

ISSN 0567-6576

Bulletin des Académie & Société Lorraines des Sciences

**ANCIENNE
SOCIÉTÉ DES SCIENCES DE NANCY**

fondée en 1828

**Etablissement d'utilité publique
(Décret ministériel du 26 avril 1968)**

BULLETIN TRIMESTRIEL

**TOME 32 NUMERO 4
1993**

AVIS AUX MEMBRES

COTISATIONS.

Les Membres des Académie & Société Lorraines des Sciences acquittent une cotisation annuelle. Celle-ci est fixée à 150 francs en 1993.

Le paiement de la cotisation donne droit au service du bulletin, et permet de bénéficier de ventes à tarif réduit. La remise accordée aux Membres des Académie & Société Lorraines des Sciences ne peut atteindre ou dépasser 50 % du prix de vente de la publication. Son taux, proposé par le Conseil, est ratifié en simple Assemblée générale annuelle (Statuts, Titre I, Art. III).

Tout règlement est à adresser, de préférence par chèque, à l'ordre du Trésorier des Académie & Société Lorraines des Sciences, Biologie végétale 1^{er} Cycle, BP 239, 54506 Vandœuvre Cédex.

Chèque bancaire ou chèque postal au compte 45 24 V Nancy.

BULLETIN.

Pour la vente exceptionnelle de numéros isolés ou anciens s'adresser au Trésorier ou au Secrétaire Général, 8, rue des Magnolias, Parc Jolimont-Trinité, 54220 Malzéville.

Afin d'assurer une parution régulière du Bulletin, les Membres ayant présenté une communication sont invités à remettre leur manuscrit en fin de séance au Secrétaire Général. A défaut, ces manuscrits seront envoyés à son adresse ci-dessus, dans les quinze jours suivant la séance. Passé ce délai, la publication sera ajournée à une date indéterminée.

Les corrections d'auteurs sur épreuves devront obligatoirement être faites dans les huit jours suivant la réception des épreuves, faute de quoi ces corrections seront faites d'office par la Rédaction, sans qu'il soit admis de réclamations. Les demandes de tirés à part non formulées en tête des manuscrits ne pourront être satisfaites ultérieurement.

Les clichés sont à la charge des auteurs.

Dans la mesure des possibilités financières, 20 tirés à part gratuits sont offerts aux auteurs. Des exemplaires payants supplémentaires peuvent être obtenus. S'adresser au Trésorier ou au Secrétaire Général.

Il n'y a pas de limitation de longueur ni du nombre des publications. Toutefois, les publications des travaux originaux restent subordonnées aux possibilités financières de la Société. En dernier lieu, le Conseil est souverain.

Il est précisé une nouvelle fois, en outre, que les observations, théories, opinions, émises par les auteurs dans les publications de l'Académie & Société Lorraines des Sciences, n'impliquent pas l'approbation de notre Groupement. La responsabilité des écrits incombe à leurs auteurs seuls.

Toute publication en tant que « note » doit être présentée par un membre titulaire de l'Académie. Il n'y a pas de « comité » de lecture pour l'agrément d'impression.

BULLETIN

des ACADEMIE & SOCIETE
LORRAINES DES SCIENCES

(Ancienne Société des Sciences de Nancy)
(Fondée en 1828)

BIBLIOTHEQUE INTERUNIVERSITAIRE DE NANCY
SECTION SCIENCES

Rue du Jardin Botanique
54600 VILLERS-LES-NANCY
FRANCE

S O M M A I R E

-:-

	Pages
NUS Patrice, VOMSCHEID Claude. Implantation des transformées de HARTLEY et de FOURIER glissantes sur le processeur DSP96002. Application à l'analyse vibratoire d'un moteur électrique de forte puissance.....	131
HEIT B., SCHNEIDER G., SIMON T., MARTIN G., BREMONT J. Evaluation du flou optique pour la mesure de profondeur en vision monoculaire.....	143
Procès-verbal: séance du 13 mai 1993.....	165

**IMPLANTATION DES TRANSFORMÉES DE
HARTLEY ET DE FOURIER GLISSANTES SUR LE
PROCESSEUR DSP96002. APPLICATION À
L'ANALYSE VIBRATOIRE D'UN MOTEUR
ÉLECTRIQUE DE FORTE PUISSANCE.***

Patrice NUS, Claude VOMSCHEID

Université de Nancy I, CRAN - CNRS URA 821, B.P. 239
54506 Vandœuvre
Tél. 83.91.20.69, Fax 83.91.20.30

RÉSUMÉ

Dans cet article, nous proposons l'implantation sur le processeur DSP96002 de Motorola, d'une méthode d'analyse spectrale classique fondée sur l'exploitation des transformées de Fourier et Hartley glissantes. Nous détaillons la mise en œuvre de l'algorithme sur le processeur et notamment l'utilisation d'oscillateurs numériques pour la synthèse des fonctions trigonométriques. Nous étudions également le problème de l'instabilité de l'algorithme glissant dont l'origine provient du codage sur 32 bits utilisé par ce calculateur. Après l'évaluation de la complexité numérique de l'algorithme, nous présentons une application de cette technique d'analyse pour la mesure de l'intensité vibratoire d'un moteur électrique de forte puissance.

1. INTRODUCTION

Le contrôle fonctionnel des moteurs électriques de forte puissance se fait généralement à l'aide de systèmes spécialisés,

(*).Séance du 8-4-1993. Communication présentée par Pr. J. FLECHON

commercialisés par des sociétés comme Brüel & Kjaer ou Schenck. Les performances de ces appareils dont l'électronique est souvent analogique, peuvent cependant être égalées en utilisant les techniques d'analyse spectrale numériques implantées sur des calculateurs rapides comme le DSP96002 de Motorola. Parmi les nombreuses méthodes d'analyse fréquentielle, l'approche classique par transformée de Fourier reste la plus utilisée, d'une part parce que ses performances sont acceptables pour de nombreuses applications et, d'autre part, parce que ses caractéristiques sont parfaitement connues.

Dans cet article, nous présentons un exemple d'utilisation des méthodes d'analyse spectrale classiques par transformée de Fourier ou de Hartley. Nous nous sommes intéressés aux algorithmes glissants qui conduisent à une estimation spectrale en temps réel puis à leur implantation sur le processeur de signal DSP96002. Le système d'analyse fréquentiel est utilisé pour la mesure de l'intensité vibratoire d'un moteur électrique que nous comparons à celle obtenue par un appareil spécialisé dans l'analyse des vibrations mécaniques.

Dans les parties 2 et 3 de l'article, un rappel sur les transformées de Fourier et de Hartley ainsi que leurs formes glissantes est présenté. Ensuite dans la partie 4, nous décrivons leur implantation sur le DSP96002 puis une application sur un moteur électrique dans la dernière partie.

2. LES TRANSFORMÉES DE FOURIER ET HARTLEY

Une transformée effectue une décomposition d'un signal en fonctions élémentaires orthogonales permettant une transformation par exemple, du domaine temporel dans le domaine fréquentiel. Les fonctions de base les plus exploitées sont les fonctions trigonométriques associées à la transformée de Fourier.

2.1 Définition des transformées

La transformée de Fourier discrète (TFD), notée $F(k)$, établit une relation entre deux suites de nombres complexes $x(n)$ et $F(k)$ de période N , telle que :

$$F(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \exp\left(\frac{-j2\pi nk}{N}\right) \quad (2.1)$$

Dans la plupart des cas, la série $x(n)$ est à valeurs réelles, on peut alors utiliser les transformées à coefficients réels notamment celle de Hartley discrète (THD) [1], notée $H(k)$, telle que:

$$H(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \text{cas}\left(\frac{-2\pi nk}{N}\right) \quad (2.2)$$

où $\text{cas}(\theta) = \cos(\theta) + \sin(\theta)$ constitue le noyau de la transformée de Hartley.

Une relation lie ces deux transformées, on trouvera dans [1] les liens qui les unissent. Pour leurs calculs (voir [2] et [3]), on utilise les algorithmes rapides (TFR et THR), où $N = 2^M$ avec M entier. La complexité numérique est de l'ordre de $2N \log_2(N)$ multiplications pour Fourier et $N \log_2(N)$ pour Hartley. L'algorithme THR est donc environ deux fois plus rapide que celui associé à Fourier.

2.2 Densité spectrale de puissance

La densité spectrale de puissance, notée $DSP(k)$, peut être estimée à l'aide de ces transformées selon la formulation du périodogramme suivante :

$$DSP(k) = N \cdot |F(k)|^2 = N \cdot \frac{H(k)^2 + H(N-k)^2}{2} \quad (2.3)$$

Le spectre d'un signal réel est donc identique pour les deux transformées.

3. LES TRANSFORMÉES GLISSANTES

Les algorithmes rapides nécessitent l'acquisition de tous les échantillons du signal avant leur calcul. Pour une analyse spectrale en temps réel avec des fréquences d'échantillonnage plus élevées que celles possibles dans l'approche rapide, les formes glissantes sont plus appropriées [4] [5] car elles conduisent à une réduction du volume des calculs à exécuter entre deux échantillons successifs.

