plan.



- Mode III : ou mode de cisaillement anti-plan.

Si l'on soumet une éprouvette fissurée d'un matériau fragile ou ductile, sollicitée en mode I, à l'action d'une force périodique définie par l'amplitude de l'effort ΔF et le rapport de sa valeur minimale F_m à sa valeur maximale F_M : $R = F_m / F_M$, la fissure progresse généralement avec un taux de croissance par cycle da / dN qui augmente avec la longueur de fissure. Si la fissure initiale est une fissure artificielle ce qui est le cas dans notre expérience, un certain nombre de cycles N_i est nécessaire pour amorcer la propagation (ou provoquer une déviation de la fissure). Lorsque la longueur de fissure associée à l'effort remplit les conditions d'instabilité, il y a propagation brutale de la fissure jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

En mécanique linéaire de la rupture, on admet que la fissure commence à progresser dès que la valeur de K_I atteint par valeurs inférieures, une valeur critique K_{IC} , caractéristique de chaque matériau. Ceci revient à dire qu'il existe une ouverture critique de la fissure au-delà de laquelle il y a propagation de la fissure jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

L'essai que nous allons considérer permet de déterminer le paramètre K_{IC} (le facteur d'intensité de contrainte critique) permettant de chiffrer l'aptitude d'un matériau à résister à la propagation brutale d'une fissure.

La méthode du déplacement à fond de fissure pour les matériaux métalliques est un test qui est reconnu internationalement et a fait l'objet d'une normalisation en Grande-Bretagne [BSI]. Son usage est actuellement largement répandu notamment dans les critères d'acceptation de constructions soudées, les plates-formes "off-shore" en particulier [PLU-89]. L'automatisation de ce test demande un certain nombre d'étapes que nous allons développer dans la suite. Dans ce qui suit, seule la mesure de la longueur de la fissure est prise en considération. La partie mécanique, qui sert à manipuler l'objet à tester et qui inclut l'équipement d'essai, et le système de délivrance, ne seront pas exposés. Aussi la norme de test est en dehors de notre application. En premier lieu la position et les dimensions de la pièce sont déterminées, ensuite la courbe de propagation du fond de fissure est dégagée et la mesure des différents paramètres qui caractérisent le facteur d'intensité de contrainte critique est faite.

2 - Eprouvette utilisée :

Les dimensions de cette éprouvette (SENB- single edge notch bending) sont indiquées sur les figures IV-1 et IV-2. L'écartement des appuis est égal à 4 fois la largeur de l'éprouvette.

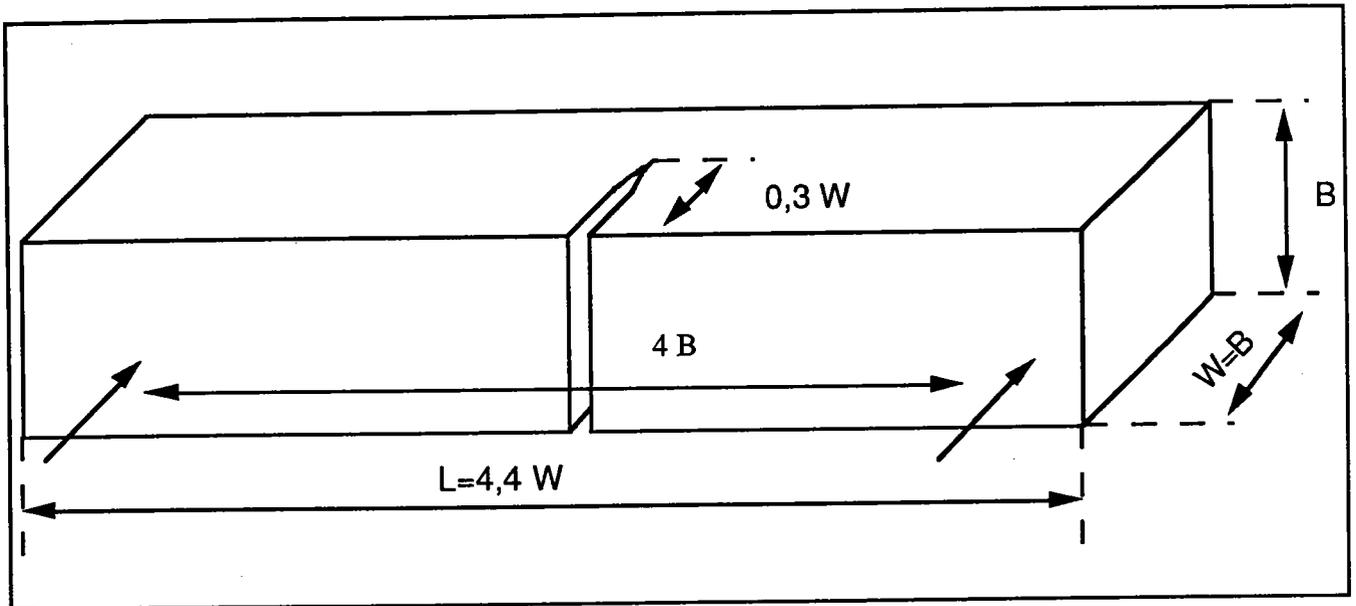


Figure IV-1 : éprouvette du type 1.

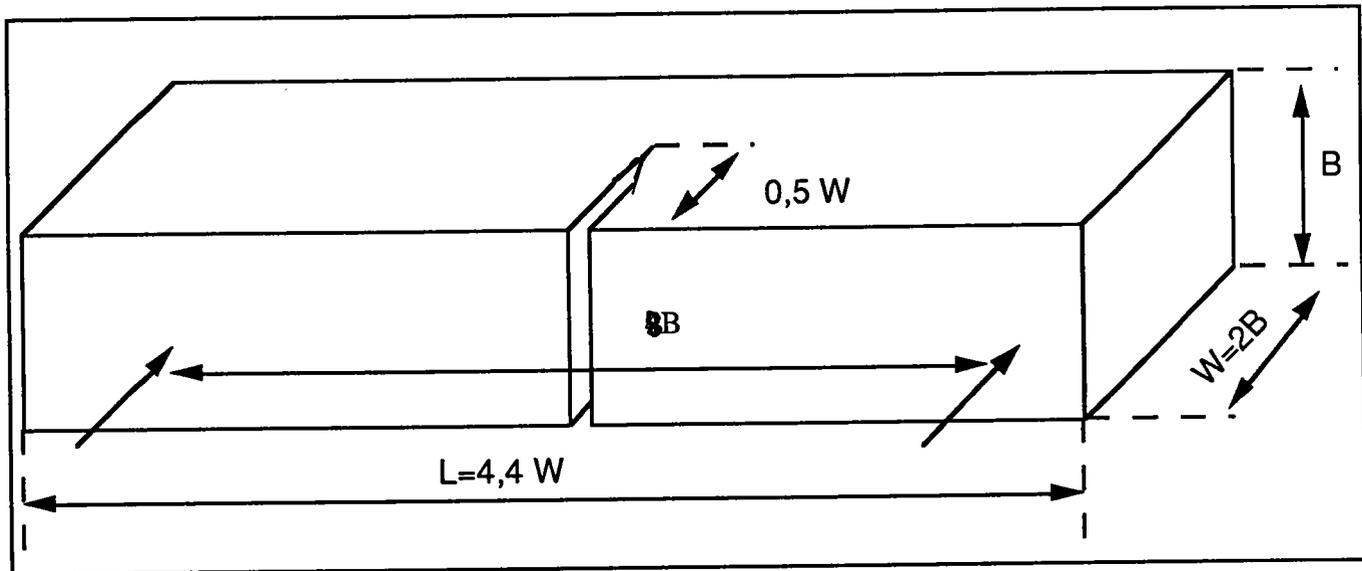


Figure IV-2 : éprouvette du type 2.

Connaissant la longueur a de la fissure et la charge P_c à l'instabilité, on calcule K_{IC} par la formule suivante, dans le cas où l'écartement des appuis est égal à 4 fois la largeur de l'éprouvette [NEW-88] :

$$K_{IC} = \frac{P_c}{B\sqrt{W}} \left[1,99 \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{1}{2}} - 0,41 \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{3}{2}} + 18,7 \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{5}{2}} - 38,48 \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{7}{2}} + 53,85 \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{9}{2}} \right]$$

où B est l'épaisseur de l'éprouvette, w la largeur de l'éprouvette.
La valeur de a est calculée à partir des a_i , $i = 3, 5, 7$. (voir la figure IV-3).

$$a = (a_3 + a_5 + a_7)/3$$

Les valeurs des autres a_i servent à calculer d'autres paramètres.

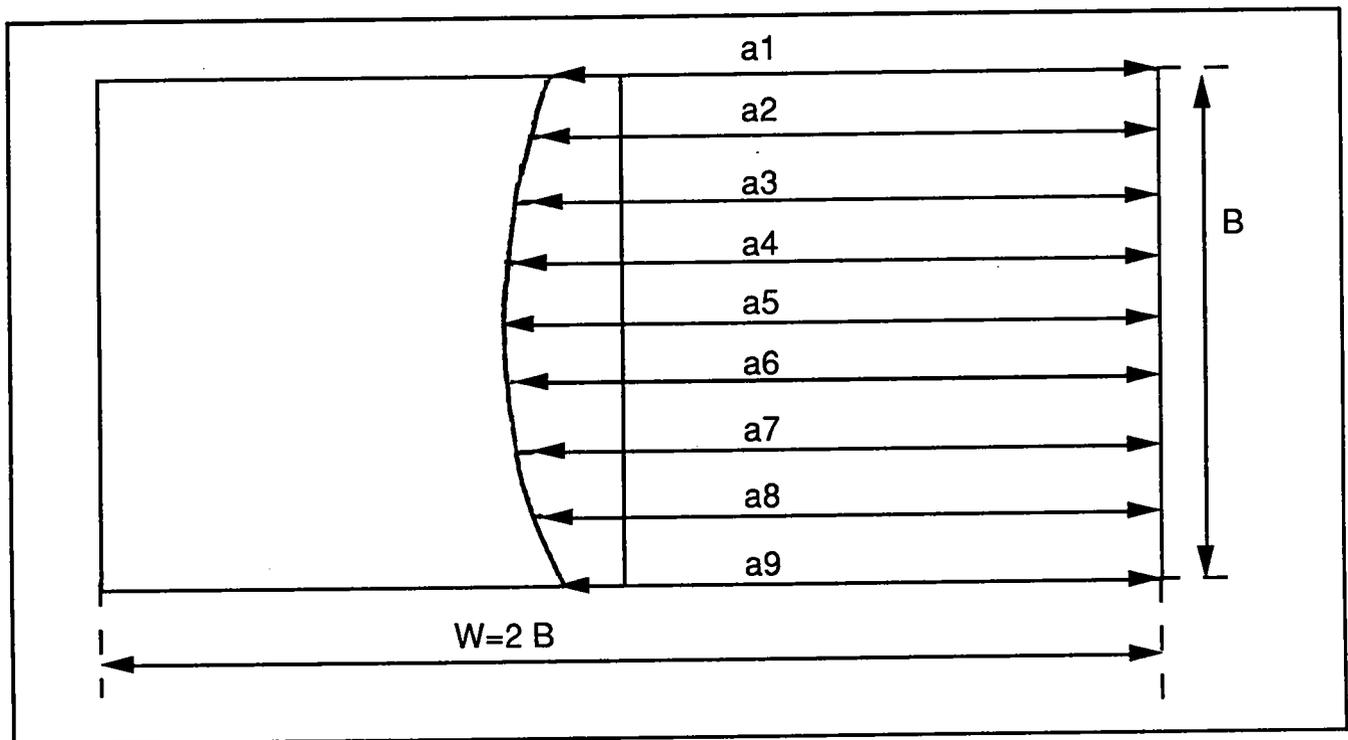


Figure IV-3 : mesure de longueurs de fissures.