3.1 TFD glissante

Soit l'instant p à partir duquel les échantillons $x(p-n)$ de $n = 0, \dots, N-1$ sont connus, reprenons la définition (2.1) de la transformée de Fourier $F_p(k)$, à l'instant p :

$$F_p(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(p-n) \cdot W_N^{nk}$$

avec $W_N^{nk} = \exp\left(\frac{-j2\pi nk}{N}\right)$ (3.1)

si l'on prend la transformée en z de $F_p(k)$, il vient :

$$Z[F_p(k)] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} W_N^{nk} \cdot \sum_{p=-\infty}^{+\infty} x(p-n) \cdot z^{-p}$$

(3.2)

finalement comme la transformée en z de la séquence $x(p-n)$ est égale à $z^{-n} \cdot X(z)$, on obtient :

$$Z[F_p(k)] = \frac{1}{N} X(z) \frac{1 - z^{-N}}{1 - W_N^k \cdot z^{-1}}$$

(3.3)

La forme récursive s'écrit alors :

$$F_p(k) = \frac{x(p) - x(p-N)}{N} + \exp\left(\frac{-j2\pi k}{N}\right) F_{p-1}(k) \quad (3.4)$$

La transformée $F_p(k)$ à l'instant p fait intervenir la différence entre les deux échantillons extrêmes et la transformée $F_{p-1}(k)$ à l'instant $p - 1$ pondérée par le facteur de phase $\exp(\cdot)$, il s'agit de la forme glissante de la TFD. Le nombre d'opérations nécessaires à son calcul est de $4N+2$ multiplications et $4N+2$ additions. Pour un signal $x(n)$ réel, la TFD glissante est calculée sur seulement $N/2$ points, puisque que le spectre présente une symétrie, avec $2N+2$ multiplications et $1.5N+2$ additions.

3.2 THD glissante

Pour la THD glissante, la même approche peut être appliquée. Cependant, en utilisant les relations entre Fourier et Hartley [1], on obtient une forme récursive plus simple qui est la suivante :

$$H_p(k) = \Delta x + \cos(\theta) H_{p-1}(k) + \sin(\theta) H_{p-1}(N - k) \quad (3.5)$$

où $\cos(\theta)$ et $\sin(\theta)$ sont respectivement le cosinus et le sinus de l'angle $\theta = 2\pi k/N$ et Δx la différence entre les deux échantillons extrêmes pondérée par $1/N$. Cette équation nécessite $2N+1$ multiplications et $3N+1$ additions, soit une complexité supérieure à celle de Fourier. Nous verrons néanmoins dans la partie implantation, qu'il est possible de diminuer sensiblement le nombre d'opérations en décomposant l'équation (3.5).

3.3 Avantages de la forme glissante

Le principal avantage est relatif à la résolution spectrale Δf de l'analyse, définie comme le quotient de la fréquence d'échantillonnage F_e sur le nombre de points N . En effet, dans les

formes glissantes (3.4) et (3.5) il n'existe aucune contrainte sur le nombre d'échantillons N contrairement aux algorithmes rapides. Il est donc possible de "régler" la résolution fréquentielle Δf quand F_e est constante, en faisant varier N. Cette propriété est intéressante comme nous le verrons dans l'application présentée ci-après. D'autre part, les méthodes glissantes ne nécessitent aucune opération de décryptage, comme dans les algorithmes rapides, ce qui réduit encore le volume des calculs. Quant aux fenêtres généralement utilisées pour atténuer les interférences entre les composantes spectrales, voir [5] pour les formes récursives associées aux transformées glissantes.

4. IMPLANTATION

Les calculs relatifs aux équations (3.4) et (3.5) sont exécutés par le DSP96002 de Motorola. L'implantation repose sur les équations présentées ci-après dans lesquelles on distingue deux parties associées chacune à un champ mémoire X ou Y du processeur. Pour Fourier, la décomposition en partie réelle notée $\Re[.]$ et imaginaire $\Im[.]$, conduit au système suivant avec la même notation que précédemment :

$$\begin{aligned}\Re[F_p(k)] &= \Delta x + \cos(\theta) \cdot \Re[F_{p-1}(k)] + \sin(\theta) \cdot \Im[F_{p-1}(k)] \\ \Im[F_p(k)] &= \cos(\theta) \cdot \Im[F_{p-1}(k)] - \sin(\theta) \cdot \Re[F_{p-1}(k)]\end{aligned}\quad (4.1)$$

Le calcul de ces deux équations pour k variant de 0 à N/2, conduit à la TFD glissante.

Quant à Hartley, on obtient le système suivant :

$$\begin{aligned}H_p(k) &= \Delta x + \cos(\theta) \cdot H_{p-1}(k) + \sin(\theta) \cdot H_{p-1}(N-k) \\ H_p(N-k) &= \Delta x + \cos(\theta) \cdot H_{p-1}(N-k) - \sin(\theta) \cdot H_{p-1}(k)\end{aligned}\quad (4.2)$$

où les deux équations sont calculées également pour k variant de 0 à N/2. On notera que deux coefficients de la THD glissante sont

calculés avec les mêmes termes $\sin(\theta)$, $\cos(\theta)$, $H_{p-1}(k)$ et $H_{p-1}(N-k)$. On obtient donc un calcul rapide de la THD glissante sur le DSP96002 par élimination de la moitié des accès mémoire. D'autre part, les deux systèmes (4.1) et (4.2) sont semblables et si l'on associe la partie réelle de la TFD glissante à $H_p(k)$ et la partie imaginaire à $H_p(N-k)$, le programme développé pour Hartley est utilisable également pour Fourier en faisant néanmoins $\Delta x = 0$ dans le calcul de la partie imaginaire.

4.1 Les valeurs sinus et cosinus

On utilise généralement des tables contenant ces valeurs trigonométriques. Cependant, leur gestion est délicate étant donné le choix possible du nombre d'échantillons N . C'est pourquoi nous avons préféré synthétiser ces valeurs à l'aide de l'équation récurrente suivante de la fonction sinus :

$$s(k) = 2 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right) \cdot s(k-1) - s(k-2) \quad (4.3)$$

En utilisant dans l'implantation, deux équations (4.3) avec des conditions initiales $s(-1)$ et $s(-2)$ fixant un déphasage de $\pi/2$ entre les signaux de sortie de ces "oscillateurs numériques", on synthétise les deux fonctions trigonométriques. Ces oscillateurs permettent également de changer facilement la taille N de la transformée en modifiant la condition initiale $s(-2)$. Pour les deux fonctions trigonométriques, $s(-1)$ et $s(-2)$ sont les suivantes :

$$\begin{aligned} \text{pour } \sin(\theta) &\Rightarrow s(-1) = 0 \quad s(-2) = \sin\left(\frac{-2\pi}{N}\right) \\ \text{pour } \cos(\theta) &\Rightarrow s(-1) = 1 \quad s(-2) = \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right) \end{aligned} \quad (4.4)$$

On notera que les valeurs sinus et cosinus pour $\theta = 0$ ne sont pas calculées afin d'éviter l'exécution de ces opérations par le

processeur. La transformée pour $k = 0$ est exécutée avant une boucle principale qui détermine les coefficients des transformées de $k = 1$ à $N/2$ selon les équations (4.1) ou (4.2).

4.2 Stabilité de l'algorithme glissant

L'algorithme développé à partir des équations (4.1) ou (4.2) qui intègre également la synthèse des valeurs sinus et cosinus selon l'équation (4.3), a été implanté sur le DSP96002 dont l'arithmétique est à virgule flottante au standard IEEE-754 sur 32 bits. Le fonctionnement sur le DSP96002 montre une divergence de l'algorithme à long terme, algorithme dont la stabilité est fixée par le terme $W_N^k = \exp(-j2\pi k/N)$ de l'équation (3.3). Pour évaluer les risques de divergence, la figure 1 montre pour différentes valeurs de N , la variation autour de l'unité, du module du facteur de phase $\exp(-j2\pi k/N)$ synthétisé sur le DSP96002. Cette variation dépend essentiellement du type d'arrondi utilisé par le processeur. Le résultat le plus acceptable est obtenu avec l'arrondi 'RP' (Round Toward Plus Infinity) pour lequel le module est généralement inférieur à 1.

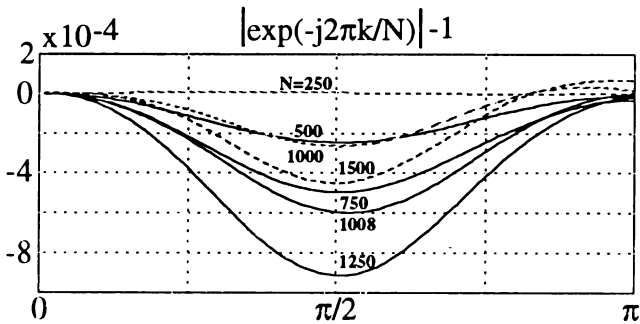


Figure 1

Pour quelques valeurs de N dont les courbes sont en pointillés, le risque de divergence est important puisque le module est supérieur à 1. Dans les autres cas, le module reste inférieur à l'unité ce qui garanti la stabilité de l'algorithme. Néanmoins, pour prévenir tous risques de divergence, on effectue dans

l'implantation, une initialisation des oscillateurs numériques (équation (4.3) avec C.I. (4.4)) à chaque itération de l'algorithme et une mise à zéro des zones mémoires de sauvegarde $x(p)/N$, $H_p(k)$ et $H_{p-1}(k)$ toutes les 300000 estimations spectrales.

4.3 Implantation sur le DSP96002

La rapidité d'exécution est obtenue en exploitant l'adressage modulo qui permet d'accéder facilement aux deux échantillons extrêmes $x(p)$ et $x(p-N)$ ainsi qu'aux coefficients des TFD ou THD glissantes. La phase d'initialisation de l'algorithme est réalisée simplement par une mise à zéro des zones mémoire de sauvegarde. La figure 2, présente l'organigramme du programme développé en assembleur DSP96002 pour le calcul de la transformée de Hartley glissante.

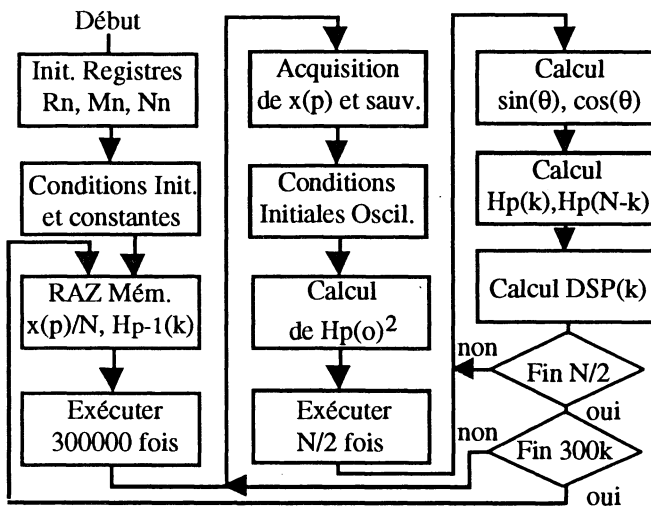


Figure 2

Le programme réalisé selon cet organigramme simplifié conduit à une complexité numérique de $6N+36$ cycles d'instruction du DSP96002 à 33 MHz, elle permet d'évaluer la fréquence d'échantillonnage maximale du signal d'entrée. Par exemple, $F_{\text{max}} = 2739$ Hz pour $N = 1008$.

5. ANALYSE VIBRATOIRE D'UN MOTEUR ÉLECTRIQUE

Un moteur électrique triphasé d'une puissance de 460 KW alimenté sous 5500 V-50 Hz est immobilisé sur une plate forme d'essai. Lors du fonctionnement à vide du moteur, on effectue la mesure de l'intensité vibratoire, définie comme étant la valeur efficace de la vitesse de la vibration (unité en mm/s rms), des composantes à 50 et 100 Hz engendrées respectivement par sa rotation à 3000 tr/mn et par son champ magnétique tournant. Ces intensités vibratoires, dont les limites sont fixées par des normes, déterminent l'acceptation fonctionnelle du moteur par le constructeur. Ces mesures sont effectuées à l'aide d'un appareil spécialisé dont le principe d'analyse repose sur la détection synchrone. Les intensités vibratoires mesurées par cet appareil sont de 3.6 mm/s et 0.4 mm/s rms à des fréquences respectives de 51.4 Hz et 102 Hz. Après une analyse spectrale par THD glissante sur 1024 puis 1008 points échantillonnés à 1200 Hz suivi d'un traitement numérique afin d'obtenir la vitesse efficace de la vibration [4], les spectres obtenus sont les suivants :

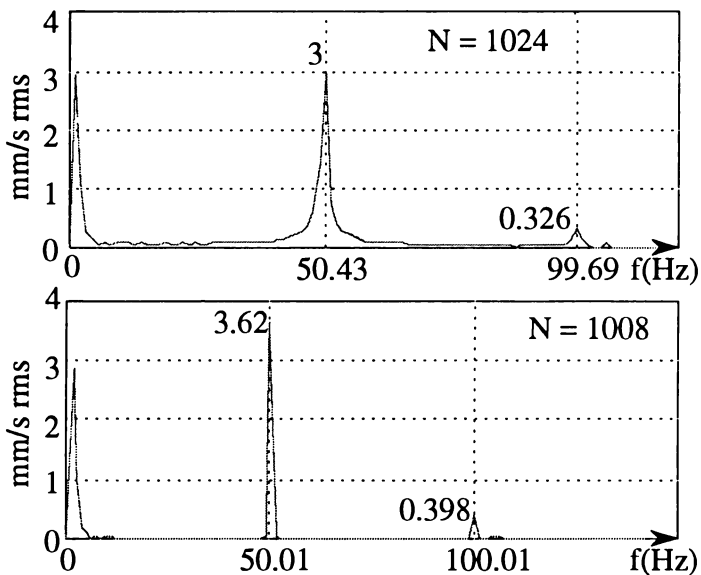


Figure 3

L'analyse spectrale avec $N = 1024$ montre les deux composantes fréquentielles recherchées avec cependant des amplitudes très éloignées (de l'ordre de 20 %) de celles obtenues par l'appareil spécialisé. L'erreur provient essentiellement du phénomène d'étalement de fréquences que l'on peut atténuer en utilisant une fenêtre de troncature autre que celle rectangulaire. Dans le cas de l'utilisation des algorithmes glissants, la résolution Δf peut être ajustée et pour $N = 1008$, on obtient des raies très fines dont les amplitudes sont très proches de celles mesurées.

6. CONCLUSION

A fréquence d'échantillonnage constante, les méthodes d'analyse spectrale par TFD ou THD glissantes autorisent le réglage de la résolution Δf en ajustant N . Cette propriété nous a permis d'améliorer l'estimation du spectre du signal de vibration mécanique. Quant à l'implantation de ces méthodes sur le DSP96002, la technique de programmation proposée permet d'une part, d'assurer la stabilité à long terme des algorithmes TFD et THD et d'autre part l'utilisation d'un système de calcul de taille mémoire réduite. Le domaine d'application s'étend à tous types de machines tournantes où l'on cherche à déterminer avec précision les composantes fréquentielles caractéristiques.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BRACEWELL, "The Hartley Transform." New York, Oxford University press, 1986.
- [2] ELLIOT, RAO, "Fast Transforms, Algorithms, Analyses, Applications." Academic press, 1986.
- [3] NUS et Al, "Hartley transform revs DSP 96002." revue EDN, 27 mai 1993.
- [4] NUS, "Étude et implantation de méthodes d'estimation spectrale paramétriques et non-paramétriques. Application à l'analyse vibratoire de machines tournantes." Thèse de Doctorat de l'Université de Nancy I, 1993.
- [5] SHERLOCK et Al. "Moving discret Fourier Transform." IEE Proc., Vol. 139, pp.279-282, 1992.

- ABSTRACT: p. 142

ABSTRACT

In this paper, the implementation on the Motorola DSP96002 processor of a classical spectral analysis method based on the use of sliding Fourier and Hartley transforms is proposed. The set-up of the algorithm on the processor and the use of numerical oscillators for the synthesis of the trigonometric functions are described. The stability problem of the sliding algorithm which comes from the 32 bytes data format used by this calculator is also studied. After evaluating the numerical complexity of the algorithm, an application of this analysis technique for the vibratory intensity measure of an high power electrical engine is finally presented.

Evaluation du flou optique pour la mesure de profondeur en vision monoculaire

par

B. HEIT * - G. SCHNEIDER* - T. SIMON - G. MARTIN* -
J. BREMONT***

*** Université de Nancy I
Centre de Recherche en
Automatique de Nancy**

**** Université de Poitiers
Ecole Supérieure des
Ingénieurs de Poitiers**

RESUME : La méthode présentée dans cet article constitue un outil original de reconstruction de la profondeur des objets dans une scène, par mesure du flou optique en vision monoculaire. La première partie rappelle les principes physiques employés en formation des images et les différentes études effectuées dans ce domaine. La phase délicate de notre approche est la détermination des fonctions de transfert du système optique, dont on cherche à extraire un paramètre assimilé à une mesure de flou. Les relations de l'optique géométrique, complétées par un étalonnage reliant le paramètre extrait à la profondeur du point dans la scène, font l'objet de la deuxième partie. L'attrait de cette technique est sa capacité à apporter une information 3D en s'affranchissant du problème d'appariement nécessaire en stéréovision. Ces travaux intéressent la robotique mobile pour la navigation de véhicules autonomes, et également les systèmes de contrôle ou d'assemblage de pièces.
MOTS-CLES : Vision 3D monoculaire, analyse de scènes pour la robotique, carte des profondeurs, flou optique.

ABSTRACT : We present a new monocular computer vision method for depth reconstruction of the objects in a scene by measuring the optical blur. The first part is dedicated to the repetition of the applied optical principles of the imaging process. Then, we summarise the preceding works on the field. The delicate step of our technique is the identification of the optical transfer function, wherefore we extract a parameter assimilated with the amount of blur. In the second part, we give the geometrical optical relations completed by the calibration of the system linking the extracted parameter with the depth of the object points. The convenience of our technique is its ability to perform the depth information avoiding the matching problem as it appears in stereo vision. Our works find an interest in robotics, autonomous vehicle navigation, and also in control or assembly tasks.

KEYWORDS : Monocular 3D vision, image analysis for robotics, depth map, optical blur.

Table des matières

1. Introduction

2. Le flou optique porteur de l'information de profondeur

2.1. Image focalisée - image défocalisée

2.2. Formation des images

2.3. Modèles de la fonction de transfert optique

3. Extraction de l'information de profondeur

3.1. Introduction

3.2. Les approches "Depth From Defocus" existantes

4. Approche par identification des contours

4.1. Introduction

4.2. Identification du paramètre de la réponse impulsionnelle

4.3. Etablissement de la correspondance flou-éloignement

4.4. Etalonnage

4.5. Schématisation du traitement

4.6. Résultats obtenus

5. Conclusion et perspectives

Références bibliographiques

1. Introduction

L'utilisation de la vision, en tant que capteur extéroceptif, paraît naturelle et l'évolution des capteurs de vision dans leur ensemble, a donné naissance à tout un ensemble de techniques de traitement d'images pour extraire les éléments pertinents. Cependant, pour beaucoup d'applications, une vue bidimensionnelle est insuffisante et l'information tridimensionnelle doit être extraite depuis l'analyse d'images de luminance.

En vision 3D, l'apport d'informations supplémentaires pour déterminer la troisième dimension procède selon diverses démarches aboutissant à des solutions variées spécifiques du domaine d'application. Nous nous intéressons à la vision 3D passive, où l'information acquise provient de plusieurs images de la même scène pour des vues différentes par la position, l'angle, l'ouverture ou la focale. Dans ce contexte, les visions binoculaire et trinoculaire connaissent un fort développement. Les opérations liées à ces techniques demandent des moyens élaborés de représentation symbolique de l'image initiale, puis de mise en correspondance de chaque élément caractéristique par des techniques dites d'appariement.