Dans la suite ce qui nous intéresse est la mesure des valeurs a_i qui nous permettent de calculer la valeur de a . Pour ceci nous procédons de la manière suivante :

étape 1 : localisation et mesure des dimensions de la pièce.

étape 2 : phase d'auto-apprentissage dans laquelle les différents types de textures qui doivent être identifiés sont détectés.

étape 3 : identification des différentes parties de l'image.

étape 4 : ajustement de la courbe de rupture à une ellipse et calcul de la valeur de

a.

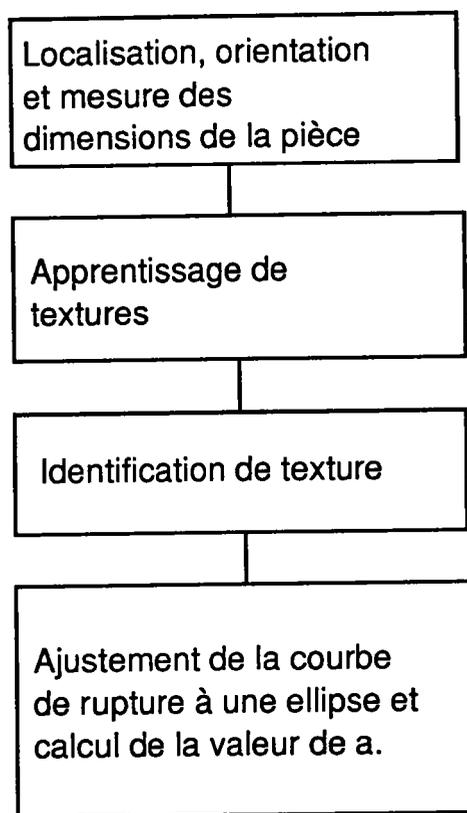


Figure IV-4 : organigramme du programme développé.

3. Description et fonctionnement du système d'inspection visuelle :

Dans ce paragraphe les différentes étapes du traitement et les algorithmes de mesure sont décrits.

L'image doit avoir un bon contraste pour une extraction précise des régions homogènes. C'est pourquoi nous utilisons les conditions d'éclairage de la figure IV-5. L'éclairage par transmission nous permet d'avoir des contours plus nets de la pièce à traiter donc une meilleure précision pour le prélèvement des dimensions. Par contre l'éclairage par réflexion diffuse nous fournit une vaste gamme de valeurs de gris ce qui va être utile pour déterminer les caractéristiques de la surface de la pièce.

Ces deux modes d'éclairage sont appliqués successivement et non simultanément et ceci dans l'ordre présenté. En effet, si on applique les deux modes

d'éclairage simultanément, l'éclairage par transmission peut saturer les cellules photosensibles de la caméra ce qui limiterait le contraste de la surface de la pièce. La source de lumière doit être stable dans le temps et uniforme dans la zone de mesure. Pour se soustraire à l'éclairage ambiant, fluctuant et parasite, l'ensemble du banc peut être sous capot.

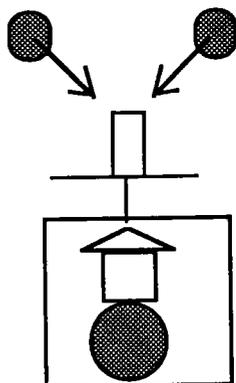


Figure IV-5 : schéma du banc d'éclairage

La structure générale du système d'inspection visuelle que nous avons développé est décrite dans la figure IV-6.

Le système d'acquisition se compose d'une caméra, d'un moniteur vidéo et d'une carte de digitalisation du signal vidéo. Nous présentons leurs caractéristiques techniques ci-dessous.

Nous avons utilisé pour l'acquisition des images, une caméra matricielle de marque I2S monochrome qui utilise un dispositif à transfert de charge (CCD). Elle a une résolution de 512 x 512 éléments d'image (les dimensions d'un pixel sont de 11 μm x 17 μm). L'objectif utilisé a une distance focale de 16 mm et le moniteur de contrôle est monochrome.

Le signal analogique produit par la caméra est converti à l'aide d'une carte de conversion analogique-digitale.

La carte MYP-AT de Matrox, est une carte de traitement d'image placée sur un des connecteurs de fond de panier de l'IBM PS2 modèle 30. Elle permet la

numérisation du signal vidéo délivré par la caméra. Ce processus fournit pour chaque échantillons une valeur sur 8 bits. La valeur d'un pixel, ou niveau de gris, est comprise entre 0 et 255. La cadence d'acquisition est de 25 images par seconde (50 trames). Quatre images de 512 x 512 pixels peuvent être sauvegardées sur la carte. la fréquence de digitalisation d'une image de 512 x 512 octets est de 10 Mhz.

Le système fonctionne comme suit : la pièce est posée sur un support transparent, une caméra CCD (512x512 pixels) obtient l'image de l'objet et l'envoie à la carte d'acquisition et de numérisation où elle est numérisée et stockée. Ensuite le micro-ordinateur traite l'image. L'opérateur peut suivre sur un écran noir et blanc les résultats des différentes étapes du traitement (figure IV-6).

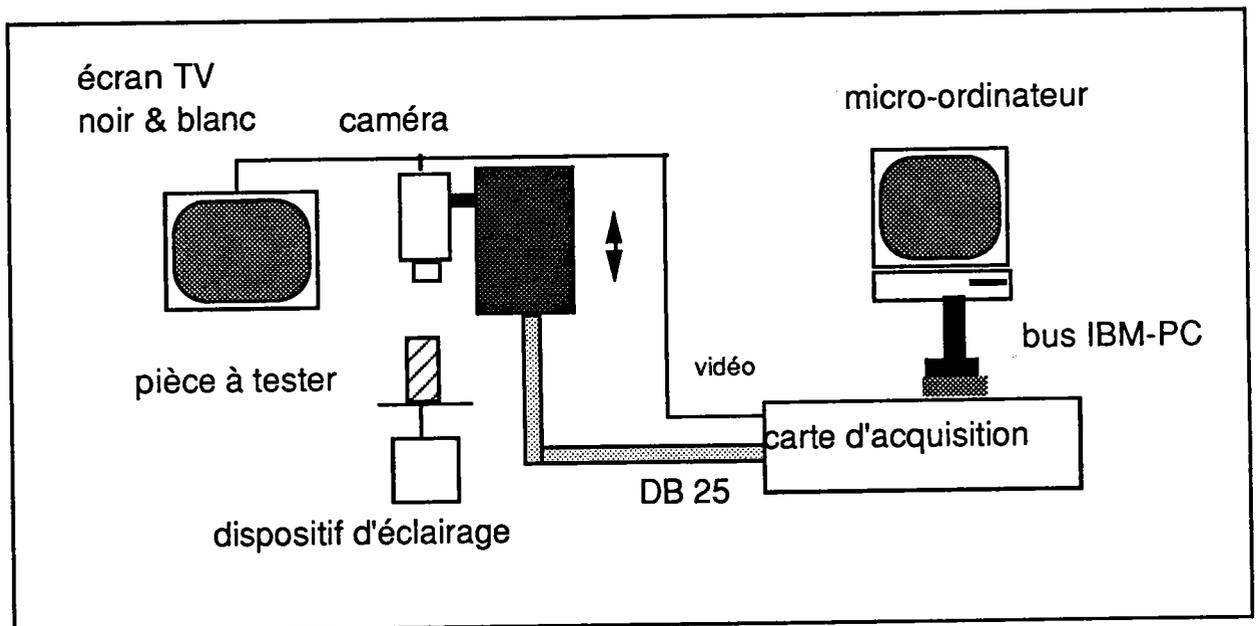


Figure IV-6 : schéma du système de vision utilisé.

- étape 1 : localisation de la pièce et mesure de ses dimensions :

Pour déterminer l'emplacement, l'orientation et les dimensions de la pièce, nous utilisons l'éclairage par transmission et un algorithme simple. L'algorithme utilisé consiste à localiser les quatre sommets de la pièce, ce qui nous permet de calculer l'orientation de la pièce (voir figure IV-7).