L'utilisation d'un capteur monoculaire fixe offre une alternative à ces dispositifs complexes. Nous trouvons principalement deux approches : l'une utilise un objectif à focale variable permettant par triangulation d'obtenir des données tridimensionnelles [Lavest-91] et l'autre, décrite dans ce document, pratique le flou optique.

L'évaluation de la profondeur d'objets dans une scène par l'utilisation du flou optique demande une bonne connaissance du processus de formation des images et, plus particulièrement, de la fonction de transfert optique de l'objectif utilisé. Ainsi, pour déterminer avec exactitude la relation entre le flou et l'éloignement, une modélisation de la réponse impulsionnelle optique est nécessaire.

2. Le flou optique porteur de l'information de profondeur

Le comportement physique d'un système optique dans la formation des images peut être modélisé par la fonction de transfert entre la scène observée et sa représentation sur le plan image.

En analyse d'image, le système optique fournit deux modèles principaux. Le premier se base sur l'optique géométrique. Le deuxième modèle tient compte du phénomène de diffraction mais, bien que plus complet, reste complexe.

2.1. Image focalisée - image défocalisée

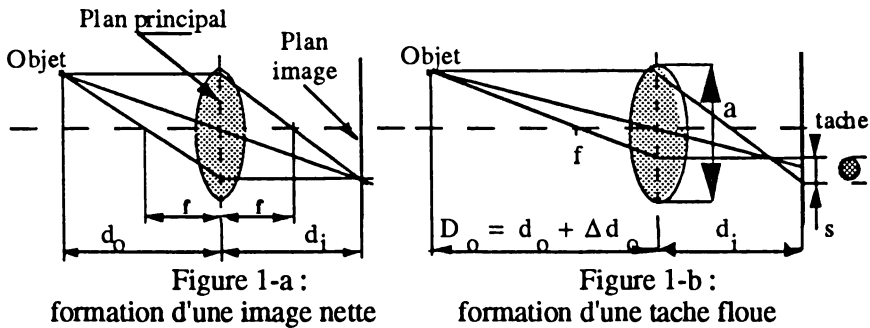
Pour assurer correctement la formation d'une image sur un plan, plusieurs lentilles forment généralement les objectifs photographiques. En ce qui nous concerne, nous assimilerons un objectif (quel que soit le nombre de lentilles le composant) à une lentille convergente, mince et de longueur focale

équivalente. Si l'on étudie le comportement d'une lentille en approximation paraxiale, la loi de conjugaison prend la forme simple donnée par la formule de Gauss :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i}, \quad (1)$$

où f , d_o , d_i sont respectivement la distance focale, la distance plan principal - objet, la distance plan principal - plan image.

La figure 1-a donne un exemple de formation de l'image nette d'un point objet.



A un plan image à distance d_i fixée et pour une scène contenant plusieurs plans en profondeur, un seul plan donne une image nette, dite focalisée. Les points objets appartenant aux autres plans formeront des taches sur le plan image (figure 1-b). L'équation 2, dans laquelle "a" représente l'ouverture de l'objectif utilisé, donne le diamètre s de la tache, appelé cercle de confusion, en fonction de la distance D_o et du plan focalisé d_o [Bove-89],

$$s(d_o, D_o, f, a) = a \left| \frac{D_o - f}{D_o} \right| \left| \frac{D_o}{D_o - f} - \frac{d_o}{d_o - f} \right|. \quad (2)$$

Cette expression est à la base de toutes les méthodes qui utilisent le flou optique comme information de profondeur. Cependant, comme le montre la figure 2, des limitations en précision sont dues à des considérations purement physiques, concernant la profondeur de champ et le tassement du flou. Il faudra donc choisir judicieusement l'objectif, en fonction de la scène à analyser.

De plus, les aberrations géométriques et les effets de diffraction limitent la résolution dans le plan image.

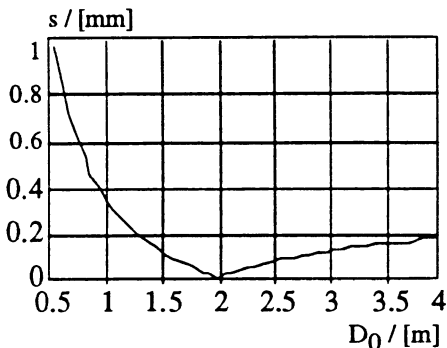


Figure 2 :
évolution du diamètre de la tache

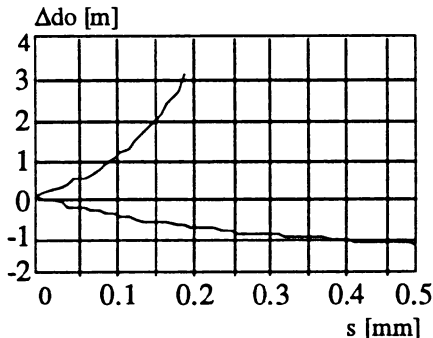


Figure 3 :
variation de Δd_0 fonction de s

Pour calculer la profondeur d'un point objet dans la scène pour un diamètre de tache donné, on inverse l'équation 2 et on obtient pour $\Delta d_0 = D_0 - d_0$:

$$\Delta d_0 = \begin{cases} \frac{(f - d_0) d_0 s}{d_0 s - s f + a f}, & 0 \leq s \\ \frac{(d_0 - f) d_0 s}{-d_0 s + s f + a f}, & 0 \leq s < \frac{a f}{d_0 - f} \end{cases} \quad (3)$$

Cette relation, représentée figure 3, montre que pour "s" petit, il y a deux solutions de Δd_0 représentant un plan objet en avant ou en arrière du plan net. Afin d'éviter cette ambiguïté, il est nécessaire de choisir d_0 minimal ou maximal pour la scène à observer, c'est-à-dire de focaliser respectivement en avant ou en arrière de la scène observée [Schneider-93].

A partir de ces considérations uniquement valables pour des points objets isolés, nous étendons le principe aux images plus complexes, en modélisant leur formation en une décomposition de points lumineux.

2.2. Formation des images

Les relations entre l'objet et l'image deviennent plus facilement exploitables, si l'instrument optique peut être modélisé par un système linéaire. Ainsi, on décompose la fonction d'entrée $g(x, y)$ représentant les points de l'objet en une infinité de fonctions de Dirac, pondérées par la luminosité :

$$g(x, y) = \iint_E g(x_0, y_0) \delta(x - x_0, y - y_0) dx_0 dy_0, \quad (4)$$

où (x_0, y_0) sont les coordonnées objets.

Le système optique transforme du signal d'entrée $g(x, y)$ en un signal $g'(x, y)$ sur le plan image, ce que décrit par l'opérateur T :

$$g'(x, y) = T \left\{ \iint_E g(x, y) \delta(x - x_0, y - y_0) dx_0 dy_0 \right\}. \quad (5)$$

Sous l'hypothèse d'illumination incohérente, le système optique se comporte linéairement vis-à-vis des intensités lumineuses $g(x, y)$. Nous obtenons donc :

$$\begin{aligned} g'(x, y) &= \iint_E g(x, y) T \left\{ \delta(x - x_0, y - y_0) \right\} dx_0 dy_0 \\ &= g(x, y) \otimes \text{PSF}(x, y), \end{aligned} \quad (6)$$

avec $\text{PSF}(x, y, x_0, y_0) \equiv T \left\{ \delta(x - x_0, y - y_0) \right\}$, où $\text{PSF}(x, y, x_0, y_0)$ est la transformation d'une impulsion en (x_0, y_0) , traversant l'optique d'un système spatialement invariant, appelée Fonction d'étalement ou Point Spread Function (PSF).

Le modèle se complète sur les scènes tridimensionnelles pour des points objets appartenant à "n" plans différents et caractérisés par leur réponse impulsionnelle PSF_i . En ne superposant que les contributions qui sont visibles par l'objectif, il en résulte :

$$\begin{aligned} g'(x, y) &= \sum_{i=1}^n \iint_{E_i} g_i(x, y) \text{PSF}_i(x - x_0, y - y_0) dx_0 dy_0 \\ &= \sum_{i=1}^n g_i(x, y) \otimes \text{PSF}_i(x, y). \end{aligned} \quad (7)$$

Dans le domaine fréquentiel, le comportement d'un système linéaire et spatialement invariant est décrit de façon équivalente par :

$$G'(u, v) = \text{OTF}(u, v) \cdot G(u, v), \quad (8)$$

où OTF (Optical Transfer Function) représente la transformation Fourier 2D (F) de la réponse impulsionnelle.

$$\begin{aligned} \text{OTF}(u, v) &= F \{ \text{PSF}(x, y) \} \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{PSF}(x, y) \exp[-j(ux + vy)] dx dy. \end{aligned} \quad (9)$$

2.3. Modèles de la fonction de transfert optique

Un point lumineux de la scène est interprété en tant qu'impulsion de Dirac. On modélise la formation du flou dans le domaine spatial, par la fonction d'étalement (PSF). Cependant, la PSF dépend autant des propriétés des matériaux de l'optique (indice de réfraction), que de la forme géométrique de la lentille (longueur focale) et des paramètres de prise de vue (distance de l'objet, diaphragme, éclairage) [Born-90].

Une modélisation réelle, tenant compte aussi bien des aberrations géométriques que des effets de diffraction, ne s'effectue que difficilement. Une forme connue pour la PSF est la forme gaussienne 2D, utilisée dans notre démonstration, et décrite par :

$$\text{PSF}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right). \quad (10)$$

Son écart type σ représente le diamètre de la tache floue sur le plan image. La relation de proportionnalité entre σ et le diamètre s de la tache, formée par un point lumineux, peut être modélisée par :

$$s = k \sigma. \quad (11)$$

Pour caractériser un système, on utilise également les réponses du système optique à une impulsion de Dirac translatée suivant une direction appelée Line Spread Function (LSF). La réponse à un front lumineux (fonction échelon ou fonction d'Heavyside) est appelée Edge Spread Function (ESF). De plus,

$$\begin{aligned} \text{LSF}(x) &= \int_{y=-\infty}^{+\infty} \text{PSF}(x, y) dy, \\ \text{ESF}(x) &= \int_{-\infty}^x \text{LSF}(x_0) dx_0. \end{aligned} \quad (12)$$

3. Extraction de l'information de profondeur

3.1. Introduction

Dans le domaine spatial, les méthodes optiques de vision 3D monoculaire passive, exploitant ce flou optique, se regroupent en deux types. Le premier, que l'on qualifie de "Depth From Focus" (D.F.F.), mesure la profondeur à partir de la focalisation optimale pour chaque point ou région d'intérêt [Krotkov-89]. Coûteux en temps de calcul, il s'applique surtout à l'évaluation

de scènes provenant de la microscopie et ne sera pas développé. Le deuxième type, qualifié "Depth From Defocus" (D.F.D.), mesure la profondeur des objets à partir de deux ou plusieurs images de la même scène. On identifie alors les PSF, pour chaque point d'intérêt dans une image défocalisée, par comparaison avec les autres images.

3.2. Les approches "Depth From Defocus" existantes

Les deux approches principales sont les techniques exploitant le contenu spatial de l'image par les caractéristiques géométriques ou la forme des objets dans la scène, et les techniques exploitant le contenu fréquentiel par une analyse de Fourier. Les méthodes présentées utilisent principalement, dans le domaine spatial, les caractéristiques géométriques de l'image. Cependant, dans la plupart des méthodes, on ne mesure pas directement la taille de la tache, mais la valeur du paramètre d'étalement de la fonction PSF ou LSF, qui modélise le processus de formation de la tache.

Les solutions actuelles sont proposées par A.P. Pentland, P. Grossmann, M. Subbarao et R.A. Jarvis.

3.2.1. Approche de PENTLAND

Les images sont des scènes contenant des objets réels et l'auteur propose deux approches, pour évaluer le paramètre d'étalement σ , que sont l'utilisation de fronts nets et la comparaison d'images à des ouvertures différentes [Pentland-82-87-89].

Dans la première approche à partir de fronts nets, on utilise la mesure du passage par zéro du laplacien pour déterminer les contours. Pour un point $f(x, y)$ du plan image placé sur un front de discontinuité en x_0 , nous avons :

$$f(x, y) = \begin{cases} a & \text{si } x < x_0, \\ a + b & \text{si } x \geq x_0. \end{cases} \quad (13)$$

Nous définissons le contour par :

$$C(x, y) = \nabla^2 (G(r, \theta) \otimes f(x, y)) \quad (14)$$

où \otimes désigne l'opérateur de convolution, et $G(r, \sigma)$, la PSF 2D non normalisée de forme gaussienne en coordonnées polaires.

Pour $x_0 = 0$ il vient alors :

$$C(x, y) = b \frac{dG(r, \theta)}{dx} = -\frac{b x}{\sqrt{2\pi} \sigma^3} \exp\left(\frac{-x^2}{2\pi\sigma^2}\right). \quad (15)$$

Sous forme logarithmique, cette équation s'écrit : $A x_i + B = C_i$.
Tous les points situés sur une frontière b suivent cette équation, qui peut être interprétée comme celle d'une droite de régression, et nous obtenons :

$$A = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i^2 - x^2) C_i}{\sum_{i=1}^N (x_i^2 - x^2)} . \quad (16)$$

Pour un b donné nous avons : $\sigma = (2 A)^{-\frac{1}{2}}$ (17)

Pour la deuxième approche, dont la figure 4 nous donne le schéma, la profondeur de champ est modifiée par une ouverture différente. L'amplitude de cette différence est une fonction simple de la distance entre le capteur et le point image. Pour obtenir une estimation de la profondeur, il suffit de comparer localement deux images suivant les contours.

Si $f_k(r, \theta)$ exprime, en coordonnées polaires, une partie de l'image $I_k(x, y)$ centrée en (x_0, y_0) , avec une ouverture a_k , son expression prend alors les formes suivantes :

pour l'ouverture a_1 ,

$$f_1(r, \theta) = I_1(x_0 + r \cos \theta, y_0 + r \sin \theta), \quad (18)$$

pour l'ouverture a_2 ,

$$f_2(r, \theta) = I_2(x_0 + r \cos \theta, y_0 + r \sin \theta). \quad (19)$$

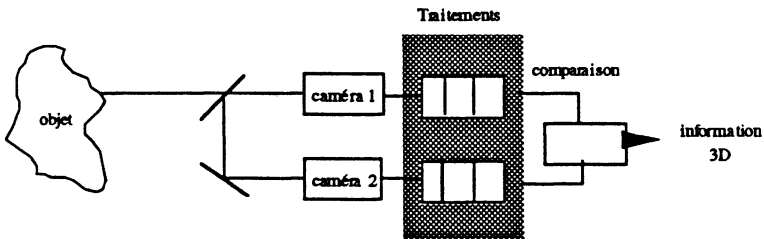


Figure 4 : schéma de principe [Pentland-89]

Après avoir traversé le système optique, l'expression des images prend la forme:

$$f_k(r, \theta) = f_0(r, \theta) \otimes G_k(r, \theta), \quad (20)$$

avec

$$G_k(r, \theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_k} \exp\left(\frac{-r^2}{2\pi\sigma_k^2}\right), \quad (21)$$

où $G(r, \theta)$ représente la réponse impulsionnelle du système optique et f_0 l'expression de l'image nette.

Puis, nous calculons localement la transformée de Fourier des deux images :

$$F_k(\lambda, \theta) = F_0(\lambda, \theta) \cdot G_k\left(\lambda, \frac{1}{\sigma_k\sqrt{2\pi}}\right) \quad (22)$$

et élaborons le rapport :

$$\frac{F_1(\lambda, \theta)}{F_2(\lambda, \theta)} = \frac{G_1\left(\lambda, \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\right)}{G_2\left(\lambda, \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\right)} = \exp\left(\lambda^2 2\pi(\sigma_2^2 - \sigma_1^2)\right). \quad (23)$$

En passant au logarithme, nous pouvons, pour les mêmes raisons que dans l'approche à partir des fronts nets, considérer l'équation comme celle d'une droite de régression. De plus, si la caméra 1 a une petite ouverture, nous savons que $\sigma_1 = 0$. Nous déterminons σ_2 qui est identique (équation 17) à celui trouvé dans la méthode utilisant les fronts de discontinuité.

3.2.2. Approche de GROSSMANN

Pour l'image utilisée, constituée de lignes horizontales et verticales noires sur un fond blanc, et ne possédant qu'un seul plan net, l'acquisition se fait à grande ouverture. La méthode proposée s'articule en trois étapes [Grossmann-87].

En premier lieu, on extrait la primitive contour par un opérateur de type gradient. On évalue alors la largeur de la distribution "W" sur les contours et on compte le nombre de pixels contenus dans le pic de la distribution, ayant des valeurs de gris supérieures à la valeur à mi-hauteur. Une correction est faite pour les directions autres qu'horizontales et verticales. Dans le cas où la largeur de W obtenue est créée par deux contours proches, on modifie alors l'échelle, pour permettre la dissociation.

La distribution observée est vue comme le résultat de la convolution entre la ligne nette (paramètre d'étalement W_i) et une fonction de paramètre d'étalement "B" de type gaussien; il vient alors :

$$W^2 = W_i^2 + B^2. \quad (24)$$

W_i étant en général inconnu, l'auteur propose que W_i soit le même pour toute l'image. Enfin, La conversion de "B" en mesure de distance objet-captteur s'obtient par l'équation $D_o = k B$, où k est fonction des paramètres de la caméra (distance focale,...).

3.2.3. Approche de SUBBARAO

La méthode proposée par M. SUBBARAO [Subbarao-88] procède par l'acquisition d'une image nette et consécutivement de plusieurs images floues pour des distances positionnées de part et d'autre du plan net, prises dans les mêmes conditions d'éclairément. Les images ayant servi de références sont de taille 64x64 pixels et ne présentent qu'un front lumineux. Le calcul de la profondeur se fait à l'aide de la LSF calculée d'après une discontinuité floue d'ordre zéro.

Ainsi, pour un échelon lumineux équation (13), l'image observée est définie par : $g(x, y) = \text{PSF}(x, y) \otimes f(x, y)$. Pour caractériser la PSF, on utilise le modèle gaussien, pour lequel $\sigma = k.s$ avec $k > 0$; la valeur de k s'obtient par une phase de calibration.

Si l'on dérive la fonction $g(x, y)$ suivant l'axe du gradient, il vient l'équation 25 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial g(x, y)}{\partial x} &= \text{PSF}(x, y) \otimes \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \\ &= \text{PSF}(x, y) \otimes b \delta(x) \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \text{PSF}(\xi, \eta) b \delta(x - \xi) d\xi \right) d\eta \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \text{PSF}(x, \eta) d\eta. \end{aligned} \tag{25}$$

Soit $b \times \text{LSF}(x) = \frac{\partial g(x, y)}{\partial x}$, on peut alors déterminer la LSF par la relation :

$$\text{LSF}(x) = \frac{\frac{\partial g(x, y)}{\partial x}}{\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial g(x, y)}{\partial x} dx} \tag{26}$$

Pour simplifier les calculs, nous prenons le paramètre d'étalement de $\text{LSF}(x)$ comme la racine carrée du moment centré d'ordre deux de la distribution de $\text{LSF}(x)$, interprété comme la déviation standard et défini par l'équation 27 :

$$\sigma_1^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^2 \text{LSF}(x) dx, \quad (27)$$

où $\bar{x} = \int_{-\infty}^{+\infty} x \text{LSF}(x) dx$ avec $\int_{-\infty}^{+\infty} \text{LSF}(x) dx = 1$.