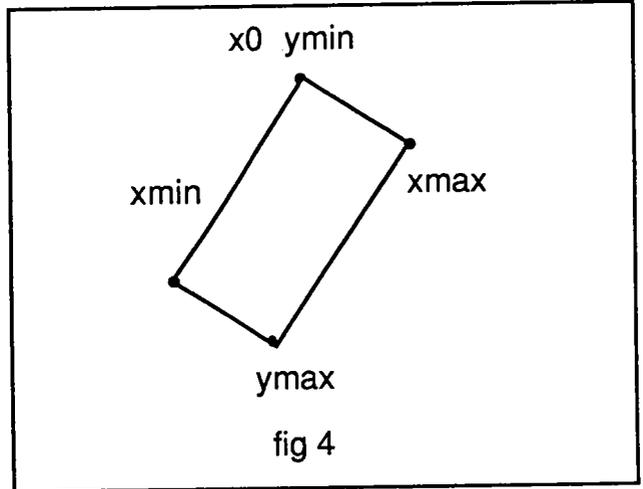
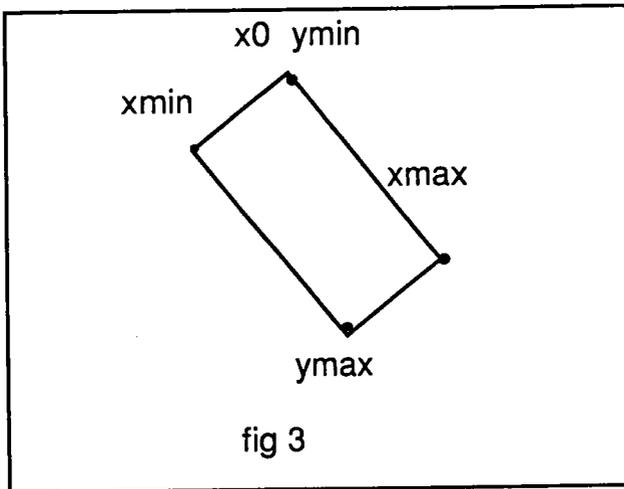
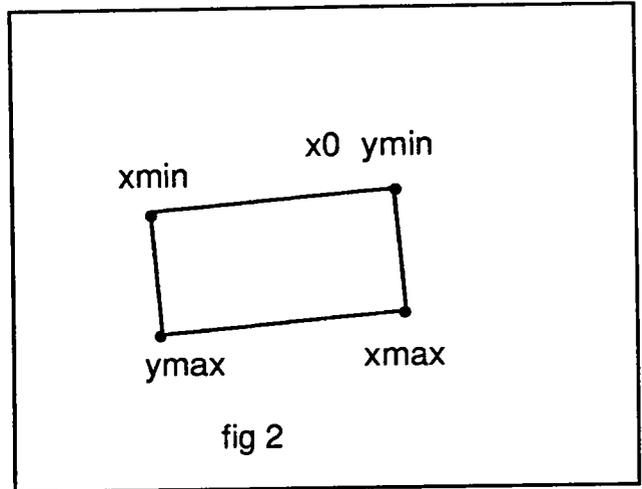
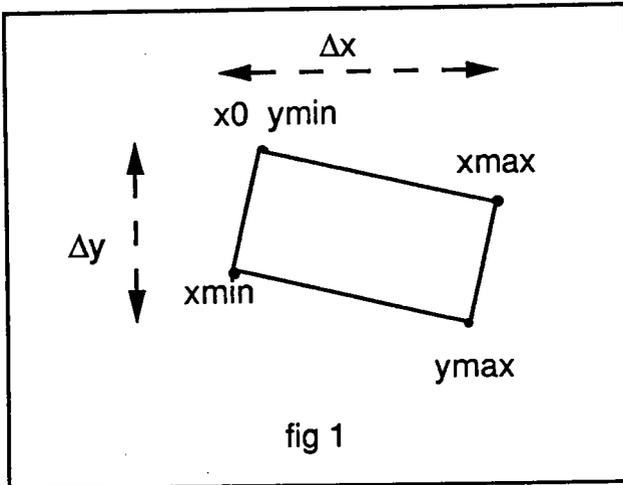


Figure IV-7 : localisation de la pièce.

$$\Delta x \geq \Delta y \left\{ \begin{array}{l} x_0 \leq \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2} \implies \text{fig1} \\ x_0 > \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2} \implies \text{fig2} \end{array} \right.$$

$$\Delta x < \Delta y \left\{ \begin{array}{l} x_0 \leq \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2} \implies \text{fig3} \\ x_0 > \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2} \implies \text{fig4} \end{array} \right.$$

et par conséquent de donner les instructions pour corriger cette orientation pour que la pièce prenne la position standard de la figure IV-8.

Pour améliorer le temps de traitement, dans la suite, nous allons prendre en compte dans nos traitements seulement une fenêtre de dimensions inférieures à 512x512 pixels qui contient l'objet à analyser.

Une fois que la pièce est dans la position horizontale comme l'indique la figure IV-8, nous procédons à la mesure des dimensions de la pièce. Nous utilisons le gradient de Prewitt qui est une technique usuelle de détection de contour permettant une localisation des dimensions de la pièce à quelques pixels près.

Le gradient de Prewitt est calculé par une convolution du bloc image par les opérateurs 3 x 3 suivants :

$$P_x = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad P_y = \begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

$$P = |P_x| + |P_y|$$

Pour avoir une précision des mesures d'une fraction de pixel, on utilise l'opérateur sous pixel qui se base sur la technique du centre de gravité pour estimer la position du maximum de niveau de gris d'un profil traversant le contour. Cet opérateur agit sur un voisinage de la première localisation obtenue par le gradient de Prewitt. La technique du centre de gravité utilise les informations contenues dans les niveaux de gris du voisinage du contour pour reconstruire un signal continu par interpolation (voir annexe 5).

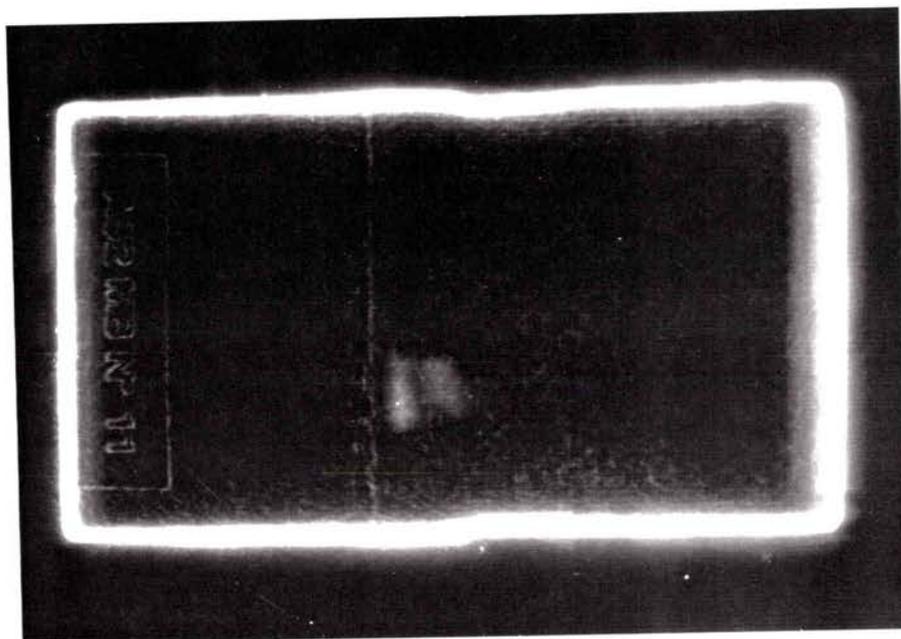


Figure IV-8 : application du gradient de Prewitt à l'image de la pièce.

- **étape 2 : phase d'auto-apprentissage dans laquelle les différents types de textures qui doivent être identifiés sont détectés :**

A partir de cette étape et jusqu'à la fin du traitement nous utilisons l'éclairage par réflexion diffuse qui nous fournit une vaste gamme de valeurs de gris ce qui va être utile pour déterminer les caractéristiques de la surface de la pièce.

Dans cette phase du traitement une méthode d'analyse structurale de la texture est appliquée pour extraire de l'image les éléments de texture (chacune d'elle est décrite par un certain nombre de propriétés comme la transformée discrète en cosinus (TDC), la moyenne des niveaux de gris (MNG), la largeur de l'histogramme (LH)) pour identifier les différents types de textures présents dans l'image et pour décrire leur relations d'adjacence et spatiales dans le but d'avoir une description structurale de la texture qui va nous fournir la frontière entre les différents espaces texturés.

Dans nos expériences le plan image a été divisé en blocs images de taille 8x8 et chaque bloc a été traité séparément et indépendamment des autres.

Nous commençons par la collection de quelques vecteurs de caractéristiques, qui ont été sélectionnées auparavant, pour chaque type de texture. Ces vecteurs de caractéristiques vont être utilisés pour la comparaison des textures des sous parties de l'image.

Ce système utilise des connaissances à priori de l'image que nous traitons, ce qui fournit des stratégies et des recommandations pour l'inspection et le traitement. Ces connaissances sont les suivantes : la surface de la pièce à analyser comporte essentiellement deux textures différentes, la première, plus homogène, est plus sombre que la deuxième (voir figure IV-9).

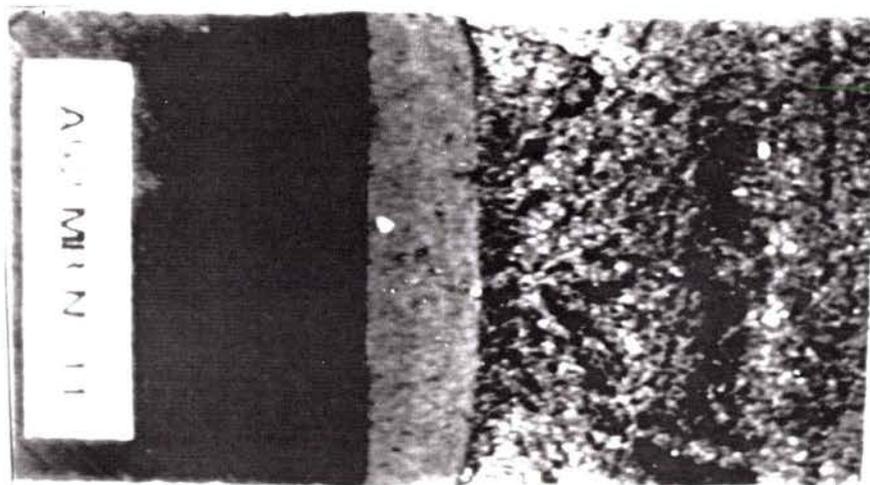


Figure IV-9 : éclairage par réflexion diffuse de la pièce.

Parce que nous connaissons par avance dans la phase d'auto-apprentissage le type et le nombre des différentes textures des régions homogènes, nous pouvons dans cette étape traiter directement les régions où nous soupçonnons l'existence des différentes textures que nous recherchons.

Après l'application de quelques tests et des études statistiques, utilisant la TDC, MNG et LH, les différents paramètres caractéristiques des deux régions sont collectés pour être utilisés dans l'étape suivante.

- étape 3 : identification des différentes parties de l'image :

Une fois que les différents paramètres correspondant aux différentes textures sont définis, une seconde analyse structurale de la texture est appliquée pour reconnaître et comparer les différentes sous parties de l'image. La classification des sous parties de l'image en deux différentes régions est alors possible.