La relation entre la LSF(x) et la profondeur est alors donnée à partir d'une relation entre s et σ_1 , qui s'écrit : $\sigma_1 = k_1 s$ d'où :

$$\sigma_1 = -\frac{k_1 a d}{u} + \frac{k_1 a (d-f)}{f} = \frac{m}{u} + c. \quad (28)$$

Les constantes m et c peuvent être déterminées par des techniques de calibration.

La relation entre σ_1 de la LSF (x) et σ de la PSF est donnée par :

$$\sigma = \sqrt{2} \sigma_1. \quad (29)$$

On peut apporter une extension du calcul de la profondeur d'une scène contenant des objets simples, pour la phase de calibration, à partir d'images de format 512 * 512 pixels. Cependant, la taille du masque utilisé doit être adaptée à la défocalisation.

3.2.4. Approche de JARVIS

L'approche présentée exploite comme mesure de profondeur le rapport des modules du gradient du laplacien des images nette et floue. L'étude est assortie d'essais sur des images réelles [Jarvis-90].

Pour déterminer la forme du contour, l'auteur utilise l'amplitude du gradient au passage par zéro du laplacien. Ainsi, si I_n représente l'image nette et I_f l'image floue, l'indication de défocalisation, après avoir appliqué un masque de type Laplacien sur une image adoucie par un filtre gaussien (G), est définie par :

$$R = \frac{|\nabla(\nabla^2 G \otimes I_n)|}{|\nabla(\nabla^2 G \otimes I_f)|}. \quad (30)$$

4. Approche par identification des contours

4.1. Introduction

Puisque le flou est perceptible, principalement sur les contours d'objets, notre méthode ne s'applique qu'aux points de contour de position connue. Nous retenons, comme Pentland, l'acquisition d'une image supplémentaire, nette en tout point avec un iris fermé, qui fournit plus facilement la position des contours. En faisant l'acquisition simultanément d'une image nette et d'une image contenant des parties floues en fonction de la profondeur, nous séparons le contenu informationnel de la scène. Une estimation, communément admise du flou est obtenue à partir du module des gradients de luminance. Pour donner la même importance à chaque contour, nous avons choisi de construire le rapport des modules des images nette et floue, afin d'identifier le paramètre d'étalement σ [Simon-91].

La relation entre l'image nette $in(x, y)$ et l'image floue $if(x, y)$ est modélisée par :

$$if(x, y) = in(x, y) \otimes PSF(x, y). \quad (31)$$

En nous plaçant localement sur l'axe du gradient (\bar{x}), nous obtenons une expression monodimensionnelle de son module :

$$|\bar{\nabla} in(x, y)| = |\bar{\nabla} in(\bar{x})|. \quad (32)$$

Le calcul du gradient net et flou est alors approximé aux différences finies :

$$G_{net}(\bar{x}) = \frac{|in(\bar{x} + 1) - in(\bar{x} - 1)|}{2} \quad (33)$$

$$G_{flou}(\bar{x}) = \frac{|if(\bar{x} + 1) - if(\bar{x} - 1)|}{2} \quad (34)$$
$$= \frac{\left| \sum_{u=-P}^P in(\bar{x} + 1 - u) LSF(u) - \sum_{u=-P}^P in(\bar{x} - 1 - u) LSF(u) \right|}{2}$$

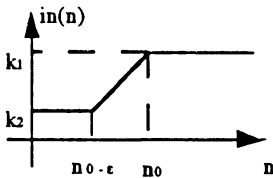
où nous considérons que le support de la réponse impulsionnelle est borné à $[-P, +P]$.

4.2. Identification du paramètre de la réponse impulsionnelle

Dans le but d'extraire localement le paramètre d'étalement de la LSF à partir de lignes de contours, nous établissons le rapport net sur flou des modules des gradients de deux images de la même scène, différentes dans leur netteté. Nous tenons compte, dans cette construction, des différences de quantité de lumière reçue sur le capteur, pour une zone d'analyse.

$$R(\bar{x}) = \frac{|\bar{\nabla} \text{in}(\bar{x})|}{|\bar{\nabla} (\text{in}(\bar{x}) \otimes \text{LSF}(\bar{x}))|}. \quad (35)$$

Dans la direction du gradient, nous trouvons une définition monodimensionnelle. Monga [Monga-90] a classifié ces contours en 5 groupes et pour la forme de contour la plus rencontrée (C4) dans une image, nous avons :



$$C(4) = \begin{cases} k_2 & -\infty < n \leq n_0 - \varepsilon \\ k_1 + \frac{k_1 - k_2}{\varepsilon} (n - n_0) & n_0 - \varepsilon < n < n_0 \\ k_1 & n_0 \leq n < +\infty \end{cases}$$

Figure 4 : contour en rampe

Equation (36).

Sur ces discontinuités et pour le modèle gaussien, le rapport prend des valeurs exploitables dépendant de leur écart ε . Ainsi, aux point n_0 et $n_0 - \varepsilon$, nous obtenons :

$$R(n_0) = \frac{\sqrt{2\pi} \sigma}{\sum_{u=-\varepsilon+1}^{-1} u(A) + \varepsilon(B)}, \quad (37)$$

où

$$A = \exp\left(-\frac{(1-u)^2}{2\sigma^2}\right) - \exp\left(-\frac{(1+u)^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$B = \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}\right) + \exp\left(-\frac{(1+\varepsilon)^2}{2\sigma^2}\right),$$

et :

$$R(n_0 - \varepsilon) = \frac{\sqrt{2\pi} \sigma}{\sum_{u=-\varepsilon+1}^{-1} u(C) + \varepsilon(D)}, \quad (38)$$

où

$$C = \exp\left(-\frac{(1-\varepsilon-u)^2}{2\sigma^2}\right) - \exp\left(-\frac{(1+\varepsilon+u)^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$D = 1 + \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}\right).$$

Dans la majorité des cas rencontrés, ε appartient à l'intervalle [1,3]. Ces valeurs entières conduisent à une forme analytique simple du rapport contenant le paramètre de la LSF, ce qui nous donne :

$$R(n_0 - 1) = R(n_0) = \frac{\sqrt{2\pi} \sigma}{1 + \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}\right)} \quad (39)$$

$$R(n_0 - 2) = R(n_0) = \frac{\sqrt{2\pi} \sigma}{1 + \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}\right) + \exp\left(-\frac{4}{2\sigma^2}\right)} \quad (40)$$

$$R(n_0 - 3) = R(n_0) = \frac{\sqrt{2\pi} \sigma}{1 + 2 \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}\right) + 2 \exp\left(-\frac{4}{2\sigma^2}\right) + \exp\left(-\frac{9}{2\sigma^2}\right)} \quad (41)$$

En pratique, nous explorons, dans un voisinage de 4 points autour du contour, la valeur des gradients dans la direction de la discontinuité pour déterminer les valeurs de ε . Une fois ε connu, nous choisissons l'équation correspondante, pour trouver σ , qui donne la profondeur par la loi de conjugaison des lentilles minces (équation 3).

4.3. Etablissement de la correspondance flou-éloignement

Pour établir la relation flou-éloignement, il est important de maîtriser parfaitement le calcul du paramètre d'étalement. Pour cette raison, nous avons élaboré des images réelles et de synthèse, au format 512*512 pixels avec 256 niveaux de gris, dans lesquelles le paramètre σ de la réponse

impulsionnelle varie simplement. Les images floues sont fabriquées à partir d'images nettes par convolution avec la PSF de forme gaussienne. On produit une variation linéaire de la profondeur, dans la direction verticale, ce qui entraîne une variation linéaire du paramètre d'étalement suivant la figure 5. Les résultats obtenus par notre algorithme montrent, sur la figure 6, que la mesure suit bien l'hyperbole donnée.

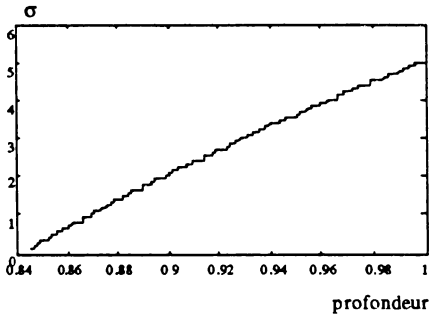


Figure 5 :
variation linéaire de la profondeur

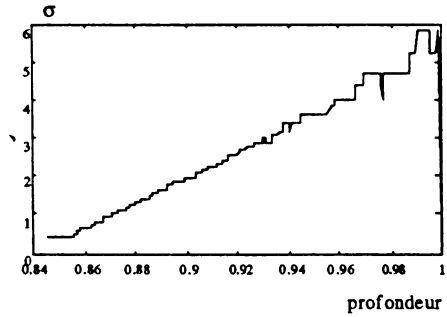


Figure 6 :
correspondance flou-éloignement

Pour les images réelles nette et floue (figure 7a et 7b), la correspondance flou-éloignement est donnée par la figure 8 :