- étape 4 : ajustement de la courbe de propagation du fond de fissure et calcul de la valeur de a

Partant des segmentations préliminaires des régions obtenues ci-dessus, dans cette étape, nous essayons de retrouver la frontière entre les deux régions avec une précision de un pixel, et ceci a été réalisé à l'aide d'un traitement scalaire : en calculant la différence entre les pixels voisins. Comme résultat, nous obtenons une série de points qui appartiennent pour la plupart à la courbe de propagation du fond de fissure que nous cherchons. Pour affiner le résultat, nous identifions ces points à une ellipse [NAL-87] (voir annexe 6).

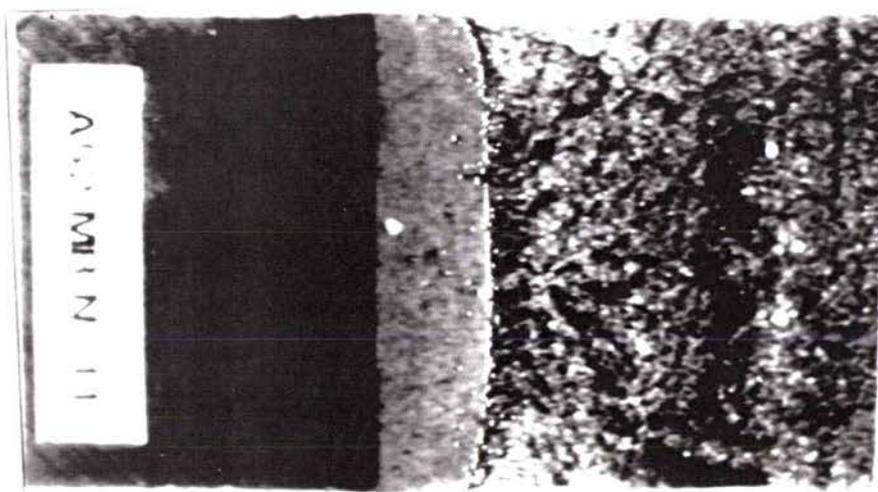


Figure IV-10 : pièce divisée en deux régions par des points.

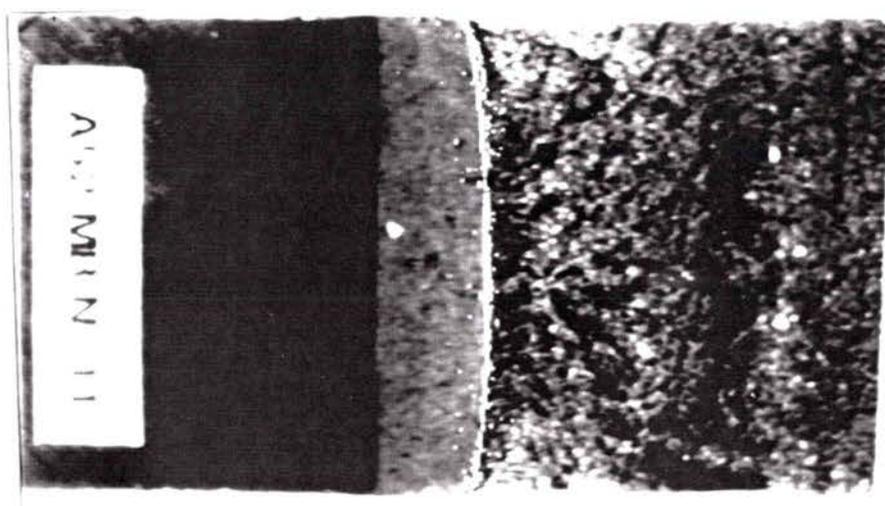


Figure IV-11 : pièce divisée en deux régions par une ellipse.

Une fois la courbe de rupture identifiée, les points a_i sont mesurés ce qui nous permet de calculer le paramètre K_{IC} .

4. Résultats et précision des mesures :

Ci-dessous sont présentés les résultats obtenus sur une dizaine de mesures. La méthode habituelle pour la mesure des dimensions de la pièce utilise un pied à coulisse de 20 μm de précision. Une loupe permettant d'agrandir l'image d'une cinquantaine de fois et de prendre des mesures de la longueur de fissure. Cette loupe peut être déplacée manuellement dans les deux directions x et y à l'aide de deux vis avec une précision de 10 μm . Δ est le coefficient de variation et σ est l'écart type.

mesure		méthode habituelle moyenne sur 10 mesures	σ	Δ en %	méthode développée moyenne sur 10 mesures	σ	Δ en %
dimensions extérieures de la pièce (en mm)	W	57,99	0,27	0,47	58,53	0,08	0,14
	B	29,09	0,14	0,5	28,94	0,11	0,38
longueur de fissure (en mm)	a	30,53	0,2	0,7	29,05	0,23	0,8
temps nécessaire pour une mesure		5 mn			15 s		

La précision des mesures est d'un pixel en ce qui concerne la courbe de fatigue puisqu'on ne peut pas utiliser les techniques sous pixel à cause de la difficulté de détecter la frontière entre les deux régions. Par contre pour la mesure des dimensions de la pièce des mesures sous pixel sont possibles.

La caméra utilisée dans notre système comporte 512 x 512 pixels, la longueur de la pièce est de 60 mm, ce qui nous donne une précision maximale de $60/512 \approx 12 \mu\text{m}$.

Perspectives :

L'amélioration de la précision des mesures obtenues est possible :

- Une fois la pièce localisée, une motorisation de la caméra permettrait d'ajuster le champ caméra à la longueur totale de la pièce. Pour une pièce plus petite, la précision de mesure serait plus grande.

- Un deuxième choix consiste à augmenter le nombre de caméras pour avoir une meilleure définition (par exemple quatre caméras nous donnent 1024 X 1024 pixels) ce qui permettrait d'obtenir une résolution deux fois supérieure.

- Pour une même pièce, une translation de la caméra entre les mesures des dimensions de la pièce et celle de la longueur de fissure permettrait d'obtenir une résolution quatre fois supérieure pour la longueur de fissure. Cela nécessiterait aussi

l'automatisation de la mise au point de la caméra qui est différent dans les deux positions.

- L'utilisation de caméras linéaires (3456 pixels $10,7 \times 10,7 \mu\text{m}$, I2S) permettrait une résolution de mesure presque sept fois supérieure à celle actuellement obtenue avec une caméra matricielle. Ce qui nécessiterait l'utilisation d'un dispositif de translation de la caméra linéaire.

5. Conclusion

Nous avons développé dans ce chapitre un algorithme pour l'automatisation de la mesure de la longueur de fissure des essais de mécanique de rupture. Cet algorithme utilise un critère de reconnaissance de texture que nous avons mis au point.

A partir du calcul de la TDC (transformée discrète en cosinus) nous obtenons deux paramètres ; le premier est obtenu en additionnant la valeur absolue d'un certain nombre de coefficients de la TDC et le deuxième qui représente la moyenne des niveaux de gris est obtenu en divisant le premier coefficient de la TDC par le nombre total de points.

La largeur de l'histogramme, nous fournit un nouveau paramètre pour augmenter la fiabilité du système. Le choix de l'éclairage adéquat permet une analyse plus facile.

La propreté de la pièce joue elle aussi un rôle très important dans la détection de la courbe de rupture, la finesse du matériel est un autre critère de précision qu'il ne faut pas négliger.

Une optimisation des solutions logicielles et matérielles dans le but d'augmenter la rapidité des différentes phases devrait être trouvée, ce qui rendra le système réellement approprié pour le contrôle dans une chaîne de production.

Conclusion générale:

Dans ce mémoire nous avons proposé deux nouveaux critères d'auto-focalisation passifs par transformations orthogonales. Ces critères utilisent la transformée de Fourier et la transformée discrète en cosinus. Nous avons aussi montré qu'il est possible d'utiliser ces transformées pour la reconnaissance de morphologies.

Les principaux avantages de ces transformées sont leur facilité de mise en œuvre et leur coût nettement inférieur à celui des auto-focus actifs. L'existence d'algorithmes de calcul rapide de ces transformées les rend utilisables dans des systèmes industriels automatiques. Pour augmenter la rapidité du traitement, les algorithmes d'auto-focus peuvent être micro-programmés.

On a vu aussi que les algorithmes de calcul de la TDC sont plus rapides que ceux de la TFR, puisque la première transformée s'adapte mieux au calcul dans le domaine réel que la TFR.

Pour une implantation matérielle la TFR pourrait être plus rapide puisqu'on peut effectuer une bonne partie du calcul dans le domaine analogique. Pour la TDC il existe des modules de calcul rapide.

Il est intéressant de noter que les systèmes d'auto-focus passifs sont les plus développés et les plus utilisés actuellement, plus que les systèmes d'auto-focalisation actifs.

Les critères de développement des systèmes d'auto-focus sont : la précision et la fiabilité avec une construction simple et peu coûteuse.

L'utilisation des systèmes de vision dans l'automatisation des procédés industriels avance au même rythme que le développement de la technologie des composants électroniques et en particulier celle des caméras.

Bibliographie

- [AHM-74] N. Ahmed, T. Natarajan and K. R. Rao, "Discrete cosine transform", IEEE Trans. Comput., Vol. C23 pp. 90-93, Jan. 1974.
- [AHM-75] N. Ahmed and K.R. Rao, "Orthogonal transform for digital signal processing". Berlin, Germany : Springer-Verlag, 1975.
- [ALB-89] Albert G. Choate, " Optical and digital processing techniques in a machine vision metrology system, " OPTICAL ENGINEERING / Decembre 1989 / Vol. 28 No.12. pp 1311-1316.
- [BAL-] Dana H.Ballard Christopher M.Brown, " Computer vision ", pp 24-30.
- [BAT-85] B.G. Batchlor," Automated visual inspection ". D.A. Hill, D.C. Hodgson, IFS North Holl, 1985.
- [BES-88] J.E. Besançon, " Vision par ordinateur en deux et trois dimensions". Editions EYROLLES 1988.
- [BLA-89] F. Blais, M. Rioux & J. Domey," Compact three-dimensional camera for robot and vehicle guidance ". Optics and Laser in Engineering, 10 (1989) 227 - 239.
- [BOZ-85] C. Bozzo, M. Fouques, R. Gabriel, A. Lorenzi, " Présentation d'une architecture VLSI en systolique pour la DCT ". 10 ème Colloque GRETSI, Nice 20 - 24 Mai 1985, pp. 1007 - 1012.
- [BSI] British Standards Institutions. BS 5762, "Methods for crack opening displacement (COD) Testing".
- [CAR-78] R. Carrasco et J. Lauret, " Cours fondamental de télévision ". troisième édition, Editions Radio 1978.
- [CHA-91] M. Charfi, A. Nyeck, and A. Tossier, " A fast auto-focusing criterion for PC-assisted treatment ". IMACS-MCTS Symposium, May 7-10 1991 Lille, FRANCE.
- [CHA-91] M. Charfi, A. Nyeck, and A. Tossier, " A focusing criterion ". IEE Electronics Letters, 4th July 1991 / Vol.27 No.14 / pp 1233-1235.
- [CHA-91] M. Charfi, H. Mokhtari, and A. Tossier, " Automation of an optical microscope ". AMSE, November 11-13 1991, DJERBA, TUNISIA.