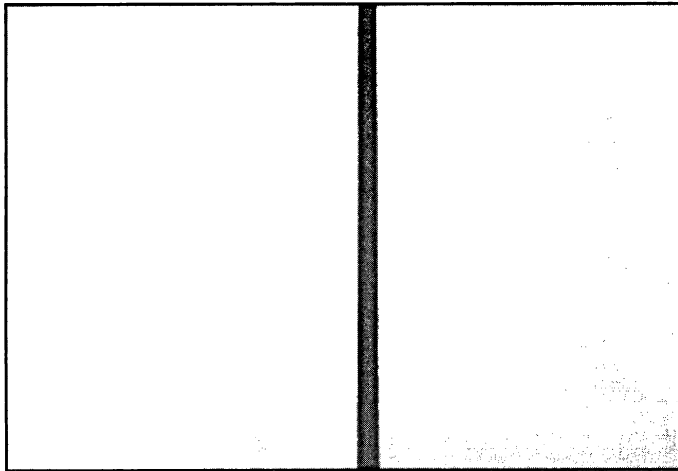


Figure 7-a : image réelle nette

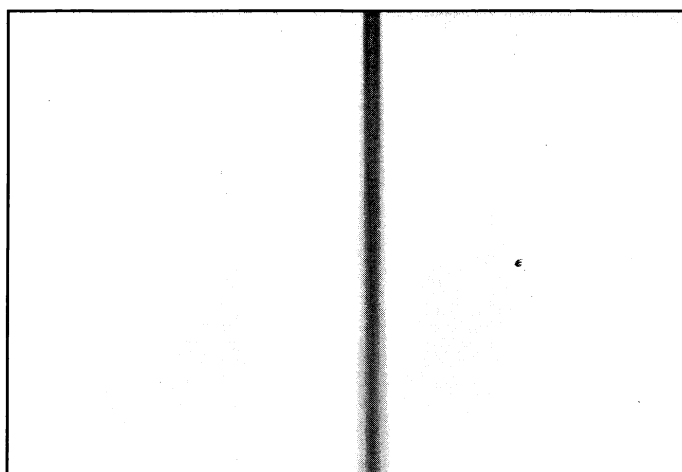


Figure 7-b : image réelle floue

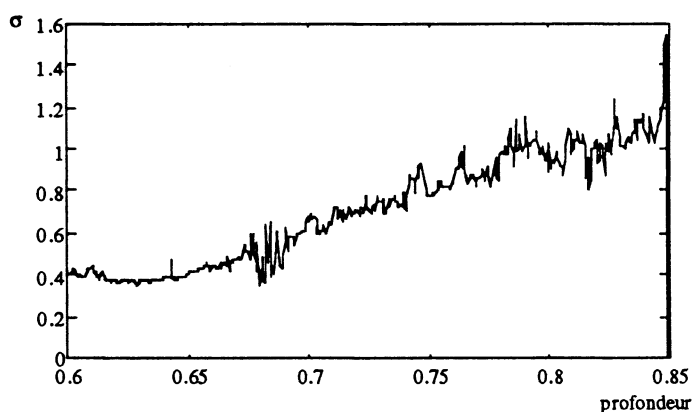


Figure 8 : image réelle, relation flou-éloignement

4.4. Etalonnage

Le calcul de la correspondance flou-éloignement donne une courbe bruitée dans le cas d'images réelles (figure 8). Pour son utilisation, il est nécessaire de filtrer avant de rechercher la partie constante représentant la profondeur de champ et la partie hyperbolique modélisant le reste de la courbe.

Le bruit est provoqué par les conditions de prises de vues (non-uniformité de l'éclairage dans l'espace et le temps, imperfection optique, bruit électronique, etc ...) et par la numérisation (quantification, approximation des opérateurs, position des contours). Le bruit, extrait du signal de la vue réelle

(figure 8) peut être pris comme "gaussien" (figure 9). Son spectre est reproduit sur la figure 10.

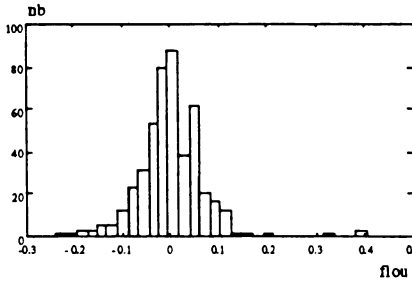


Figure 9 : histogramme du bruit

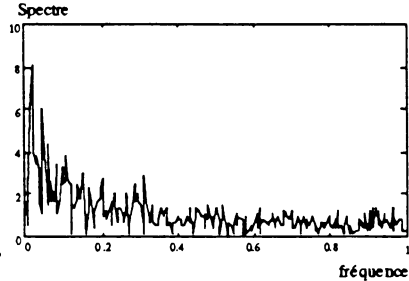


Figure 10 : spectre du bruit

Nous avons retenu le filtre médian lisseur, du fait qu'il élimine bien le bruit de type "gaussien", et respecte l'allure générale du signal, notamment les sauts de moyenne.

L'étalonnage est réalisé sur la scène décrite, qui varie continûment en profondeur, entre deux bornes inférieure et supérieure qui ne doivent pas constituer une limite de détection. Nous étendons la relation flou-éloignement au-delà de la borne supérieure, en modélisant cette relation par une fonction, dont l'expression est de type hyperbolique :

$$s = \frac{x}{D_0} + b \quad (37)$$

$$\sigma = k \cdot s \quad (38)$$

où s est la mesure de flou et D_0 la profondeur.

La phase d'étalonnage se termine par des essais sur des scènes diverses contenant des profondeurs connues. La relation hyperbolique est modifiée en conséquence par le paramètre k .

4.5. Schématisation du traitement

L'ensemble des opérations utilisées dans notre méthode de calcul de la profondeur peut être réalisé sur des calculateurs spécialisés en traitements d'images, pour une exécution rapide. Ces calculateurs spécifiques sont aujourd'hui très courants.

Nous calculons le gradient de façon identique sur les deux images. La procédure passe par deux phases, dont la première constitue l'apprentissage par initialisation de la table de transfert représentant la relation flou-éloignement, et la deuxième, l'estimation effective de la profondeur.

La figure 11 donne le synoptique du système de vision 3D où chaque bloc fonctionnel peut être réalisé par une carte électronique pour une conception modulaire de traitements d'images.

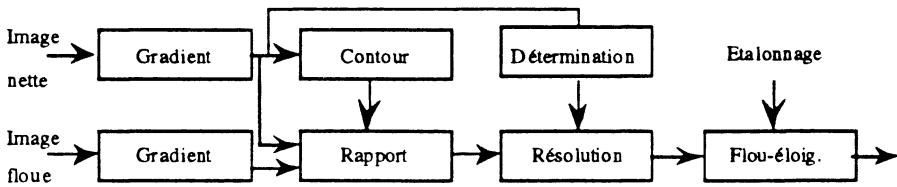


Figure 11 : synoptique de fonctionnement

4.6. Résultats obtenus

Pour utiliser la relation flou-éloignement, nous devons effectuer un étalonnage, mais au préalable, nous devons choisir l'objectif du système optique en fonction de la scène. Nous procédons en deux étapes:

- choix de la focale pour l'observation du champ, vérification de la présence d'un plan net, des plans flous sans saturation du capteur, et de la possibilité d'avoir une image nette en tout point,
- apprentissage sur une scène simple, une ligne, et détermination de l'ouverture maximale et minimale.

Enfin, nous faisons l'acquisition des images nette et floue pour l'évaluation de la profondeur. Le plan net est placé le plus proche de la caméra.

Nous donnons, figure 12-a, une scène d'intérieur, dont la profondeur ne dépasse pas 4m.



Figure 12-a : scène d'intérieur, image nette



Figure 12-b : scène d'intérieur, image floue

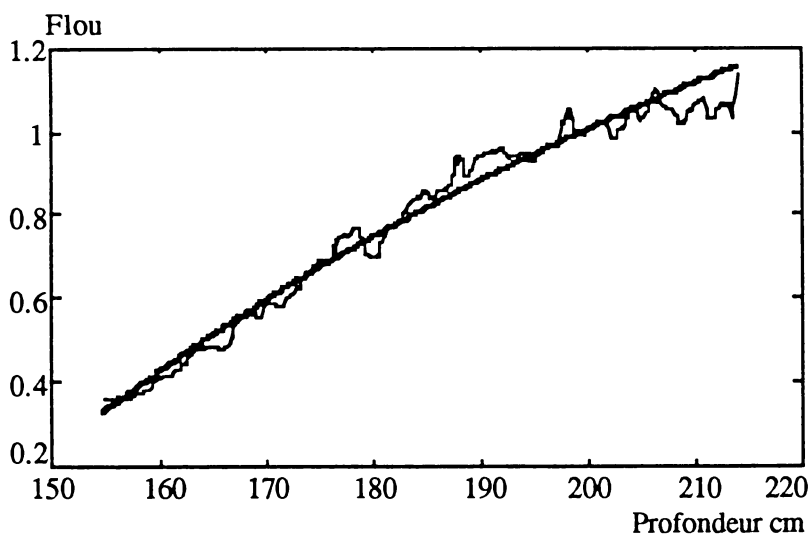


Figure 13 : relation flou-éloignement scène d'intérieur

Les paramètres de l'hyperbole obtenus sont: $x=-464$ et $b= 3.48$.

Les résultats obtenus sont traduits en niveaux de gris et présentés dans la figure 14, qui donne une image de la carte des profondeurs.

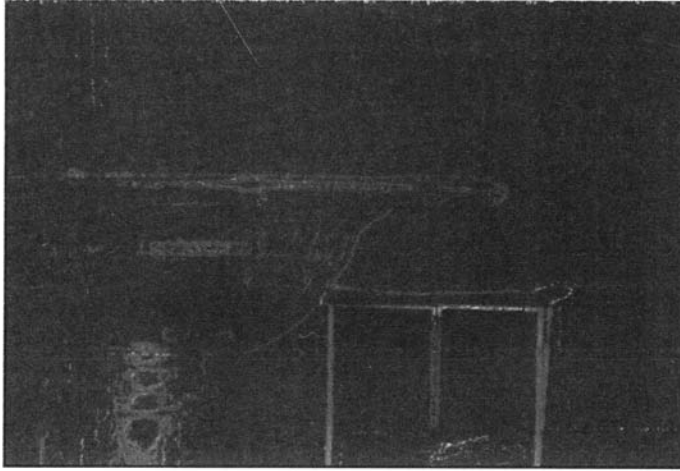


Figure 14 : carte des profondeurs

5. Conclusion et perspectives

Nous avons montré, dans cette étude l'intérêt et la réalité des techniques de vision 3D passive. La méthode développée et les résultats obtenus excluent, dans cette première approche, son application à la mesure précise d'objets. Les indications obtenues sont relatives et qualifient les positions des plans objets en fonction d'un nombre de zones de profondeur. Cependant, dans un contexte de vision embarquée ou de robotique mobile, elle trouve son efficacité dans la détection d'événements d'une scène. Ainsi, l'information de flou peut-être complémentaire pour un système classique de vision 3D à base de stéréo-vision en guidant le choix de l'appariement et contribuerait de façon directe au calcul de ressemblance des points potentiellement à appairer. Des conditions expérimentales plus précises, actuellement à l'étude, devraient nous conduire à une relation plus stricte.