- [CHA-88] Maher Charfi, " mise au point automatique d'un microscope " . Rapport de fin de stage présenté en vue d'obtenir le Diplome d'Etude Approfondies, 1988 Université de Nancy1. Faculté des sciences laboratoire d'électronique.
- [CHE-77] W. H. Chen, C. H. Smith, S. C. Fralick, "A fast computational algorithm for the discrete cosine transform", IEEE Trans. on com., Vol. COM-25, n° 9, pp. 1004-1009, Sep. 1977.
- [COO-65] J.W. Cooley, J.W. Turkey, "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series", Math. of Computation, vol. 19, April 1965, pp. 229 - 233.
- [DEN-89] G. V. Denisyuk, Yu. A. Vanyushkin, A. V. Nuzhin, and S. N. Yaryshev, "Use of CCD array for automating the focusing process". Sov. J. Opt. Technol. 56(3), March 1989.
- [GAU-81] G. Gaussorgues, " La thermographie infrarouge". Technique et documentation. 1981. pp 181 - 193.
- [GON-] R. C. Gonzalez, P. Wintz, "Digital image processing". Addison-Wesley Publishing Company.
- [HÄU-84] Gerd Häusler and Eva Körner, " Simple focusing criterion ". APPLIED OPTICS, / Vol. 23, No. 15 / 1 August 1984. pp 2468-2469.
- [HYD-83] P. D. Hyde and L. S. Davis, " Subpixel edge detection", Patern Recognition, Vol. 16, n° 4, pp. 413-420, 1983.
- [JAC-81] C. J. Jacobus and R. T. Chien, " Two new edge detectors". IEEE transactions on PAMI, Vol. PAMI-3, No. 5, September 1981.
- [JAI-81] A.K. Jain, "Image data compression : a review", Proc. IEEE, 1981, 69, pp. 349-389.
- [KAZ-89] Kazuyoshi Itoh, Atsushi Hayashi, and Yoshiki Ichioka, " Digitized optical microscopy with extended depth of field ". APPLIED OPTICS, / Vol.28, No.15 / 15 August 1989. pp 3487-3493.
- [KRO-86] E. P. Krotkov, "Visual hyperacuity : representation and computation of high precision position information", Computer Vision, Graphics and ImageProcessing 33, 99-115, 1986.
- [KUL-86] S. V. Kulogin and E. M. Apaim, "Proektirovanie foto - i kinopriborov (the design of still and movie cameras)", Mashinostroenie Press, Moscw 1986.
- [LEE-84] B. G. LEE, "A new algorithm to compute the discrete cosine transform", IEEE Trans. on A.S.S.P., Vol. A.S.SP.-32, n° 6, pp. 1243-1245, Dec. 1984.

- [LEN-90] Reimar Lenz and Dieter Fritsch, " Accuracy of videometry with CCD sensors ". ISPRS Journal of Photogrammetry and remote sensing, 45 (1990) 90 - 110.
- [MIT-89] R.B. Mitkin, " Operating algorithm of an image analysis system based on the correlation principle for the automatic lens focusing systems of cameras ". Sov.j.Opt.Technol.56(5), May 1989. pp 293-295.
- [MOL-88] K. D. Möller, " Optics". University Science Books 1988.
- [MON-89] S. Monchaud, " 3-D vision and range finding techniques ". Optics and Laser in Engineering, 10 (1989) 161 - 178.
- [MOR-89] I. Moring, H. Ailisto, V. Koivunen & R. Myllylä, " Active 3-D vision system for automatic model-based shape inspection ". Optics and Laser in Engineering, 10 (1989) 149 - 160.
- [NAL-87] V. S. Nalwa, " Edge detector resolution improvement by image interpolation ". IEEE transaction on PAMI, Vol. PAMI-9, No. 3, May 1987.
- [NEW-88] J.C. Newman, JR. and Wolf Elber, " Mechanics of fatigue crack closure ". ASTM 1988. Pages 272 - 274.
- [NOR-80] Norman C. Griswold, "Perceptual coding in the cosine transform domain", Optical Engineering, Vol. 19, n° 3, pp. 306-311. May/June 1980.
- [PEL-88] A. Pelat, "Les systèmes de télévision ", Editions Ellipses, 1988.
- [PEL-87] S. Peleg, D. Keren and L. Schwetzer, "Improving resolution using subpixel motion", Pattern Recognition Letters, 5 (1987), 223-226.
- [PEL-82] J.P. Pelletier, " Techniques numériques appliquées au calcul scientifique ". Edition MASSON 1982. Pages 156 - 161.
- [PIE-83] R.J.Pieper and A.Korpel, "Image processing for extended depth of field," Appl.opt. 22,1449-1453(1983).
- [PLU-89] Guy Pluvinage, " Mécanique élastoplastique de la rupture ". CEPADUES éditions, 1989, pp : 369 - 444.
- [PRA-78] W.K. Pratt, "Digital image processing", A. Wiley, New York, 1978.
- [RAV-89] Leonard E. Ravich, "T.V. cameras switch from tubes to CCDs". LASER FOCUS World october 1989 pages A4-A5. 25 th Anniversary Industry Guide.
- [SUG-85] S. A. Sugimoto and Y. Ichioka, " Digital composition of images with increased depth of focus considering depth information, " Appl.Opt.24, 2076-2084(1985).

- [TAB-84] A. J. Tabatabai and O. Robert Mitchell, "Edge location to subpixel values in digital imagery ", IEEE transactions on PAMI, Vol. PAMI-6, No. 2, March 1984.
- [TAR-88] A. M. Tareev, " Determination of the focusing zones of cameras having automatic lens focusing systems". Sov. J. Opt. Technol. 55(10), Oct. 1988.
- [TAT-75] R. Taton, " Bases de l'optique et principe des instruments". Editions EYROLLES, pp 111- 213, 1975.
- [TEC-91] "Le visiophone relancé grâce au RNIS". Technologies Janvier 1991. pp 46-49.
- [VET-84] M. Vetterli, H. J. Nussbaumer, "Simple FFT and DCT algorithms with reduced number of operations", Signal Processing, Vol. 6, n° 4, pp. 267-278. Aug. 1984.
- [WAN-83] Z. Wang, "Reconsideration of a fast computational algorithm for the discrete cosine transform", IEEE Trans. on com., Vol. COM-31, n° 1, pp. 121-123 Jan. 1983.

Annexes

Annexe1

Méthode de CHEN (1977)

La méthode proposée par CHEN [CHE-77] et étendue par WANG [WAN-83] est basée sur une propriété de décomposition récursive de la matrice de transformation A permettant de construire le vecteur transformé [X] à partir du vecteur du signal image [x].

$$[X_M] = \frac{2}{M} [A_M] [x_M]$$

Si M est une puissance entière de 2, la matrice [A] se décompose récursivement suivant le produit :

$$[A_M] = [P_M] \begin{bmatrix} A_{M/2} & 0 \\ 0 & R_{M/2} \end{bmatrix} [B_M]$$

où
$$[B_M] = \begin{bmatrix} I_{M/2} & I_{M/2} \\ I_{M/2} & -I_{M/2} \end{bmatrix}$$

avec I : matrice identité.

I : matrice identité à diagonale opposée.

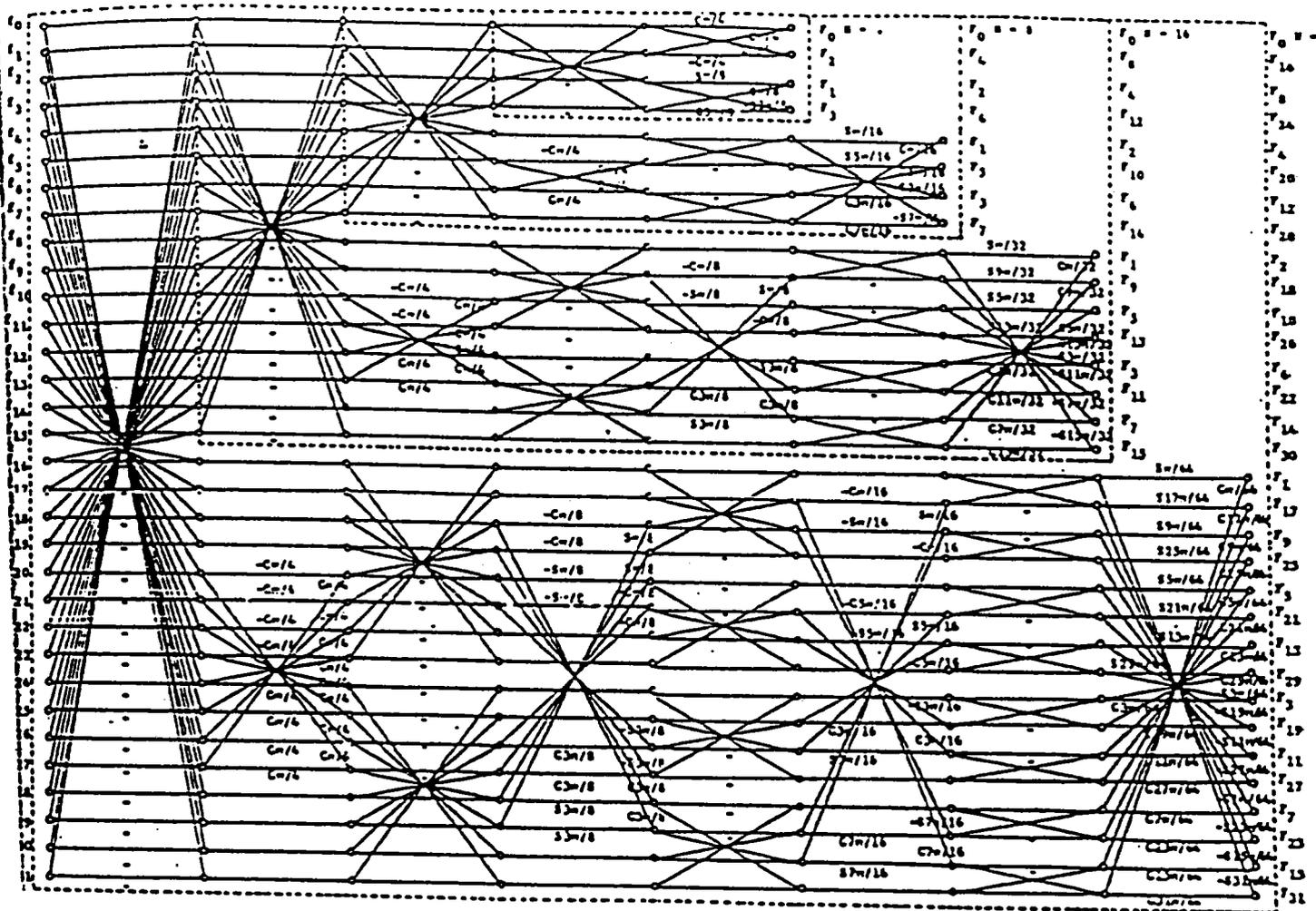
[P] est la matrice de permutation d'un vecteur depuis un ordre correspondant à l'inverse de l'ordre des bits vers l'ordre des bits vers un ordre correspondant à l'ordre binaire naturel.

[R] est une matrice qui se décompose en un produit de matrices (au nombre de $(2 \log M - 3)$) de 4 types différents qui sont en fait des matrices creuses avec généralement des coefficients non nuls sur les deux diagonales. De plus, pour certaines d'entre elles, les coefficients non nuls sont de valeur absolue unité. Le nombre d'opérations arithmétiques nécessaires pour effectuer la transformation est alors :

$$\text{nbreA} = \frac{3M}{2} (\log M - 1) + 2$$

$$\text{nbreM} = M \log M - \frac{3M}{2} + 4$$

Le nombre d'additions (nbreA) est donc sensiblement supérieur d'un facteur multiplicatif 3/2 à celui des multiplications (nbreM). Le graphe de réalisation rapide de cet algorithme rapide de transformation TDC est donné sur la figure suivante pour les dimensions $M = 4, 8, 16$ et 32 .



Graphe de transformation discrète rapide en cosinus (FDCT) par la méthode de CHEN pour $M = 4, 8, 16$ et 32 .

Annexe2

Méthode de VETTERLI et NUSSBAUMER (1984)

Cette méthode parue récemment [VET-84] permet de calculer de manière efficace la transformation discrète en cosinus (TDC) et la transformation discrète de Fourier (TFD). Les deux transformations sont liées dans la mesure où une transformation DFT de dimension M peut être calculée à partir de deux transformations TDC de dimension $M/4$ et qu'une transformation TDC de dimension M est obtenue à partir d'une transformation TFD de dimension M et de quelques opérations arithmétiques supplémentaires.

Le principe de la méthode est le suivant. Soient les trois transformations suivantes :

$$\text{DCT}(k, M, x) = \sum_{n=0}^{M-1} x(n) \cos \frac{\pi(2n+1)k}{2M} \quad k = 0, \dots, M-1 \quad (1)$$

$$\text{COSDFT}(k, M, x) = \sum_{n=0}^{M-1} x(n) \cos \frac{2\pi nk}{M} \quad k = 0, \dots, M-1 \quad (2)$$

$$\text{SINDFT}(k, M, x) = \sum_{n=0}^{M-1} x(n) \sin \frac{2\pi nk}{M} \quad k = 0, \dots, M-1 \quad (3)$$

Pour simplifier nous avons laissé de coté les facteurs de normalisation.

Du fait des propriétés suivantes :

$$\text{DCT}(M, M, x) = 0$$

$$\text{DCT}(-k, M, x) = \text{DCT}(k, M, x)$$

$$\text{DCT}(2M-k, M, x) = -\text{DCT}(k, M, x)$$

$$\text{COSDFT}(M-k, M, x) = \text{COSDFT}(k, M, x)$$

$$\text{SINDFT}(M-k, M, x) = -\text{SINDFT}(k, M, x)$$

$$\text{SINDFT}(M/2, M, x) = 0$$

$$\text{SINDFT}(0, M, x) = 0$$

On en déduit que :

$$\begin{aligned} \text{DCT}(k,M,x) &= \cos(\pi k/2M) \text{COSDFT}(k,M,x_1) - \sin(\pi k/2M) \text{SINDFT}(k,M,x_1) \\ &k = 0, 1, \dots, M-1. \end{aligned} \quad (4)$$

avec $x_1(n) = x(2n)$ pour $n = 0, \dots, (M/2)-1$.
 $x_1(M-n-1) = x(2n+1)$ pour $n = 0, \dots, (M/2)-1$.

$$\begin{aligned} \text{COSDFT}(k,M,x) &= \text{COSDFT}(k,M/2,x_2) + \text{DCT}(k,M/4,x_3) \\ &k = 0, 1, \dots, M-1. \end{aligned} \quad (5)$$

avec $x_2(n) = x(2n)$ pour $n = 0, \dots, (M/2)-1$.
 $x_3(n) = x(2n+1) + x(M-2n-1)$ pour $n = 0, \dots, (M/4)-1$.

$$\begin{aligned} \text{SINDFT}(k,M,x) &= \text{SINDFT}(k,M/2,x_2) + \text{DCT}(M/4-k,M/4,x_4) \\ &k = 0, 1, \dots, M-1. \end{aligned} \quad (6)$$

avec $x_2(n) = x(2n)$ pour $n = 0, \dots, (M/2)-1$.
 $x_4(n) = (-1)^n [x(2n+1) + x(M-2n-1)]$ pour $n = 0, \dots, (M/4)-1$.

Détermination du nombre d'opérations arithmétiques

La relation (4) montre que la transformation TDC de la suite $\{x\}$ est obtenue à partir des deux transformations COSDFT et SINDFT de la suite $\{x_1\}$ en utilisant deux multiplications et une soustraction pour chaque indice k , soit $2M$ multiplications et M soustractions pour l'ensemble des indices. En réalité, si on groupe le calcul du rang k et celui du rang $M-K$, on obtient une réduction supplémentaire du nombre de multiplications. En effet, on a :

$$\begin{pmatrix} \text{DCT}(k,M,x) \\ \text{DCT}(M-k,M,x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \pi k/2M & -\sin \pi k/2M \\ \sin \pi k/2M & \cos \pi k/2M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{COS DFT}(k,M,x_1) \\ \text{SIN DFT}(k,M,x_1) \end{pmatrix} \quad (7)$$

Si on pose $\mu_{k,1} = \cos \pi k/2M + \sin \pi k/2M$ et $\mu_{k,2} = \cos \pi k/2M - \sin \pi k/2M$

$$\beta_k = \text{COSDFT}(k,M,x_1) + \text{SINDFT}(k,M,x_1)$$

$$w_{k,1} = \beta_k \cos \pi k/2M \quad (8)$$

$$w_{k,2} = \mu_{k,1} \text{SINDFT}(k,M,x_1) ; w_{k,3} = \mu_{k,2} \text{COSDFT}(k,M,x_1)$$

$$\begin{aligned} \text{Alors : DCT}(k,M,x) &= w_{k,1} - w_{k,2} & k = 0, 1, \dots, M/2-1. \\ \text{DCT}(M-k,M,x) &= w_{k,1} + w_{k,3} & (9) \end{aligned}$$

$$\text{et DCT}(M/2,M,x) = \cos \pi/4 \quad \text{COSDFT}(M/2,M,x_1)$$

Ce qui correspond en définitive aux nombres d'opérations suivants :

$$\left[\begin{array}{l} 3 \text{ mult.} \\ 3 \text{ add.} \end{array} \right] \times (M/2 - 1) + \left[\begin{array}{l} 1 \text{ mult.} \\ 0 \text{ add.} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} (3M/2 - 2) \text{ mult.} \\ (3M/2 - 3) \text{ add.} \end{array} \right]$$

Car, pour $k = 0$, il n'y a pas de multiplication ou d'addition à effectuer.

Donc, si on note nbreM et nbreA les nombres respectifs de multiplications et d'additions nécessaires à la transformation TDC, alors on a :

$$\begin{aligned} \text{nbreM [DCT}(M)] &= \text{nbreM [COSDFT}(M)] + \text{nbreM [SINDFT}(M)] + (3M/2 - 2) \\ & (10) \\ \text{nbreA [DCT}(M)] &= \text{nbreA [COSDFT}(M)] + \text{nbreA [SINDFT}(M)] + (3M/2 - 3) \end{aligned}$$

La relation (5) montre qu'il est nécessaire d'effectuer une addition pour chaque indice k (mais seulement sur $M/2$ indices à cause des propriétés (3) mais qu'en plus, la détermination de la suite x_3 nécessite $M/4$ additions supplémentaires.

Donc, en définitive, les nombres de multiplications et d'additions nécessaires à la transformation COSDFT sont :

$$\begin{aligned} \text{nbreM [COSDFT}(M)] &= \text{nbreM [DCT}(M/4)] + \text{nbreM [COSDFT}(M/2)] \\ & (11) \\ \text{nbreA [COSDFT}(M)] &= \text{nbreA [DCT}(M/4)] + \text{nbreA [COSDFT}(M/2)] + 3M/4 \end{aligned}$$

La relation (6) montre qu'il est nécessaire d'effectuer une addition pour chaque indice k (mais seulement sur $M/2$ indices à cause des propriétés (3). Il faut de plus ajouter $M/4$ additions pour la détermination de la suite $\{x\}$.