Références bibliographiques

[Grossman-87] P. GROSSMAN, "Depth from focus", Pattern recognition letters, North Holland, 1987, pp 63-68.

[Monga-90] O. MONGA, "Segmentation d'images: où en sommes nous?", rapport de recherche INRIA-Rocquencourt, N°1216, support de cours pour le congrès PIXIM 89, 1990.

[Pentland-82] A. P. PENTLAND, "Depth of scene from depth of field.", Proceeding of DARPA image understanding workshop, Paló Alto, 1982, pp 253-259.

[Pentland-87] A. P. PENTLAND, "A new sense for depth of field.", IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 1987, pp 523-531.

[Pentland-89] A. P. PENTLAND, T. DARVELL, M. TURK, W. HUANG "A simple, real time range camera", IEEE computer Society, Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1989, pp 256-261.

[Simon-91] T. SIMON, "Appréciation de la profondeur depuis des images nette et floue en vision 3D passive", Thèse de l'Université de Nancy I, juillet 1991.

[Subbarao-88] M. SUBBARAO, N. GURUMOOTHY, "Depth recovery from blurred edges.", IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition, Washington, 1988, pp 498-503.

[Jarvis-88] R.A.JARVIS, "Range from out of focus blur", AI'88, 2nd Australian Joint Artificial Intelligence Conference Proceedings, Adelaide, AUSTRALIA, 15-18 Novembre 1988, pp 347-342.

[Bove-89] M. BOVE, "Discrete fourier transform based depth from focus understanding and machine vision", Technical Digest Series, 1989, V14, pp 118-121.

[Born-70] M.BORN, E.WOLF, Principle of optics, Pergamon Press, Oxford, 1970.

[Schneider-93] G. SCHNEIDER, B. HEIT, T. SIMON, J. BREMONT, "Depth sensing by comparison of sharp and blurred images", Opto 93, 1993, pp 186-188.

[Krotkov-89] E.P. KROTKOV, "Active computer vision by cooperative focus and stereo", Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, 1989.

[Lavest-91] J.M. LAVEST, G. RIVES, M. DHOME, "Utilisation d'un objectif à focale variable en vision monoculaire en vue de la reconstruction 3D", 8ème Congrès Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle, AFCET, 1991, pp 293-301.

Bulletin des Académie et Société Lorraines des Sciences: 1993, 32, n°4
-Communication présentée à la séance du 13 mai 1993

PROCES-VERBAL DE LA SEANCE DU 13 MAI 1993

--:--:--:--

La réunion est ouverte à 17 heures sous la présidence du Professeur J.FLECHON en présence de 36 personnes.

Le Président rappelle la sortie annuelle de Juin consacrée à une visite des installations industrielles sidérurgiques de la SOLLAC et du Musée des Mines de Fer, non loin de Sérémange.

Le Secrétaire Général, M. P.L. MAUBEUGE, transmet les excuses de MM. CORNEVAUX, N. DUPONT (Frère BASILE), GUERRIER DE DUSMAST, COMBREMONT, DOSSMANN et donne lecture du Procès-Verbal de la séance d'avril adopté sans remarques, annonce la présentation par M. KELLER et lui-même d'un nouveau membre de la Société : M. Pascal GODEFROIT, paléontologiste à Bruxelles. Il salue notre ancien Président E. LEGAIT, depuis fort longtemps absent de nos assemblées mais venu à cette réunion. Il signale enfin la disparition dans les jours précédents, à l'âge de 82 ans, de notre ancien Président, André VEILLET, Professeur de Biologie animale et fait observer une minute de silence. Il nous a représentés à la cérémonie du Temple Protestant.

Le Président annonce à l'ordre du jour une communication collective, présentée par M. HEIT : "Evaluation du flou optique pour la profondeur en vision monoculaire" par MM. B. HEIT, G. SCHNEIDER, T. SIMON, G. MARTIN, J. BREMONT, suite à des travaux du Centre de Recherche en Automatique de l'Université de Nancy I.

M. MAUBEUGE pose une question relative à la projection des deux figures du diagramme des barres, s'étonnant du peu de différence. M. HEIT se dit conscient de ce point, lequel relève en fait des transparents, lesquels atténuent une mise en évidence des différences.

M. FLECHON interroge sur l'influence des phénomènes de diffraction. M. HEIT donne de longues explications sur l'expérimentation pratiquée et la précision obtenue.

M. KELLER demande si ce système peut être appliqué au microscope classique ou à faible grossissement. M. HEIT précise que la méthode n'est pas très applicable mais il en existe d'autres : ainsi une méthode de déconvolution d'un laboratoire de Mulhouse conduit ces chercheurs à parfois plus de 50 % de rendement supplémentaire.

M. BAUDOT pose également une courte question.

Le Président donne la parole à M. le Professeur LEPOIRE, Professeur à la Faculté de Médecine, qui va traiter des Trépanations dans l'Antiquité. Mais auparavant il présente longuement la personnalité du conférencier et ses travaux. M. LEPOIRE est allé enseigner deux ans à Harvard aux USA.

L'exposé est très richement illustré de projections et revêt un grand intérêt. La chronologie préhistorique du Quaternaire est détaillée afin de démontrer à quel moment précis apparaissent les trépanations et les endroits observés. Une riche iconographie touchant l'Amérique du Sud est projetée concernant la fin des temps préhistoriques. L'orateur ne paraît pas retenir un rituel religieux ou magique tout se ramenant à des actes médicaux, non obligatoirement couronnés de succès, pratiqués d'ailleurs avec des silex au début. Il y avait connaissance anatomique base des opérations. La cicatrisation des parois trépanées montre qu'il y a eu survie et effet réel.

Des documents relatifs à la chirurgie crânienne de la Renaissance et d'Ambroise PARE, sont projetés et commentés à titre de comparaison ainsi que, très sommairement, le matériel et les salles d'opérations modernes de chirurgie crânienne.

Parmi les questions posées au conférencier, une personne interroge sur l'extraction de la fameuse "pierre de la folie". M. LEPOIRE considère qu'il s'agissait toujours de charlatanisme et de fausses opérations, avec tours de passe-passe exhibant une petite pierre sortie soit disant du crâne et aboutissant à la guérison.

Le Pr. E. LEGAIT souligne que maintenant on possède des anesthésiques. Mais peut-on penser qu'à l'aube des trépanations il y ait eu une insensibilisation provoquée. L'orateur signale qu'au Pérou les opérés mâchaient des feuilles de Coca renfermant un alcaloïde. De plus il ne faut pas oublier que les opérations portant sur le crâne sont très peu douloureuses ; les os sont très peu innervés. On évitait par ailleurs de toucher la dure-mère du crâne. Quant au cerveau lui-même il est indolore. Il mentionne une pianiste célèbre qui, opérée durant six heures, jouait du piano durant toute l'intervention.

M. FLECHON a été frappé en Egypte par la forme du crâne de Nefertiti. L'orateur lui précise que le chapeau allongé fausse déjà le profil, mais il n'est pas exclu qu'il y ait eu une pathologie morphologique.

Le Dr. DELIVRE se souvient que LARREY, Chirurgien de la Grande Armée, précise que, lors d'une trépanation on utilisait des produits calmants. Le Pr. LEPOIRE dit qu'il existe différents types de douleurs crâniennes et que chacune peut relever de moyens propres.

M. MAUBEUGE rappelle que des anthropologues et préhistoriens ont depuis longtemps invoqué le cannibalisme pour les trépanations et il se souvient avec intérêt de lectures d'adolescent portant sur ces détails dans des ouvrages de préhistoire. Par ailleurs il a déjà relevé dans des ouvrages

d'anthropologues qu'il y aurait eu des trépanations rituelles, magiques, liées à la notion de pensée dans la tête et, par là, d'ouverture sur l'Invisible religieux ou magique. Certaines formes de l'ouverture seraient alors pratiquées. Pour le Pr. LEPOIRE on se trouve fondamentalement en face de gestes chirurgicaux avec, ou cicatrisation-guérison, ou mort dans les suites opératoires. Les violents combats d'époque entraînaient beaucoup de chocs crâniens.

M. MAUBEUGE tient à relever un détail précis de l'exposé qui l'étonne profondément : au Pérou, aux environs de Cusco, le Pr. LEPOIRE s'est intéressé aux 10.000 crânes retrouvés dans un charnier, dont 2.000 perforés. Le nombre est absolument effarant vu le pourcentage atteint... Il est d'autant plus étonnant qu'il n'y avait pas, à l'époque, de moyens de communication pour concentrer tant de cas d'urgence. Ne s'agirait-il pas d'un charnier suite à des combats ? Le Pr. LEPOIRE précise qu'il est certain que plus de 60 % de ces crânes trépanés ont cicatrisé. Il y avait donc soins médicaux et survies importantes. De plus, on voit très bien une forme d'ouverture différente pour acte médical et trépanation sur boîte crânienne défoncée. Cusco demeure une énigme.

De vifs applaudissements ont souligné l'intérêt des présents pour un tel exposé.

La séance est levée à 19 heures 15.