Les nombres de multiplications et d'additions nécessaires à la transformation SINDFT sont en définitive :

$$\text{nbreM [SINDFT(M)]} = \text{nbreM [DCT (M/4)]} + \text{nbreM [SINDFT (M/2)]} \quad (12)$$

$$\text{nbreA [SINDFT(M)]} = \text{nbreA [DCT (M/4)]} + \text{nbreA [SINDFT (M/2)]} + (3M/4 - 2)$$

De plus, le nombre d'opérations nécessaires pour les transformations sur les couples de points sont :

$$\text{nbreM [DCT (2)]} = 1 \quad ; \quad \text{nbreA [DCT (2)]} = 2$$

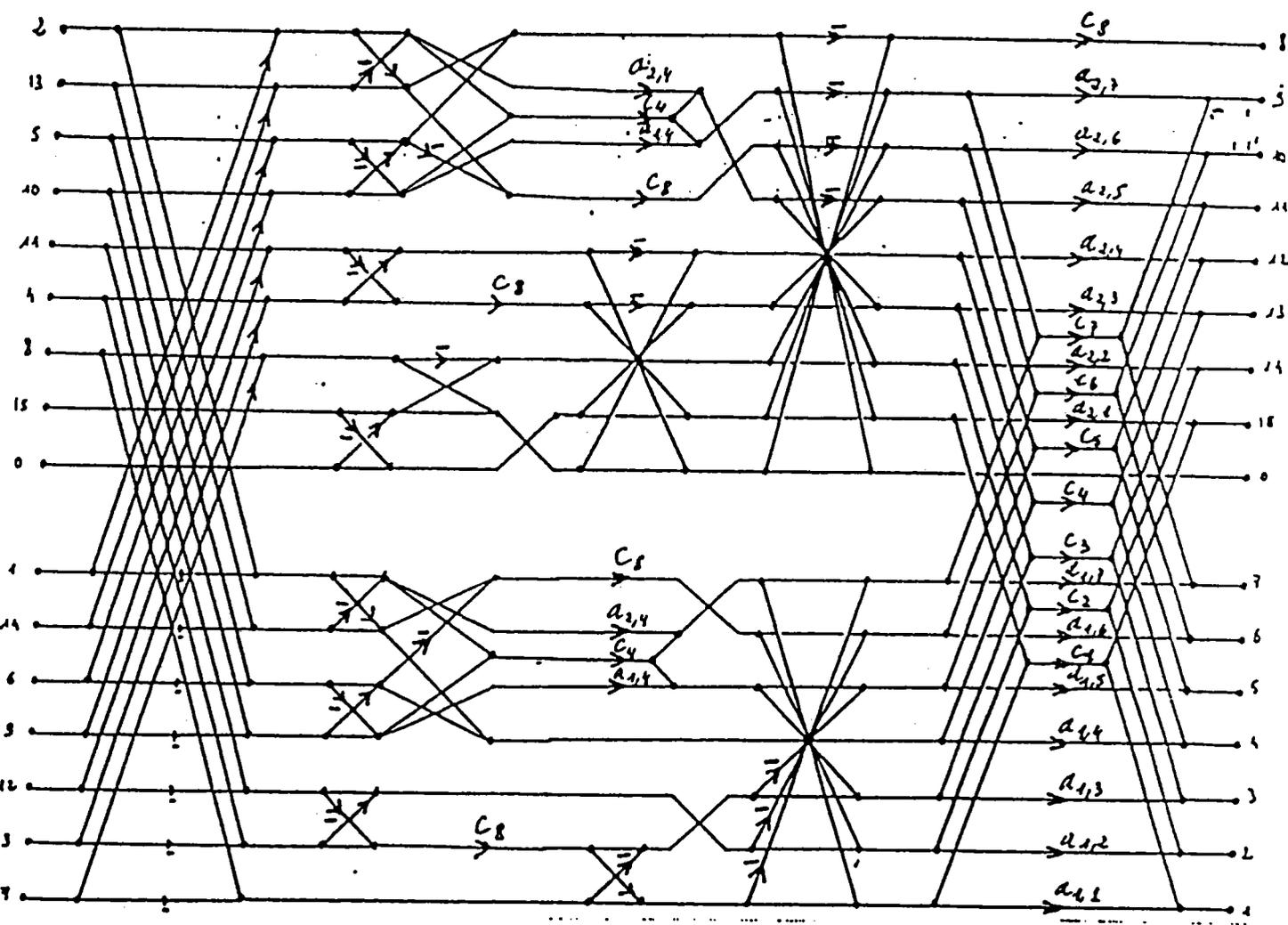
$$\text{nbreM [COSDFT (2)]} = 0 \quad ; \quad \text{nbreA [COSDFT (2)]} = 2 \quad (13)$$

$$\text{nbreM [SINDFT (2)]} = 0 \quad ; \quad \text{nbreA [SINDFT (2)]} = 0$$

Ceci permet finalement de calculer le nombre d'opérations nécessaires à l'obtention de la transformation TDC sur une séquence de signaux 1-D de longueur M, puissance entière de 2.

$$\begin{aligned} \text{nbreM} &= \frac{M}{2} [3 \log M - 2] + 1 \\ \text{nbreA} &= \frac{M}{2} \log M \end{aligned} \quad (14)$$

Nous avons représenté sur la figure suivante le graphe de la transformation TDC pour M = 16. Le transformateur obtenu correspond à une structure pipeline d'ordre 5. Si on numérote de 1 à 5 les étages du transformateur depuis les données d'entrée à transformer, on s'aperçoit que les étages 1 et 4 ne comportent que des opérations de type addition (ou soustraction), que les étages 3 et 5 comportent des multiplications et des additions (d'où l'emploi de multiplieurs rapides) et que l'étage 2 comporte surtout des additions et seulement 2 multiplications (2 multiplieurs lents suffisent).



Graphe de transformation discrète rapide en cosinus (FDCT) par la méthode de VETTERLI et NUSSBAUMER pour $M = 16$

où

$$c_k = \cos(k\pi/32)$$

$$s_k = \sin(k\pi/32)$$

$$a_{1,k} = -(c_k + s_k)$$

$$a_{2,k} = (s_k - c_k)$$

Annexe3

Méthode de LEE (1984)

Cette méthode apparue récemment [LEE-84], utilise dans son principe une décomposition analogue à celle de COOLEY-TUKEY pour la transformation de Fourier rapide. Nous allons expliciter son principe sur la transformation discrète inverse en cosinus.

Nous rappelons que la transformation directe (TDC) est donnée par :

$$X(k) = \frac{2}{N} c(k) \sum_{n=0}^{M-1} x(n) \cos \frac{\pi(2n+1)k}{2M}$$
$$k = 0, 1, \dots, M-1$$

avec $c(k) = 1/\sqrt{2}$ pour $k = 0$, $c(k) = 1$ sinon, et pour la transformation inverse (TDCI), elle est donnée par :

$$x(n) = \sum_{k=0}^{M-1} X(k) c(k) \cos \frac{\pi(2n+1)k}{2M}$$

$$n = 0, 1, \dots, M-1$$

On suppose que M est un nombre pair :

En posant :

$$g(n) = \sum_{k=0}^{M/2-1} X(2k) C_{2M}^{(2n+1)(2k)} \quad (1)$$

$$k = 0, 1, \dots, N/2 - 1$$

et

$$h'(n) = \sum_{k=0}^{M/2-1} \hat{X}(2k+1) C_{2M}^{(2n+1)(2k+1)} \quad (2)$$

avec

$$\hat{X}(t) = c(t) X(t)$$

et

$$C_{2M}^t = \cos \frac{t \pi}{2 M}$$

On en déduit que :

$$\begin{aligned} X(n) &= g(n) + h'(n) \\ X(M-1-n) &= g(n) - h'(n) \quad n = 0, 1, \dots, N/2 - 1 \end{aligned} \quad (3)$$

Du fait que $C^{(2n+1)2k}$ est identique à $C^{(2n+1)k}$, on en déduit directement que $g(n)$ s'obtient par une transformation discrète inverse en cosinus sur une séquence de $M/2$ points (ceux correspondants à un rang impair).

Par contre, $h'(n)$ n'est pas directement une transformation discrète inverse en cosinus également sur $M/2$ points (ceux correspondants à un rang impair).

Cependant, le facteur $C^{(2n+1)(2k+1)}$ intervenant dans la relation (2) se décompose suivant une formule trigonométrique bien connue :

$$C_{2M}^{(2n+1)(2k+1)} = \frac{1}{2C_{2M}^{(2n+1)}} [C_{2M}^{(2n+1)2k} + C_{2M}^{(2n+1)2(k+1)}] \quad (4)$$

On en déduit que :

$$2C_{2M}^{(2n+1)} h'(n) = \sum_{k=0}^{M/2-1} \hat{X}(2k+1) C_{2M}^{(2n+1)2k} + \sum_{k=0}^{M/2-1} \hat{X}(2k+1) C_{2M}^{(2n+1)2(k+1)}$$

Or

$$\sum_{k=0}^{M/2-1} \hat{X}(2k+1) C_{2M}^{(2n+1)2k} = \sum_{k=0}^{M/2-1} \hat{X}(2k+1) C_{2M}^{(2n+1)2(k+1)} \quad (5)$$

Car $C^{(2n+1)} 2^{(M/2)} = 0$ et en considérant que $X(-1) = 0$

En définitive, on obtient :

$$2C_{2M}^{(2n+1)} h'(n) = \sum_{k=0}^{M/2-1} [\hat{X}(2k-1) + \hat{X}(2k+1)] C_{2^{(M/2)}}^{(2n+1)k} \quad (6)$$

Donc $h(n) = 2C^{(2n+1)} h'(n)$ est une transformation discrète inverse portant sur $M/2$ points (ceux correspondants à un rang impair) et l'on a :

$$X(n) = g(n) + \frac{1}{2C_{2M}^{(2n+1)}} h(n) \quad n = 0, 1, \dots, N/2 - 1 \quad (7)$$

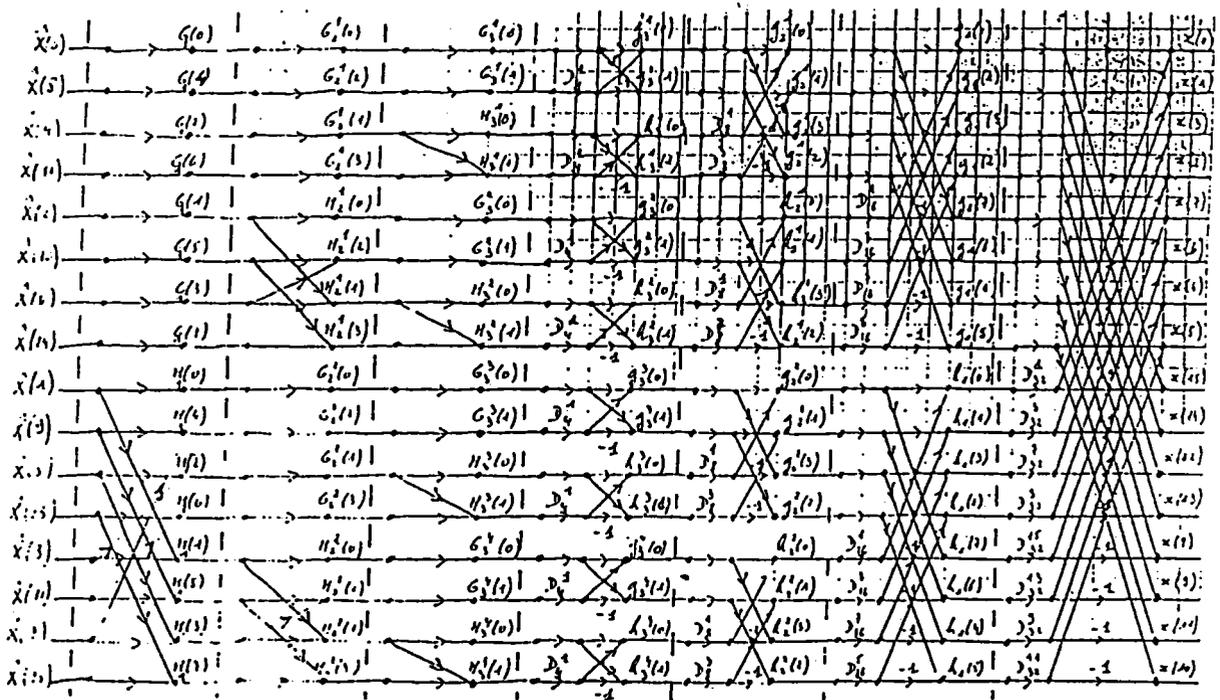
$$X(M-1-n) = g(n) - \frac{1}{2C_{2M}^{(2n+1)}} h(n)$$

La décomposition se poursuit jusqu'aux transformations en dimension 2, si M est une puissance entière de 2.

La figure suivante donne le graphe de la transformation TDCI pour $M = 16$. On remarque que la structure de réalisation est de type pipeline à 7 étages dont les trois premiers ne comportent que des opérations d'addition (respectivement en nombre 7, 6 et 4) et que les quatre derniers comportent des opérations de multiplications et d'additions (en nombre 16 et 8 pour chacun d'eux). On peut remarquer que le graphe est plus régulier dans ce dernier algorithme qu'avec le précédent (VETTERLI). Du fait que la transformation TDC est orthonormale, la transformation TDC s'obtient à partir de la transformation inverse TDCI par inversion du sens de parcours du graphe.

Le nombre d'opérations arithmétiques à effectuer pour calculer la transformation TDC se déduit aisément des relations (1), (2) et (3) et des conditions initiales portant sur la transformation TDC de 2 points. On obtient finalement :

$$\begin{aligned} \text{nbreA} &= \frac{M}{2} [3 \log M - 2] + 1 \\ \text{nbreM} &= \frac{M}{2} \log M \end{aligned} \quad (8)$$



Graphe de transformation discrète rapide inverse en cosinus (TDRIC) par la méthode de B.G. LEE pour $M = 16$ avec $X(n) = c(n) X(n)$ et $c(n) = 1/\sqrt{2}$ si $n=0$ et $D_{ij} = 1/(2\cos i)$

Annexe 4

Fonction de transfert optique

La fonction de transfert optique d'un système est égale à la fonction d'autocorrélation de la fonction de répartition d'amplitude pupillaire [GAU-81]. La fonction pupillaire est une fonction cercle réelle et constante à l'intérieur de la pupille, nulle ailleurs.

La signification physique de la fonction d'autocorrélation pupillaire dans le cas d'un système optique parfait à pupille circulaire, peut être exprimée par une interprétation simple en considérant le contour de la pupille centré en O et le même contour après translation dans la direction v , choisie arbitrairement compte-tenu de la symétrie de révolution de la fonction pupillaire.

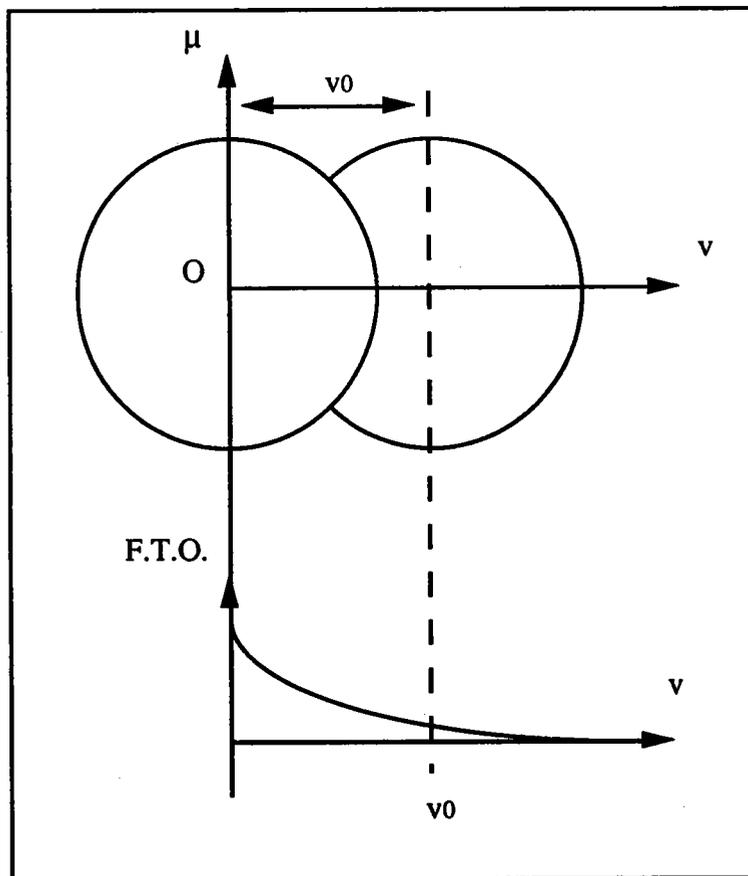


Figure 1 : mesure de la fonction de transfert optique.

La valeur de la F.T.O. pour la fréquence spatiale ν_0 est obtenue par évaluation du rapport entre l'aire commune à ces deux contours, pour une translation de ν_0 , et l'aire totale de la pupille. La fonction de transfert prend l'allure d'une figure de révolution dont la section méridienne est donnée par :

$$\text{F.T.O.} = \frac{2}{\pi} \left[\text{Arc cos } \frac{\nu}{\nu_c} - \frac{\nu}{\nu_c} \sqrt{1 - \frac{\nu^2}{\nu_c^2}} \right]$$

pour $\nu < \nu_c$ (fréquence spatiale de coupure du système optique).

Il apparaît ainsi que pour une fréquence spatiale ν_0 dite "fréquence de coupure", la surface commune devient nulle lorsque la translation est égale à deux fois le rayon d'ouverture $D = \lambda \nu$ de la pupille. Le système ne transmet alors plus aucune modulation.

Mesure de la fonction de transfert optique :

La fonction de transfert optique permet de caractériser de façon quantitative les performances d'un instrument. La mesure la plus simple consiste à utiliser des mires dont la luminance varie sinusoidalement en fonction de l'espace. L'analyse de l'image permet la détermination du facteur de modulation.

D'autres méthodes de mesures utilisent le fait que la F.T.O. est la fonction d'autocorrélation de la fonction pupillaire ou la transformée de Fourier de la fonction de diffusion.

Annexe 5

Position du centre de gravité

Dans cette annexe, on décrit la méthode qui permet de retrouver dans un signal sans bruit la position du maximum à partir du centre de gravité [KRO-86].

Pour avoir des résultats correctes, il faut soustraire au niveau de gris, le niveau de gris du fond, de part et d'autre du contour. En effet le centre de gravité de deux points de niveaux de gris respectifs 1 et 2 est situé à deux tiers de la distance entre les deux points à partir du point de niveau de gris 2. Par contre le centre de gravité des points de niveaux de gris respectifs 201 et 202 est pratiquement au milieu.

Le centre de gravité est donné par :

$$x_G = \frac{\sum_{i=-N}^{i=N} iG_i}{\sum_{i=-N}^{i=N} G_i}$$

N est choisi aussi grand que possible pour recouvrir la luminance minimale de chaque côté. Si on soustrait G_p de tous les G_i , on peut donc supposer que :

$$G_N = G_{-N} = G_b = 0$$

Sujet de Thèse : Auto-focalisation par transformations orthogonales :
automatisation d'un système de mesure de la longueur de fissure sur un faciès de
rupture.

Résumé : Dans ce mémoire les différentes étapes de la formation d'une image industrielle sont analysées. Nous exposons les différentes méthodes d'éclairage utilisées. Nous abordons aussi les techniques de mesure sous pixel qui améliorent la précision des mesures en utilisant un traitement supplémentaire de l'information.

Après une brève exposition des techniques usuelles d'autofocus, de nouvelles techniques utilisant les transformations orthogonales sont présentées et leur aptitude à caractériser des morphologies différentes sont étudiées. Ce chapitre s'achève par la comparaison des deux transformations proposées et par la présentation des algorithmes de calcul.

L'utilisation des techniques d'auto-focus dans les systèmes de métrologie par vision est abordée dans le troisième chapitre. Les différents paramètres agissant sur la précision des mesures sont étudiés.

Dans le dernier chapitre un système de vision pour l'automatisation de mesure de la longueur de fissure sur un faciès de rupture est proposé. Ce système utilise l'aptitude des transformations orthogonales étudiées à reconnaître une texture. Le dispositif matériel et logiciel est présenté ; les différentes étapes du traitement sont exposées.

Mots clés : Auto-focus, transformée de Fourier discrète, transformée en Cosinus discrète, métrologie par vision, mesure de la longueur de fissure.

Title : Auto-focusing by orthogonal transforms : Automation of crack length measurement.

Abstract : The different steps for obtaining industrial images are presented. Usual light conditions are discussed. We deal with subpixel measurement technics, wich improve the measurement accuracy by further image data processing.

After a brief overview of the usual auto-focusing technics, new procedures using orthogonal transforms are presented and their ability to characterize various morphologies are studied. By comparing the two proposed transformations and the structure of their computing algorithms, provisional conclusions are proposed.

The implementation of auto-focusing camera technics in metrology systems is dealt with in the third chapter, and the set of the parameters determining the accuracy measurement is studied.

In the last chapter, an automatic vision system for the automatic of crack length measurement is proposed. The system uses the ability of the studied orthogonal transforms to recognize a texture. Hardware and software devices are presented ; the different steps of the processing procedure are exposed.

Keywords : Auto-focus, discrete Fourier transform, discrete Cosinus transform, vision metrology, crack length measurement.